Extension des modèles d'ingénierie système a l'analyse du domaine de travail

Camille Raymond

▶ **To cite this version:**

Camille Raymond. Extension des modèles d'ingénierie système a l'analyse du domaine de travail. Informatique [cs]. Université Paul Sabatier (Toulouse 3), 2018. Français. NNT : . tel-01952082

HAL Id: tel-01952082
https://theses.hal.science/tel-01952082

Submitted on 11 Dec 2018

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 : *l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)*

Présentée et soutenue le *13/06/2018* **par :**

Camille Raymond

Extension des modèles d'ingénierie système à l'analyse du domaine de travail

---

JURY

Eric Bonjour	Professeur des Universités, Université de Lorraine/ENSGSI	Rapporteur
Thierry Morineau	Professeur des Universités, Université de Bretagne Sud	Rapporteur
Olivier Grisvard	Docteur, Thales, IMT Atlantique	Examinateur
Laurence Kujawa	Ingénieure, Nexter Group	Examinateur
Julien Duval	Ingénieur, Altran	Invité
Julien Cegarra	Professeur des Universités, INU Champollion	Directeur de thèse
Daniel Prun	Enseignant-Chercheur, ENAC	Co-directeur de thèse

École doctorale et spécialité :
Aéronautique Astronautique : Sciences de l'information et de la communication
Unité de Recherche :
Laboratoire de Recherche ENAC
Directeur(s) de Thèse :
Julien Cegarra et *Daniel Prun*
Rapporteurs :
Eric Bonjour et *Thierry Morineau*

Table des matières

1 Introduction générale **10**

I État de l'art 14

1 L'ingénierie système **15**
1.1 Système et ingénierie système 15
1.2 Les normes de l'ingénierie système 20
1.3 L'ingénierie guidée par les modèles – MBSE 30
1.4 Formalisme SysML 33
1.5 Des lacunes dans la prise en considération des aspects humains 35

2 L'Intégration Homme-Système (HSI) **38**
2.1 Les domaines du HSI 39
2.2 Une vision par processus de l'approche HSI 41
2.3 La conception centrée utilisateur 43
2.4 Le HSI dans les modèles MBSE 44
2.5 L'ingénierie cognitive pour l'analyse de l'activité humaine . . . 47
2.6 Synthèse 51

3 Cognitive Work Analysis **53**
3.1 Cognitive Work Analysis 53
3.2 L'analyse du domaine de travail 55
3.3 La Hiérarchie d'Abstraction 56
3.4 Le CWA et l'ingénierie système 66
3.5 Le CWA et le HSI 67
3.6 Synthèse 73

4 Synthèse et proposition **75**

II Expérimentation 78

1 Expérimentation **79**
1.1 Cadre de l'étude expérimentale 79
1.2 Résultats de l'expérimentation 85
1.3 Synthèse 110

III Proposition de la méthode IS+WDA **114**

1 Intégration de l'analyse du domaine dans le MBSE **115**
1.1 Processus de définition des exigences 116
1.2 Processus de conception 121
1.3 Proposition de la méthode IS+WDA 124
1.4 Synthèse 132

IV Cas d'application **135**

1 Étude de cas NECTAR **136**
1.1 Description du cas d'étude NECTAR 136
1.2 Application de la démarche pour NECTAR 136
1.3 Itérations suivantes 160
1.4 Synthèse 162

2 Étude de cas DURESS II **164**
2.1 Description du système DURESS II 164
2.2 Application de la démarche pour DURESS II 164
2.3 Itérations suivantes 180
2.4 Synthèse 180

V Conclusion et perspectives **182**

1 Résumé des contributions **183**

2 Perspectives de travail **187**

VI Bibliographie **189**

VII Annexes **198**

Liste des tableaux

3.1 Nature de contrainte identifiée selon les phases du CWA 55
3.2 Continuum causal-intentionnel de domaines de travail 57
3.3 Questions auxquelles répondent les objectifs fonctionnels 59
3.4 Questions auxquelles répondent les fonctions abstraites 59
3.5 Questions auxquelles répondent les fonctions généralisées . . . 60
3.6 Questions auxquelles répondent les fonctions physiques 61
3.7 Questions auxquelles répondent les formes physiques 61
3.8 Sources d'information pour la hiérarchie d'abstraction 65

4.1 Couverture des domaines HSI par les phases du CWA 75

1.1 Répartition des participants des groupes WDA et HTA 82
1.2 Besoin exprimé par le client du système 84
1.3 Synthèse des cas d'utilisation modélisés 90
1.4 Acteurs modélisés dans les cas d'utilisation 91
1.5 Synthèse des cas d'utilisation modélisés 91
1.6 Résultats de la rédaction des scénarios nominaux et dégradés . 93

1.1 Objectif fonctionnel du domaine de travail NECTAR 141
1.2 Fonctions abstraites du domaine de travail NECTAR 141
1.3 Fonctions généralisées du domaine de travail NECTAR 144
1.4 Fonctions physiques du domaine de travail NECTAR 145
1.5 Formes physiques du domaine de travail NECTAR 146

2.1 Objectif fonctionnel du domaine de travail DURESS 167
2.2 Fonctions abstraites du domaine de travail DURESS 168
2.3 Fonctions abstraites du domaine de travail DURESS II 169
2.4 Fonctions physiques du domaine de travail DURESS II 169

Table des figures

1.1 Système à faire et système pour faire 17
1.2 Cycle de vie générique d'un système 17
1.3 Modèles de cycle de vie 19
1.4 Processus d'ingénierie système 21
1.5 Processus de la norme ISO 15288 :2015 22
1.6 Processus de la norme EIA 632 23
1.7 Processus de la norme IEEE 1220 24
1.8 Couverture des normes au cours du cycle de vie du projet 25
1.9 Niveaux de détails des normes 26
1.10 La boucle d'ingénierie 27
1.11 Démarche de la méthodologie ARCADIA 32
1.12 Diagrammes SysML 34
1.13 Liens entre processus, méthodes et formalismes 35
1.14 Coût du cycle de vie à travers le temps 37

2.1 Processus global du HSI 41
2.2 Modèle d'activité HSI 42
2.3 Modèle Homme-Système 43
2.4 Liens entre l'ingénierie système et l'UCD 45
2.5 Ontologie HSI 45
2.6 Couverture des *Human Views* selon les domaines HSI 48
2.7 Exemple d'un modèle HTA 50
2.8 L'espace constitué par les contraintes 51

3.1 Relations moyens-fins de la hiérarchie d'abstraction 58
3.2 Hiérarchie d'abstraction d'un thermostat 62
3.3 Le CWA dans les activités de l'ingénierie système 67
3.4 Liens entre CWA, l'UCD et l'ingénierie système 69
3.5 Relations entre les *Human Views*, CWA et MoDAF 70
3.6 Liens entre l'analyse du domaine et analyse de la tâche 73

1.1 Protocole expérimental de l'étude 83
1.2 Notes obtenues du contrôle des connaissances de la formation . 86
1.3 Moyenne de temps de réalisation des exercices (en secondes) . . 87
1.4 Sentiment de réussite des participants 88
1.5 Pourcentage de couverture des cas d'utilisation principaux . . . 92
1.6 Moyenne des résultats du groupe HTA du test NASA-TLX . . . 96
1.7 Moyenne des résultats du groupe WDA du test NASA-TLX . . . 97

1.8 Comparaison des résultats du test NASA-TLX 98
1.9 Exemple d'une question du test TAM 99
1.10 Résultat du groupe HTA pour le test TAM 100
1.11 Résultat du groupe WDA pour le test TAM 102
1.12 Comparaisons des résultats pour le test TAM 105
1.14 Échelle de lecture des scores du test SUS 106
1.15 Score du test SUS pour le groupe HTA 107
1.16 Score du test SUS pour le groupe WDA 108
1.17 Comparaison des résultats du test SUS 110

1.1 Transposition des contraintes vers des fonctions abstraites . . . 118
1.2 Méthode IS+WDA 124
1.3 Hiérarchie d'abstraction modifiée du thermostat 133

1.1 Modèle MBSE générique utilisé pour NECTAR 137
1.2 Acteurs du domaine NECTAR 139
1.3 Analyse du domaine pour la préparation d'un vol 140
1.4 Niveau de satisfaction selon les activités des voyageurs 142
1.5 Traduction des contraintes en fonctions abstraites 143
1.6 Modélisation en SysML de la hiérarchie d'abstraction 147
1.7 Modélisation des exigences 148
1.8 Cas d'utilisation de NECTAR 151
1.9 Parcours de la hiérarchie d'abstraction 152
1.10 Scénario opérationnel pour l'achat d'un billet d'avion 153
1.11 Quatre personas de voyageurs 154
1.12 Matrice d'allocation de la hiérarchie d'abstraction et les exigences 155
1.13 Modèle FBS 157
1.14 Matrice d'allocation entre la hiérarchie d'abstraction et le FBS . 158
1.15 Modèle de décomposition physique PBS 159
1.16 Matrice d'allocation FBS–PBS 160
1.17 Modèle de traçabilité pour l'exigence liée à l'achat de billet . . . 161
1.18 Mise à jour de la hiérarchie d'abstraction 162

2.1 Représentation schématique du système DURESS II 165
2.2 Exemple d'analyse de la tâche 166
2.3 Hiérarchie d'abstraction de DURESS II 167
2.4 Hiérarchie d'abstraction modélisée en SysML 170
2.5 Diagramme d'exigences du système DURESS II 171
2.6 Diagramme de cas d'utilisation pour le système DURESS II . . 173
2.7 Modèle HTA de DURESS II 174
2.8 Stratégies de remplissage des réservoirs 175
2.9 Matrice d'allocation des exigences 176
2.10 Le FBS du système DURESS II 177
2.11 Matrice d'allocation du FBS et de la hiérarchie d'abstraction . . 177
2.12 Le PBS de DURESS II 178
2.13 Matrice d'allocation des éléments FBS–PBS 179
2.14 Modèle de traçabilité pour l'alimentation du système 180

Remerciements

J'adresse mes premiers remerciements à la société Altran, à l'École Nationale de l'Aviation Civile et les membres de l'équipe de recherche Informatique Interactive qui ont financé la thèse et m'ont accueilli dans leurs équipes et leurs locaux.

Je remercie mes encadrants industriels Julien Duval et Julien Rechard. Je remercie mes encadrants académiques Julien Cegarra et Daniel Prun. Merci pour leur accompagnement, leur implication, leurs conseils et leur soutien tout au long de ces trois années.

Je remercie Éric Bonjour et Thierry Morineau d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse, Laurence Kujawa et Olivier Grisvard d'en être les examinateurs.

Je remercie l'équipe NECTAR pour m'avoir intégré à leur projet.

Je remercie le groupe du Master d'ergonomie de l'Institut National Universitaire Champollion d'Albi pour leur contribution au travail d'expérimentation, et aux ingénieurs système d'Altran pour leur participation.

J'ai une pensée émue à l'attention de mes parents, de mon frère, Céline, Sachou et Poupou. J'ai une pensée amicale pour les copains. J'ai une pensée affectueuse pour Moumou.

Enfin, je n'ai pas les mots suffisants pour remercier ma petite fiancée Lucie.

Bonne lecture,

Camille

Chapitre 1

Introduction générale

Cette thèse s'inscrit dans un contexte multidisciplinaire à la croisée de l'ingénierie système et de l'ingénierie cognitive. Elle a pour objectif de proposer une méthode permettant d'améliorer la prise en compte des aspects humains lors de l'ingénierie des systèmes complexes.

Enjeux de l'ingénierie système et de l'ingénierie cognitive

La motivation menant à la conception ou à la modification d'un système nait d'une insatisfaction exprimée par une personne ou une organisation. La finalité d'un système est donc d'y répondre avec succès.

La réalisation de systèmes est destinée à l'ingénierie système. Elle constitue la discipline responsable de la mise en œuvre de systèmes qui répondent de manière adéquate aux demandes exprimées. Elle dispose de normes, de méthodes, de formalismes et d'outils qui guident la réalisation de ces systèmes. Les normes définissent ce que les ingénieurs doivent faire (le *quoi ?*), les méthodes la manière de le faire (le *comment ?*), les formalismes et les outils les moyens de le faire (le *avec quoi ?*). Ces moyens sont généralisables, ils s'appliquent pour la majorité des domaines dans lesquels opèrent des systèmes (transport, énergie, défense, médical, etc.).

L'ingénierie système aborde la succession d'étapes rencontrées dans la vie d'un système. Elles débutent tout d'abord par la conceptualisation du système qui évalue son intérêt et sa faisabilité, puis ce dernier est conçu et développé si sa réalisation est justifiée. Il est ensuite déployé en milieu opérationnel dans lequel il est maintenu en état de marche tout au long de sa mission jusqu'à son démantèlement.

Ces étapes font intervenir une multitude de parties prenantes. Les parties prenantes *utilisatrices* représentent la ou les personnes ou organisations en de-

mande du système. Les parties prenantes *conceptrices* constituent les entités en charge de la réalisation du système.

Ces deux typologies de parties prenantes incluent des acteurs humains. Les parties prenantes utilisatrices sont constituées notamment par des opérateurs humains qui manœuvrent le système. Les parties prenantes conceptrices comportent une multitude d'intervenants. Outre les ingénieurs système, d'autres disciplines contribuent aux systèmes comme celles liées aux aspects techniques (mécanique, électrique, etc.), au pilotage de projets (planification, budget, gestion des risques etc.) ou bien aux problématiques liées à l'ergonomie et aux facteurs humains.

Il est nécessaire d'intégrer la problématique des parties prenantes dans la conception pour l'utilisation future d'un système. Ce constat entraine une complexification inévitable des systèmes car il faut considérer les contraintes techniques, humaines et organisationnels. Les disciplines qui traitent de ces aspects restent assez peu intégrées, chacune ayant des pratiques et des langages différents. Cela pose un problème d'ingénierie dont un des objectifs est, justement, de proposer une approche intégrée.

Un des axes de travail consiste à s'appuyer sur les méthodes issues de l'ingénierie cognitive pour analyser les caractéristiques des opérateurs humains du système. Par exemple en identifiant les tâches réalisées, les besoins en termes de ressources et d'information, l'organisation du travail, les performances mesurées etc.

La littérature a identifié depuis longtemps ce besoin. Les ergonomes, les praticiens des facteurs humains ou les concepteurs d'Interaction Homme-Machine (IHM) sont impliqués pour faire face à cette problématique. Néanmoins, on observe des difficultés à intégrer, de manière précoce, leurs contributions dans le système global. De manière réciproque, l'ingénierie système rencontre des difficultés analogues à les intégrer dans ses normes, ses méthodes, ses formalismes et ses outils.

Notre travail s'inscrit dans ce contexte à deux niveaux.

Tout d'abord, le premier objectif de la thèse est d'identifier le ou les moyens susceptibles d'aider les parties prenantes à améliorer l'intégration des aspects humains dans les activités de conception de système. L'ingénierie cognitive est impliquée dans cette problématique, grâce notamment à ses méthodes d'analyse de l'activité humaine dans son environnement de travail. Elles permettent d'identifier et de modéliser les actions des opérateurs, en tenant compte des situations opérationnelles rencontrées par les systèmes.

Le second objectif de la thèse est de proposer une méthode de conception qui étend les modèles d'ingénierie système aux modèles de l'ingénierie cognitive. Cette méthode a des avantages à deux niveaux.

Premièrement, le gain espéré est axé sur les activités de conception des systèmes. En effet, une convergence accrue des deux disciplines améliore la collaboration des deux disciplines qui peinent encore à intégrer leurs travaux respectifs.

Le second avantage découle directement du premier. Grâce à une meilleure collaboration, les systèmes conçus seront davantage conformes aux capacités et aux limitations des opérateurs dans leur environnement de travail, les erreurs humaines diminueront pour des niveaux de performance et de sécurité accrus.

Plan de lecture

Le manuscrit est structuré autour de quatre axes principaux : l'état de l'art, les résultats de notre expérimentation, notre contribution méthodologique et son application sur deux cas d'étude.

État de l'art

Le manuscrit débute par une étude de l'état de l'art (Partie I – *État de l'art*). Il est composé des trois thèmes qui constituent le cadre de référence de la thèse.

Le Chapitre I.1 – *L'ingénierie système* est consacré à une présentation générale des concepts de l'ingénierie système (les normes, les méthodes et les formalismes). Il se conclut par une analyse exposant les faiblesses de l'ingénierie système à considérer les aspects humains dans ses activités de conception de systèmes.

Le deuxième chapitre (Chapitre I.2 – *L'Intégration Homme-Système (HSI)*) présente les apports de l'approche *Human-System Integration* (HSI) ayant pour objectif de répondre aux défis de l'ingénierie système identifiés précédemment. Cette partie s'intéresse particulièrement aux contributions méthodologiques et aux approches de l'analyse de l'activité humaine. Parmi les méthodes étudiées, le choix du *Cognitive Work Analysis* (CWA) comme méthode de support à l'ingénierie système sera justifié.

Le troisième chapitre (Chapitre I.3 – *Cognitive Work Analysis*) est donc l'occasion de présenter le CWA, et plus particulièrement sa première étape, l'analyse du domaine de travail. Les ponts qui existent entre cette méthode, l'ingénierie système et les autres méthodes de l'ingénierie cognitive seront également étudiés.

L'état de l'art se conclut par une synthèse de la problématique et de la proposition de contribution apportée (Chapitre I.4 – *Synthèse et proposition*).

Expérimentation

L'étude de l'art a montré que l'analyse du domaine constitue une méthode pertinente pour l'ingénierie système afin de mener une démarche HSI. Toutefois, peu de travaux ont étudié l'apport de cette méthode pour l'ingénierie système. Pour cette raison, une étude expérimentale a été menée en proposant à des ingénieurs système de modéliser un système (Chapitre II – *Expérimentation*). Ce travail a permis d'évaluer les modèles produits et de recueillir puis d'interpréter les ressentis subjectifs des ingénieurs face à cette méthode.

Proposition de la méthode IS+WDA

L'état de l'art et l'expérimentation ont permis d'identifier les forces et les faiblesses de l'ingénierie système et de l'analyse du domaine. Ce chapitre constitue le point central de notre contribution en présentant la méthode IS+WDA (Chapitre III – *Proposition de la méthode IS+WDA*). Cette méthode intègre l'analyse du domaine dans les processus de conception de l'ingénierie système, c'est-à-dire le recueil de données, l'analyse et la spécification des exigences, l'architecture fonctionnelle et physique du système, tout en incluant les processus de validation et de vérification.

Cas d'étude

La méthode IS+WDA proposée sera déployée dans la dernière partie du document au travers de deux cas d'étude.

Le première traite du système NECTAR qui fournit aux voyageurs les moyens pour préparer leurs vols (Chapitre IV.1 – *Étude de cas NECTAR*). Il se caractérise par l'importante activité humaine du système et la multitude de choix disponibles aux voyageurs pour atteindre leurs objectifs.

Le second cas d'application se consacre à la centrale thermodynamique DURESS II (Chapitre IV.2 – *Étude de cas DURESS II*). Il se distingue du système NECTAR par l'absence d'opérateurs humains dans le système. Il représente l'occasion de montrer que la méthode IS+WDA est généralisable à de tels systèmes.

Conclusion générale et perspectives

Le document s'achève par la synthèse du manuscrit et présente les perspectives de travail futures qui s'ouvrent afin de compléter et d'améliorer notre travail (Chapitre V – *Conclusion et perspectives*).

Première partie

État de l’art

Chapitre 1

L'ingénierie système

Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans le domaine de l'ingénierie système et de l'intégration des aspects humains dans ses activités. Nous débuterons donc l'état de l'art par une description du cadre général de l'ingénierie système. Celui-ci est constitué de normes, de méthodes et de formalismes mis à disposition auprès des diverses parties prenantes impliquées dans la conception et la réalisation de systèmes. Enfin, nous présenterons les limites auxquelles est actuellement confrontée l'ingénierie système pour intégrer les aspects humains.

1.1 Système et ingénierie système

La littérature compose avec une multitude de définitions de la notion de *système*. L'INCOSE (International Council on Systems Engineering) définit un système comme « *une construction ou une collection d'éléments qui, une fois assemblés, produisent des résultats dont l'obtention ne peut être obtenue par les éléments seuls* » [53]. Meinadier [68] définit un système comme « *un ensemble composite de personnels, de matériels et de logiciels organisé pour que leur interfonctionnement permette, dans un environnement donné, de remplir les missions pour lesquelles il a été conçu* ».

Ces définitions expriment plusieurs aspects caractérisant un système.

Le développement d'un système ou la modification d'un système existant est motivé par l'expression de besoins mal ou non satisfaits. L'objectif fondamental d'un système est de répondre à ces besoins, dans un contexte contraint par l'environnement, les ressources disponibles et les législations.

Un système est *complexe*, il ne se réduit pas à la somme de ses constituants, mais il se définit également par leurs interactions. La nature de ces constituants est hétérogène : humains, physiques, logiciels, procédures de travail, etc.

Il est par ailleurs qualifié de *sociotechnique* car il existe de fortes interactions entre les composants techniques, humains et environnementaux [18]. L'environ-

nement dans lequel est inclus le système influence son comportement tout au long de sa vie. Il est caractérisé par ses propriétés, ses règles et ses contraintes opérationnelles et organisationnelles.

Il peut constituer une sous-partie d'un ensemble de systèmes. Il interopère alors avec d'autres systèmes extérieurs à l'aide d'interfaces. On parle alors de système de systèmes [16, 53].

L'ingénierie système est la discipline responsable de la production d'un système qui doit être apte à répondre aux besoins exprimés, en tenant compte des contraintes existantes (coût, délais etc.). L'INCOSE définit l'ingénierie système comme « *la discipline de l'ingénierie responsable de la création et de la réalisation de processus interdisciplinaires garantissant la satisfaction des besoins du client et des parties prenantes d'une manière à assurer la qualité, la confiance, la gestion financière dans le respect des délais tout au long du cycle de vie du projet* »[53]. Le Département américain de la Défense [39] définit quant à lui l'ingénierie système comme une discipline mettant en œuvre « *les processus de gestion et de résolution de problèmes techniques appliquées durant l'ensemble des étapes de développement, afin de transformer les besoins et les exigences en un ensemble de descriptions de produits et de processus système (en ajoutant la valeur et le détail à chaque niveau de développement)* ».

L'ingénierie système constitue ainsi une démarche méthodologique qui propose une approche holistique et pluridisciplinaire pour la conception et la mise en œuvre des systèmes complexes.

La production d'un système implique une multitude d'intervenants, autrement appelés *parties prenantes*. Une partie prenante désigne les personnes physiques et/ou les organisations morales concernées directement ou indirectement par le système [56]. La démarche d'ingénierie système intègre les contributions de toutes les disciplines impliquées dans l'ensemble du cycle de vie du système, en tenant compte des différents intérêts et exigences des parties prenantes impliquées [17]. On distingue deux catégories de parties prenantes [5].

Les parties prenantes *intéressées* représentent l'organisme qui émet le souhait d'acquérir et d'exploiter le système. Elles sont généralement les utilisatrices directes ou indirectes du système.

Les parties prenantes *conceptrices* sont chargées de la réalisation du système, en réponse aux attentes des parties prenantes intéressées. Elles sont responsables de la bonne conduite du projet en vue de satisfaire la qualité, les délais et les coûts désirés par les parties prenantes intéressées. Plusieurs spécialités contribuent à la conception d'un système : les analystes, les experts des processus métiers, les experts du contrôle de la qualité, les architectes, les développeurs, les chefs de projet etc.

En définitive, l'ingénierie système est orientée vers deux perspectives complémentaires [5]. D'une part, elle se concentre sur la réalisation d'une solution technique qui répond à des besoins dans un cadre contraint ; on parle alors de « système à faire ». D'autre part, l'ingénierie système inclut l'ensemble des activités nécessaires pour produire le *système à faire*. Il s'agit par exemple de guider la réalisation par des procédés de gestion de projet. On parle alors de *système pour faire*.

Le modèle ci-dessous (Figure 1.1) illustre les relations entre l'ingénierie système, le *système à faire* et le *système pour faire*.

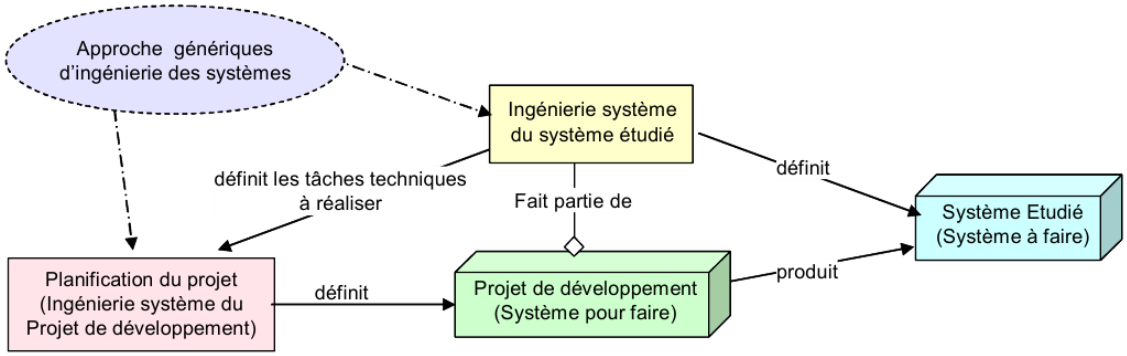


FIGURE 1.1 – *Système à faire* et *système pour faire* [5]

1.1.1 Un système possède un cycle de vie

Un système rencontre une succession d'étapes qui rythme son cycle de vie. La norme ISO 15288 [3] définit un cycle de vie générique d'un système. D'autres cycles de vie davantage spécifiques à un domaine ou à une entreprise existent également, comme ceux de l'*US Department of Defense* (DoD) [39] ou celui de la NASA [47]. Le schéma ci-dessous présente le cycle de vie générique formulé par la norme ISO 15288 (Figure 1.2).

<table>
<tr><td rowspan="2">Conceptualisation</td><td rowspan="2">Développement</td><td rowspan="2">Production</td><td>Utilisation</td><td rowspan="2">Retrait</td></tr>
<tr><td>Maintenance</td></tr>
</table>

FIGURE 1.2 – Cycle de vie générique d'un système [3]

Conceptualisation Des besoins émergent dans un environnement. Des recherches exploratoires sont conduites afin d'évaluer l'opportunité de concevoir ou de modifier un système. La phase de conceptualisation construit l'espace du problème en définissant une première étude des besoins, d'exploration des idées et des technologies qui mènent à une étude de faisabilité et des propositions de solutions candidates.

Développement Une fois la décision actée de développer ou de modifier un système, la phase de *développement* œuvre à la spécification des exigences et la considération des contraintes du projet (technologique, structurelle, économique etc.). Les architectures système sont conçues, intégrées, vérifiées et validées. Cette phase garantit que le système conçu répond aux exigences des parties prenantes.

Production La phase de *production* définit l'ensemble des activités pour la construction et pour l'assemblage du système, en accord avec les spécifications établies. Des phases itératives de V&V (Vérification & Validation) sont conduites pour attester de la bonne qualité du système produit.

Utilisation Une fois produit, le système est mis en service opérationnel dans son environnement d'utilisation. Il est alors utilisé par les parties prenantes intéressées.

Support Le système peut être sujet à des dysfonctionnements entrainant des travaux de maintenance pour préserver une bonne condition opérationnelle. Il incombe aux concepteurs d'effectuer des mises à jour pour répondre à des nouvelles demandes ou corriger des aléas non détectés lors des phases précédentes. Le programme de support est généralement établi lors de la phase de développement [53]. D'autre part, un système de soutien logistique (*Integrated Logistics Support* – SLI) doit être apte à fournir les moyens matériels, humains et organisationnels pour permettre au système d'atteindre ses missions [114].

Retrait L'utilisation d'un système peut être suspendue après une certaine période d'utilisation pour diverses raisons. Il peut par exemple ne plus répondre aux demandes actuelles ou atteindre un point d'obsolescence technologique. Le système entre alors dans un période de retrait où le système doit être démantelé ou archivé.

La réalisation d'un système implique une multitude de parties prenantes. La division du cycle de vie d'un projet en étape facilite la répartition des parties prenantes. Par exemple, l'expression du besoin ou l'étude d'opportunité relève des parties prenantes intéressées, le développement ou le support relevant de la responsabilité des parties prenantes conceptrices. Par ailleurs, le cycle de vie d'un système structure l'organisation du projet en imposants des jalons à chaque

fin d'étapes, offrant aux parties prenantes des points de visibilité sur l'état du projet [5].

La mise en œuvre pratique du cycle de vie d'un système a offert à la discipline plusieurs approches. On parle alors de modèles de cycle de vie. Les plus répandus sont le cycle en cascade [99], le cycle en V [36] et le cycle en spirale [15]. Ces modèles prescrivent l'ordonnancent et les jalons des activités des parties prenantes pour le développement de systèmes. Les modèles de cycle de vie déterminent l'enchaînement des étapes de cycle de vie d'un système.

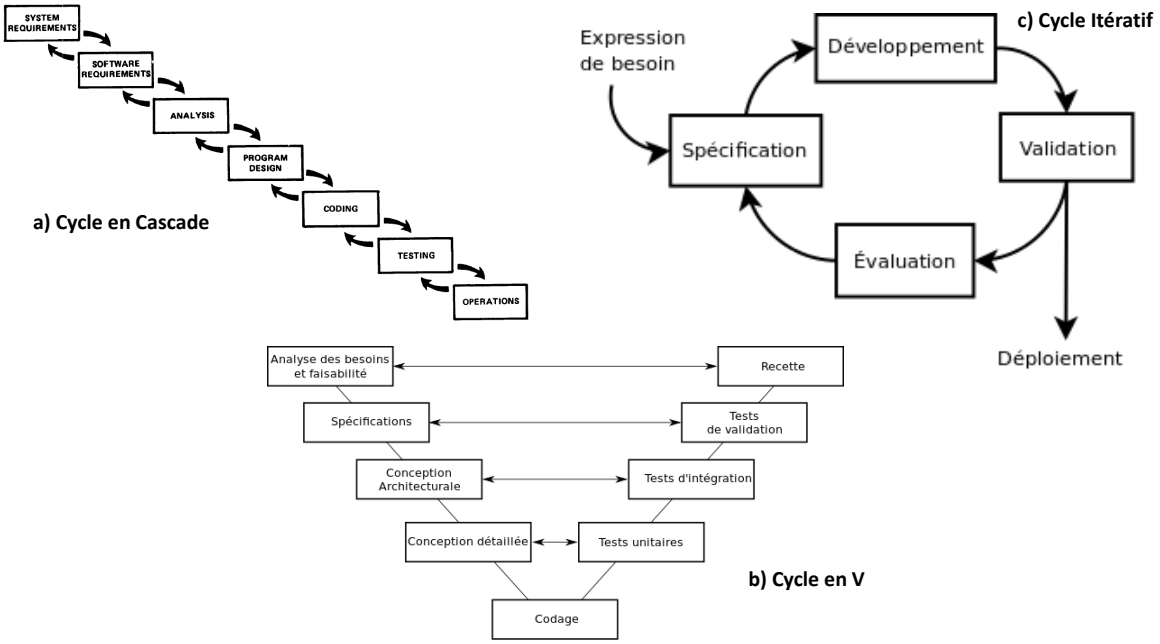


FIGURE 1.3 – Modèles de cycle de vie

Le cycle en cascade (Figure 1.3a) conduit à une réalisation séquentielle des activités d'analyse des besoins, de conception, de mise en œuvre, de vérification et de mise en service opérationnelle avec des retours possibles sur les activités précédentes pour chaque étape.

Le cycle en V propose une séparation du cycle de vie en deux branches (Figure 1.3b). La branche descendante inclut l'analyse des besoins, la spécification des exigences et la conception de l'architecture du système. La branche ascendante est constituée des phases d'intégration, et de vérification et de validation du système au regard des besoins initiaux. La phase de développement se positionne à l'arête des deux branches. Le modèle du cycle en V améliore le modèle en cascade car il permet de limiter les retours aux phases précédentes en cas de problèmes. Il met en évidence la nécessité d'anticiper et d'élaborer les plans de vérification et de validation qui détermineront les attendus des étapes de la branche descendante.

Le cycle en spirale reprend les étapes du cycle en V, mais les organise non plus en branches descendante/ascendante mais en cycle itératif (Figure 1.3c). Chaque itération est décomposée de la manière suivante : détermination des objectifs de l'itération, évaluation des solutions potentielles, développement et vérification du résultat. Le système gagne en maturité à chaque itération avec une maîtrise des risques accentuée car chaque itération est vérifiée. Ainsi, ce modèle de cycle de vie autorise plus facilement à réévaluer risques en cours de développement que le cycle en V.

Les modèles de cycle de vie préconisent l'enchaînement des étapes dans la vie du système. Ces étapes sont définies par les normes de l'ingénierie système qui sont présentées dans le chapitre suivant. Les liens existants entre les modèles de cycle de vie et les normes sont présentés au chapitre 1.2.5 – *Liens entre les normes et le cycle de vie d'un système*.

1.2 Les normes de l'ingénierie système

L'ingénierie système s'est dotée de normes qui décrivent les activités à mener pour les étapes du cycle de vie d'un système. Leur existence repose sur l'idée qu'il existe de fortes analogies entre une grande partie des projets, quelle que soit la nature du système, de sa mise en œuvre ou du domaine d'application [10]. L'étude des retours d'expérience a permis d'identifier, de formaliser et d'harmoniser les bonnes pratiques éprouvées de la discipline. Elles déterminent les activités à mener pour les étapes du cycle de vie du système.

Les normes fournissent les références communes nécessaires pour structurer et institutionnaliser les pratiques de l'ingénierie système. Elles offrent de ce fait les moyens de communication et de collaboration entre les praticiens et les organisations du domaine. Par ailleurs, l'existence de normes constitue un indicateur de maturité, d'expansion et d'acceptation de la discipline considérée [86]. L'adoption des normes favorise [31] :

- la qualité des systèmes produits,
- l'anticipation des problèmes et de la maîtrise des risques,
- la maîtrise de la complexité des systèmes complexes,
- la tenue des délais et la maîtrise des coûts, avec notamment une anticipation en amont du coût global du cycle de vie,
- l'efficacité dans la maîtrise de la coopération de l'interdisciplinarité et de multiples acteurs,
- la satisfaction des parties prenantes

Le normes formalisent les processus de l'ingénierie système (Figure 1.4). Un processus est un ensemble d'activités, sous le contrôle de régulations (*Controls*), qui transforment un ensemble d'éléments en entrée (*Inputs*) en un ensemble d'éléments de sortie (*Outputs*) dans un contexte déclencheur (*Enablers*). Les

normes explicitent donc les résultats attendus pour une activité donnée. En revanche, elles ne spécifient pas la manière dont ces transformations se déroulent, en termes d'entités réalisatrices ou de temporalité. En ce sens, les normes se veulent généralistes afin de convenir à une grande diversité de projets et de domaines. Les processus sont mis en œuvre par des méthodes plus spécifiques au domaine d'application.

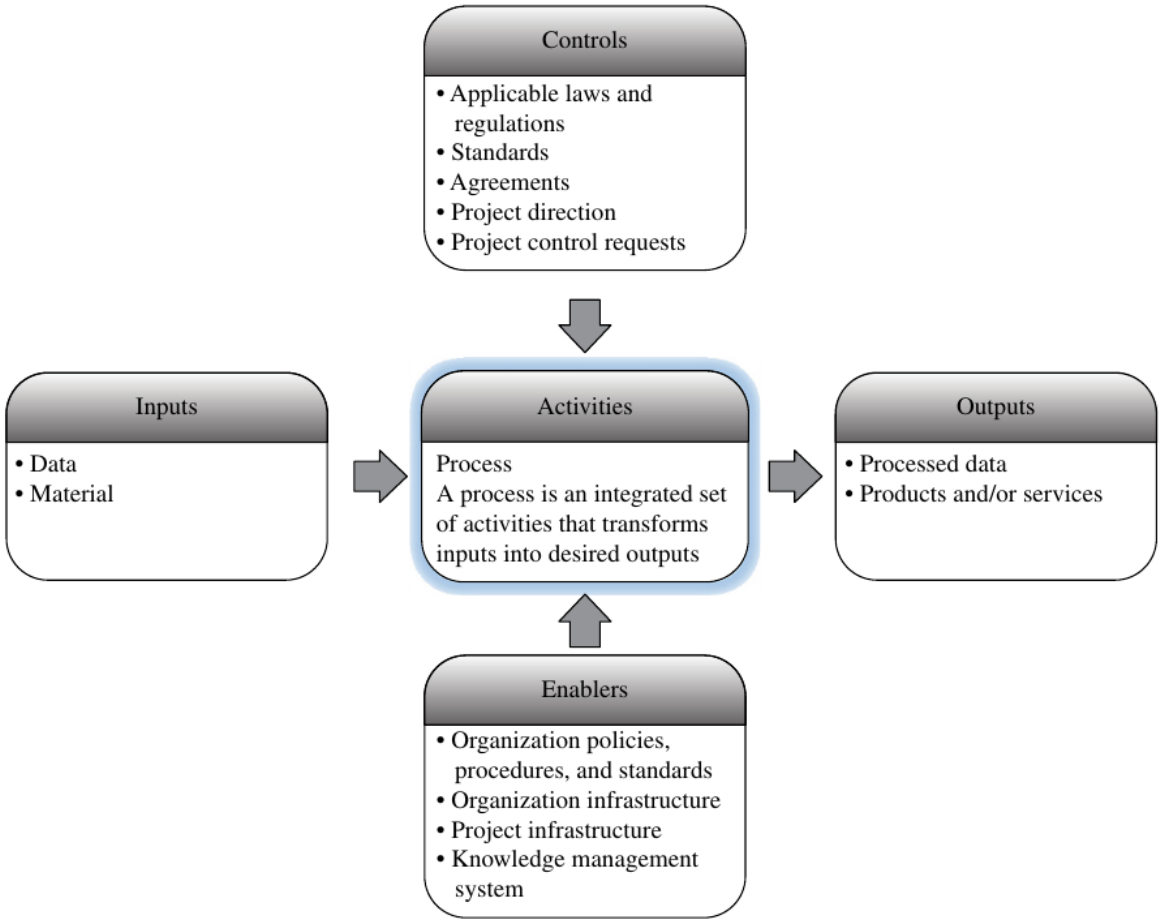


FIGURE 1.4 – Processus d'ingénierie système [53]

1.2.1 La norme ISO 15288

Outre la définition du cycle de vie générique d'un système, la norme ISO 15288 formalise l'ensemble des processus de l'ingénierie système. Elle les organise autour de quatre thèmes : (1) processus techniques, (2) processus de projet, (3) processus de contractualisation et (4) processus d'entreprise. Le schéma ci-dessous (Figure 1.5) présente la cartographie des processus définis par la norme ISO 15288 issue de la révision de 2015.

Les processus *techniques* déterminent les activités à mener pour transformer une demande initiale en système opérationnel, maintenable et dont le retrait

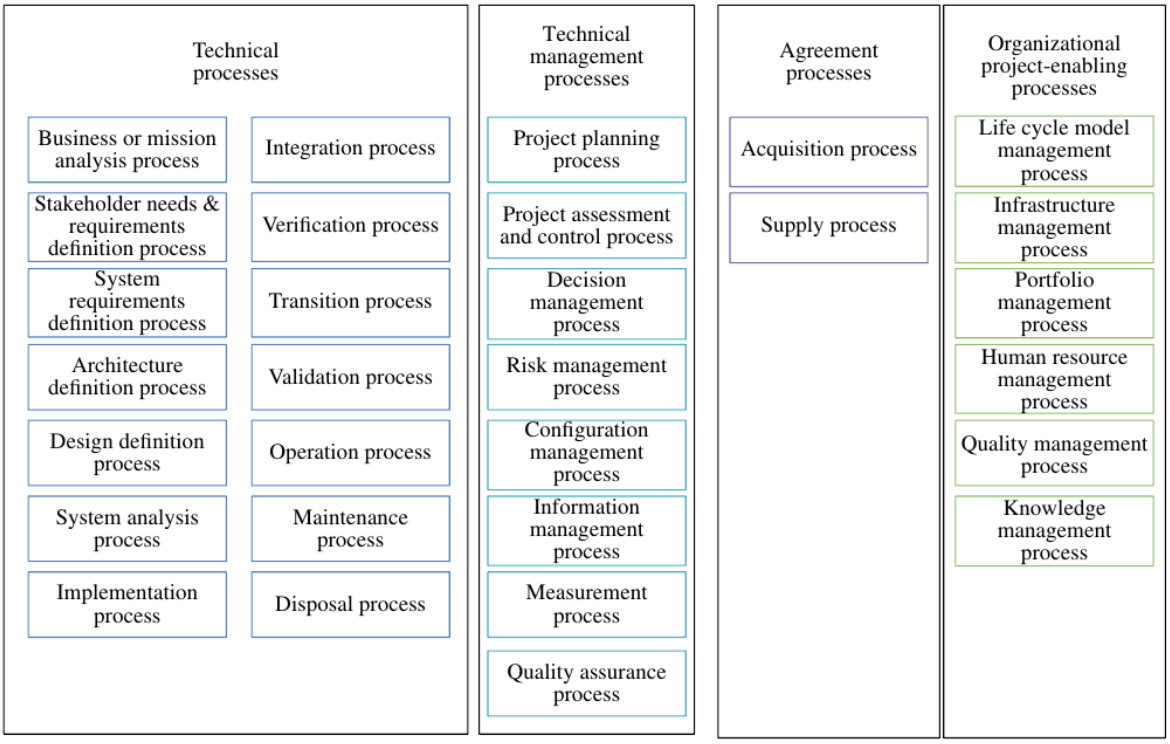


FIGURE 1.5 – Processus de la norme ISO 15288 :2015 [53]

est organisé. Le système produit est le résultat de processus d'identification et de spécifications d'exigences, de conception et d'implémentation d'architectures systèmes intégrées. La présence de processus de vérification et de validation garantit la qualité adéquate du système produit auprès des parties prenantes.

Les processus *projet* sont utilisés par les parties prenantes conceptrices pour conduire le projet aux travers des activités de planification, de décision, d'évaluation ou de gestion des risques.

Les processus *contractualisation* mènent l'établissement de liens contractuels entre les parties prenantes pour l'acquisition et la fourniture des biens et services attendus.

Les processus *entreprise* gèrent l'organisation de l'entreprise vis-à-vis des domaines communs à ses différents projets. Cela concerne la gestion de la qualité des projets, de la gestion des ressources humaines ou de l'infrastructure de l'entreprise.

1.2.2 Norme EIA 632

La norme EIA 632 « Processus pour l'ingénierie d'un système » [8] fournit l'ensemble des processus fondamentaux pour guider les concepteurs dans la réalisation du système à partir d'une demande initiale. Cette norme propose un

ensemble de treize processus répartis en cinq catégories (Figure 1.6). Elle affine les processus de la norme ISO 15288 en détaillant davantage les processus techniques.

L'ensemble des processus défini par cette norme permet aux concepteurs du système de couvrir l'ensemble du cycle de vie d'un système ; de la demande initiale au système produit. Cette norme traite des problématiques techniques, d'évaluation, de gestion et d'acquisition.

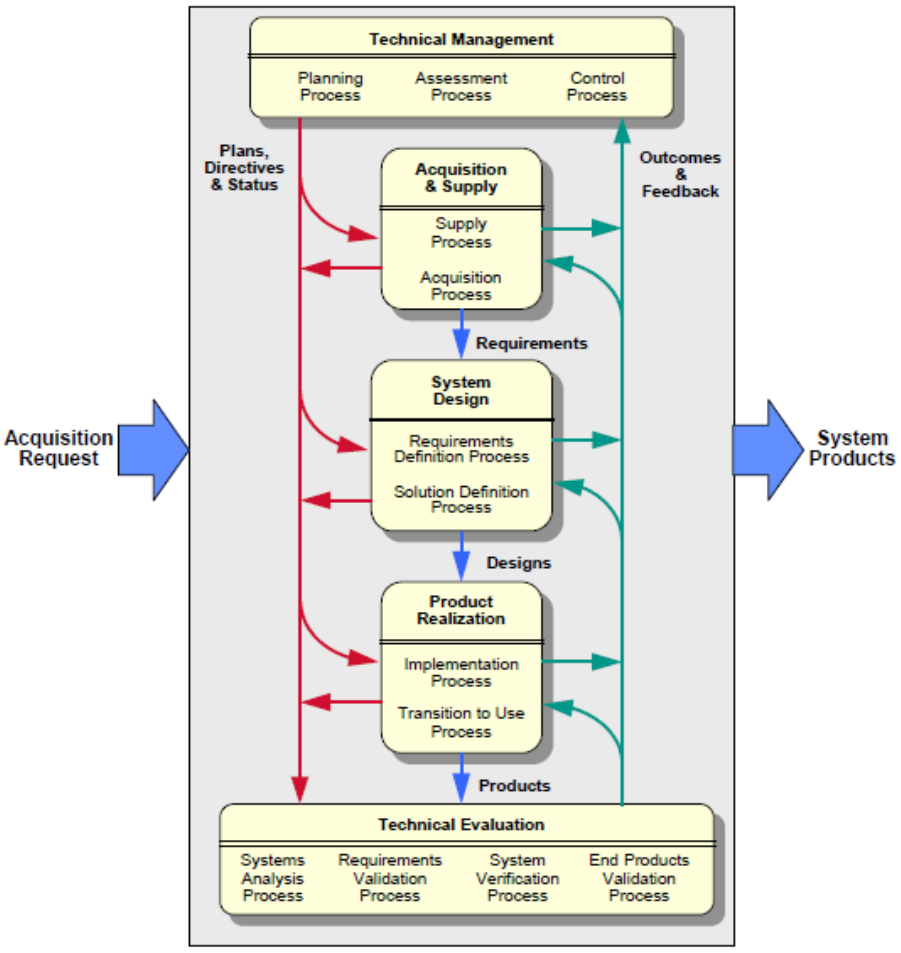


FIGURE 1.6 – Processus de la norme EIA 632

Acquisition & Supply Les processus *Acquisition & Supply* sont utilisés par les organisations pour contractualiser les travaux à réaliser et à déterminer les livrables attendus. Ils permettent donc de formaliser les besoins et les exigences du système, les contraintes de coût et de délais, la gestion du projet etc.

Technical Management Les processus *Technical Management* sont déployés pour définir la solution technique, la planification et le contrôle des efforts techniques nécessaires pour satisfaire les demandes formulées.

System Design Les processus *System Design* permettent d'identifier et de définir les exigences des parties prenantes du système. Ces exigences, une fois validées, sont rédigées sous la forme de spécifications.

Production Realization Les processus de la phase *Production Realization* sont utilisés pour mettre en œuvre les spécifications établies dans la phase précédente. Le système produit est alors fourni aux parties prenantes, en s'assurant que les processus de support et de maintenance sont engagés.

Évaluation technique Les processus *Technical Evaluation* évaluent les solutions de conception proposées dans un objectif de maîtrise des risques et de faisabilité. Ces processus identifient également les conflits qui peuvent survenir lors de l'élicitation des exigences.

1.2.3 Norme IEEE 1220

La norme IEEE 1220 « Application et gestion des processus d'ingénierie système » [50] définit les processus requis pour transformer les besoins, les exigences et les contraintes en un système opérationnel (Figure 1.7).

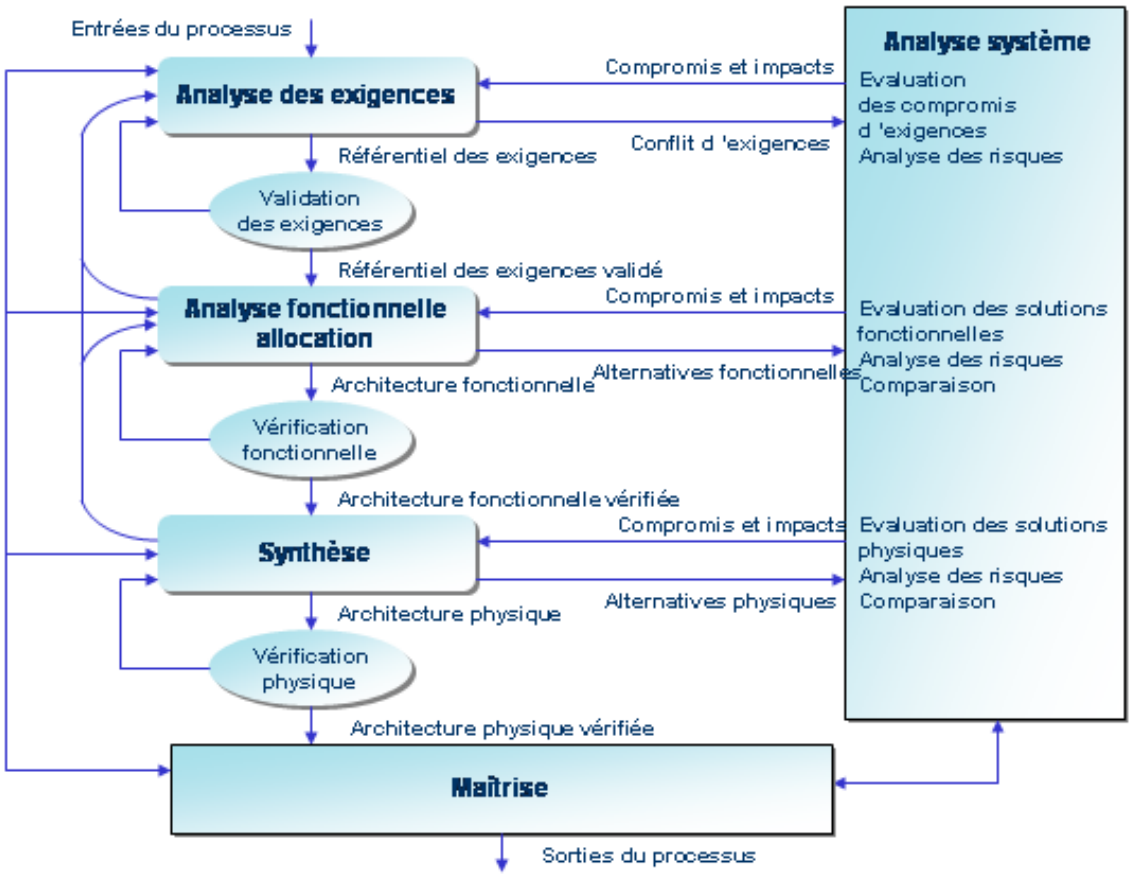


FIGURE 1.7 – Processus de la norme IEEE 1220 [5]

Cette norme dispose de trois processus : (1) analyse des exigences, (2) analyse fonctionnelle et (3) synthèse. Chacun de ces processus est lui-même soumis à des processus de vérification ou validation. Le processus d'analyse du système fournit les moyens pour évaluer et résoudre les conflits entre les exigences, la décomposition fonctionnelle, la sélection des solutions de conception, l'appréciation de l'efficacité du système et la gestion des risques. Le processus de contrôle concerne la gestion et la documentation des activités d'ingénierie système.

La norme IEEE 1220 se concentre sur les processus techniques d'ingénierie système, de l'analyse des exigences à la définition physique du système. Elle ne porte que sur la phase de définition du système, et ne se préoccupe pas des problématiques liées à la gestion du projet ou autres de la norme ISO 15288.

1.2.4 Liens entre les normes

Des disparités émergent à la vue de la présentation des normes d'ingénierie système. En premier lieu, les normes se différencient par l'étendue de la couverture du cycle de vie du système (Figure 1.8).

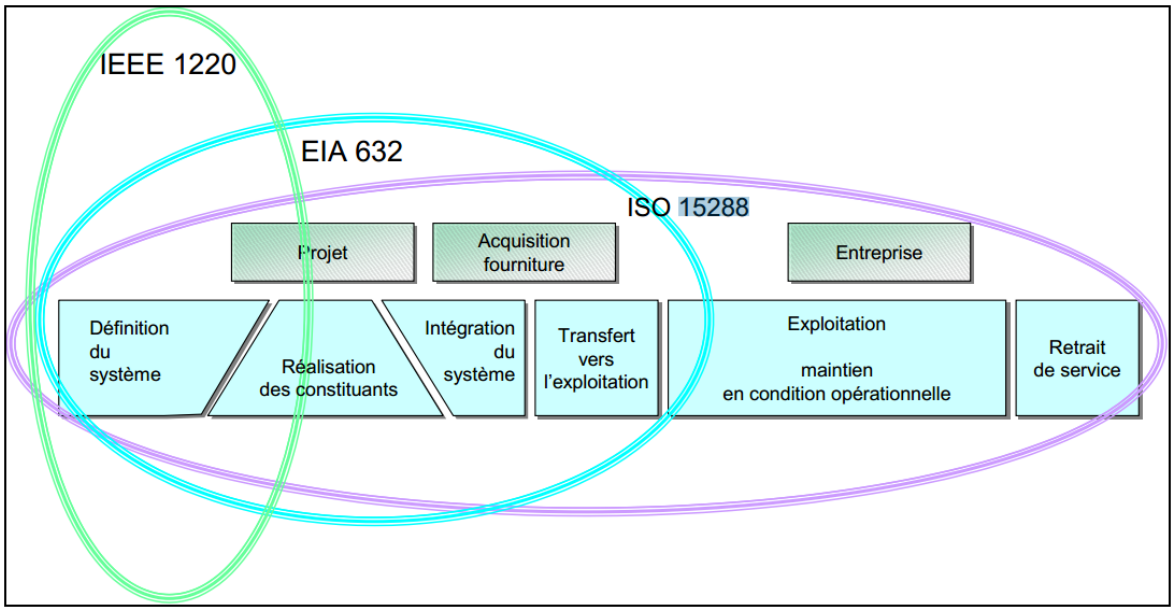


FIGURE 1.8 – Couverture des normes au cours du cycle de vie du projet [5]

La norme ISO 15288 est un standard très général. Elle possède la couverture la plus étendue du cycle de vie d'un système. Ses processus portent sur les phases de conceptualisation, de développement, de production, d'utilisation et de support. La norme EIA 632 ne couvre que les activités de transformation des besoins en solution technique. Enfin, la norme IEEE 1220 ne porte que sur les activités techniques de production des systèmes.

En second lieu, les normes se distinguent par le niveau de précision qu'elles apportent (Figure 1.9). On constate que les normes sont d'autant plus précises qu'elles se concentrent sur un type d'activités. Ainsi, la norme 1220 détaille le plus précisément les activités à mener pour la production du système. La norme ISO 15288 décrit peu précisément sur les activités de ses processus. La norme EIA 632 se situe quant à elle entre les deux niveaux de détails.

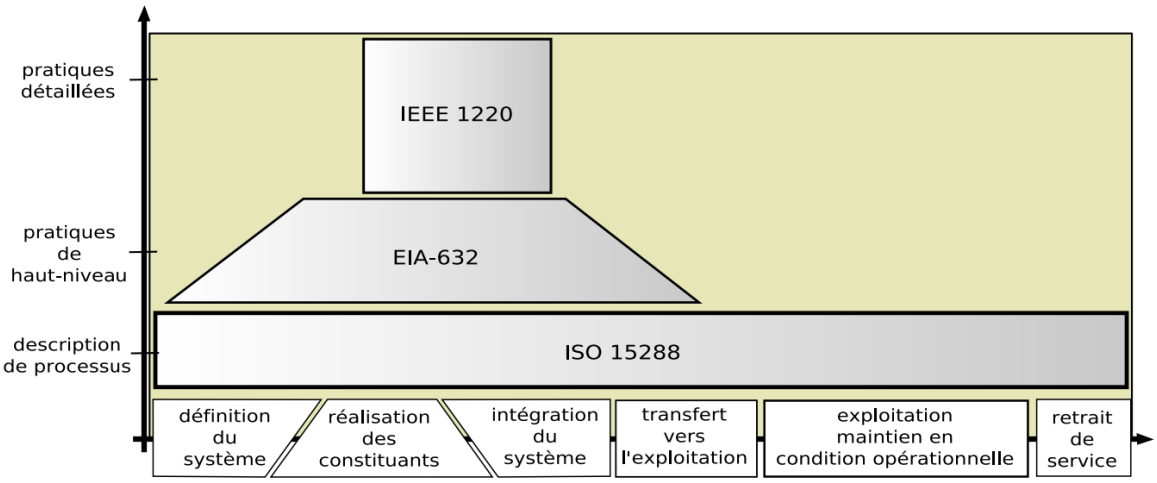


FIGURE 1.9 – Niveaux de détails des normes [35, 96]

Selon ses besoins et ses ressources, les parties prenantes peuvent adopter une ou plusieurs des normes, celles-ci étant complémentaires. Par exemple, la norme IEEE 1220 décrit les activités de spécification des exigences et du développement des architectures fonctionnelles et physiques alors que la norme ISO 15288 présente succinctement cette phase du cycle de vie du système.

1.2.5 Liens entre les normes et le cycle de vie d'un système

Les liens existants entre les modèles de cycle de vie et les processus des normes d'ingénierie système sont présentés dans ce chapitre au travers de la « boucle d'ingénierie » (Figure 1.10).

La boucle d'ingénierie synthétise l'enchaînement logique des processus techniques définis par les normes. Elle s'intègre dans le cycle de vie en spirale. Elle est constituée des processus « Définition des exigences et de « Conception ». Les processus de « Vérification / Validation » et de « Évaluation / Comparaison » garantissent le fait que les éléments du système répondent effectivement bien aux attentes des parties prenantes du système.

Le choix d'un développement itératif repose sur le fait que la définition du problème et de la solution n'est généralement pas complète au début de la vie du projet, les éléments se découvrant au fur et à mesure de l'avancement du

projet. Les processus de vérification, de validation et d'évaluation permettent d'assurer l'adéquation aux les attentes des parties prenantes, permettant ainsi une meilleure maîtrise des risques.

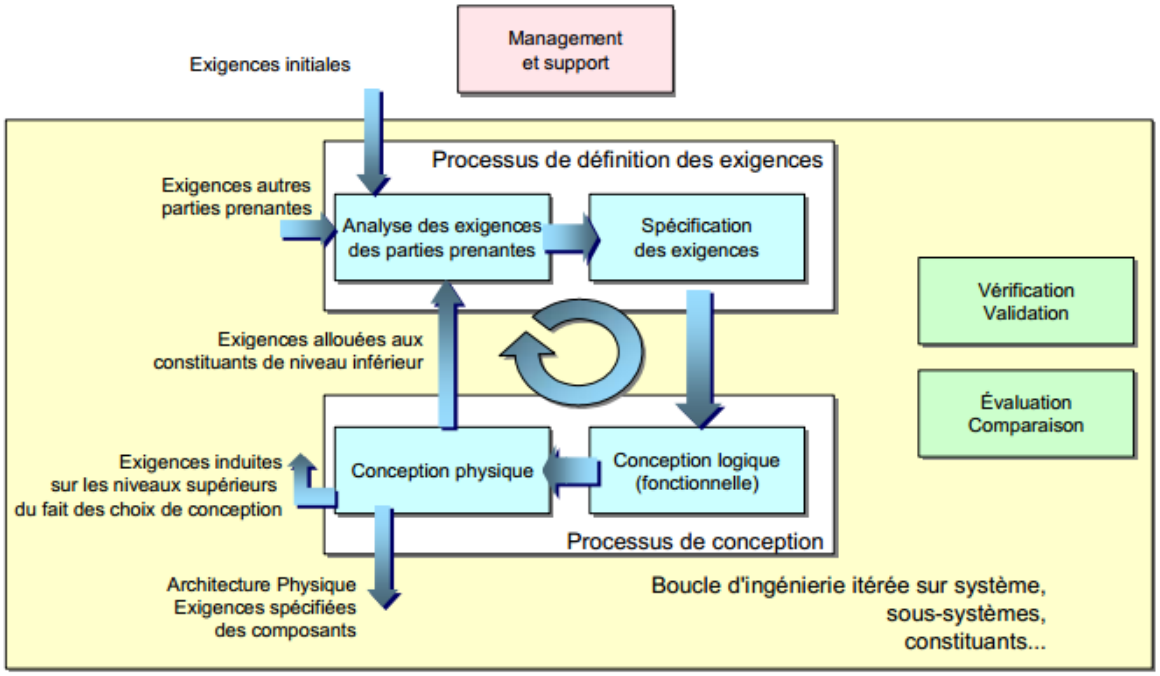


FIGURE 1.10 – La boucle d'ingénierie [5]

Processus de définition des exigences

Le processus de définition des exigences est réalisé en deux temps consécutifs. Premièrement, le sous-processus « *Analyse des exigences des parties prenantes* » de la boucle d'ingénierie permet de recueillir et d'étudier les attentes et les contraintes des parties prenantes utilisatrices, le résultat constituant le cahier des charges. Dans un second temps, le sous-processus « *Spécification des exigences* » formalise les besoins en précisant les contraintes des parties prenantes réalisatrices. Le résultat est consigné dans le référentiel d'exigences qui prescrit le problème à résoudre pour les concepteurs.

Le processus de définition des exigences est une étape cruciale dans la réussite d'un projet. Son succès dépend de la qualité de la réponse apportée face aux attentes et aux contraintes des parties prenantes. Le produit du processus vise à définir :

- ce que le système doit être en capacité d'accomplir dans son environnement
- les parties prenantes utilisatrices et réalisatrices
- les indicateurs de mesure permettant de piloter l'analyse des exigences
- les contraintes imposées par l'entreprise et le projet lui-même
- les contraintes externes (législation, norme, sécurité etc.)
- les scénarios opérationnels
- les caractéristiques physiques du système

Analyse des exigences des parties prenantes Le sous-processus « Analyse des exigences des parties prenantes » nécessite de recueillir les informations auprès des parties prenantes du système.

La décision du développement d'un système naît d'une insatisfaction exprimée par un individu ou une organisation. Le système répond donc à une finalité. Celle-ci est généralement pérenne ; elle varie peu durant la vie du système. La finalité est par la suite décomposée en concepts opérationnels qui décrivent ce que le système doit être en capacité d'accomplir.

Les scénarios opérationnels décrivent les interactions entre un système, ses composants et ses utilisateurs [57]. En les contextualisant dans une situation particulière, ils constituent des instances des cas d'utilisation du système. Un ou plusieurs scénarios opérationnels peuvent ainsi décrire différents comportements du système pour un même cas d'utilisation. Les scénarios opérationnels sont utilisés pour identifier les échanges opérés pour décrire le comportement dynamique du système.

Spécification des exigences Le sous-processus de spécification d'exigences formalise le problème exprimé par les parties prenantes utilisatrices. Chaque exigence initiale fait l'objet d'une définition soumise à des critères de qualité et elles doivent d'être aptes à être mesurées, vérifiées et validées [53]. La spécification des exigences intègre également les contraintes issues des parties prenantes conceptrices, comme par exemple les contraintes législatives, environnementales, de qualité etc.

Sur le plan unitaire, les exigences doivent respecter les critères suivants :
- **Nécessaire** : à quel besoin répond l'exigence ?
- **Indépendant des solutions** : traite le « *quoi* », non le « *comment* »
- **Non-ambiguë** : une seule interprétation possible de l'exigence
- **Complète** : l'exigence doit fournir suffisamment de caractéristiques
- **Unicité** : l'exigence ne traite que d'un sujet
- **Faisable** : l'exigence doit être techniquement réalisable en accord avec les ressources disponibles
- **Vérifiable** : le succès d'une exigence doit être mesurable
- **Conforme** : l'exigence doit être conforme avec la législation

Sur un plan global, les exigences doivent respecter les critères de qualité suivants :
- **Complétude** : l'ensemble des besoins est pris en compte
- **Cohérence** : les exigences ne sont pas contradictoires entre elles
- **Faisable** : l'ensemble des exigences sont réalisables
- **Délimité** : les exigences doivent être incluses dans le périmètre du problème

Des indicateurs doivent être définis et surveillés pour mesurer la bonne progression du projet. Les différentes normes recommandent d'utiliser des critères de mesure d'efficacité, de mesure de performance et de mesure de performance technique. Ces critères doivent porter sur les activités de l'analyse du domaine pour assurer une intégration adéquate de la méthode.

Le produit de cette activité est le référentiel d'exigences qui guidera les processus suivants de l'ingénierie système.

Validation des exigences La boucle d'ingénierie s'appuie sur les processus de validation qui s'appliquent au référentiel des exigences. Il a pour objectif d'identifier les divergences et les absences entre le référentiel d'exigences et les attentes des parties prenantes, les exigences d'entreprise/projet et les contraintes externes. Le cycle *analyse*/*validation* des exigences est réitéré tant que des lacunes perdurent. Une fois la validation satisfaite, le référentiel d'exigences constitue le document de travail pour l'analyse fonctionnelle.

Processus de conception

Une fois les exigences validées, les ingénieurs système doivent concevoir le système qui répondra à ces exigences. La conception d'un système s'effectue aux niveaux de l'architecture fonctionnelle et de l'architecture physique, respectivement définis par les sous-processus de « Conception logique » et de « Conception physique ».

Conception logique (fonctionnelle) La boucle d'ingénierie utilise le processus d'analyse fonctionnelle dont les objectifs sont doubles. Tout d'abord, clarifier le problème défini par l'analyse des exigences et décomposer les fonctions du système en fonctions de plus bas niveau qui seront satisfaites par des éléments du système (sous-systèmes, composants, etc.).

Ces objectifs sont atteints par la traduction du référentiel d'exigences en une architecture fonctionnelle. Cette architecture fonctionnelle décrit les arrangements et les ordonnancements temporels des sous-fonctions résultant de la décomposition fonctionnelle. Le processus de conception logique étudie l'architecture fonctionnelle selon trois points de vue : la décomposition fonctionnelle, la représentation sous la forme de flux et la représentation comportementale dynamique [5].

Tout d'abord, l'analyse du domaine aide les ingénieurs à modéliser les différentes catégories de fonction [110]. Les « fonctions principales de service » représentent les services du système attendus par l'utilisateur. Les « fonctions complémentaires de service » complètent et améliorent les fonctions principales. Les « fonctions contraintes » limitent l'espace de solutions de conception en imposant des contraintes au système (contraintes environnementales, technologiques, législatives etc.). Enfin, les « fonctions techniques » répondent aux be-

soins de conception. Elles représentent des fonctions de support pour les fonctions principales de service.

Conception physique La conception physique repose sur la décomposition des constituants physiques en sous-systèmes qui interagissent entre eux. L'architecture physique est alors un agencement de constituants physiques interfacés entre eux qui définit une solution pour la satisfaction de l'architecture fonctionnelle et au référentiel d'exigences [5]. Au cours de la décomposition, les fonctions sont allouées aux constituants physiques qui répondent, par transitivité, aux exigences système.

La boucle d'ingénierie illustre les liens qui existent entre le modèle en spirale du cycle du vie d'un système et les processus techniques définis par les normes d'ingénierie système. Ils guident de manière itérative les ingénieurs système pour concevoir des systèmes qui répondent aux besoins des parties prenantes utilisatrices.

1.3 L'ingénierie guidée par les modèles – MBSE

Les normes de l'ingénierie système prescrivent les processus à mener pour le développement et le pilotage d'un système. Elles se concentrent principalement sur le *quoi ?* et peu sur le *comment ?*. La réponse à cette dernière interrogation est destinée aux méthodes d'ingénierie système. Autrement dit, les processus des normes sont réalisés par les méthodes.

L'Ingénierie Guidée par les Modèles (IDM), ou *Model-Based System Engineering* (MBSE) [1], se réfère à l'utilisation systématique de modèles comme supports méthodologiques de conception pour l'ensemble du cycle de vie [11]. Le concepteur « *construit et utilise le modèle à tous les moments de son plan d'action, que ce soit pour prescrire l'objet à venir, en préciser l'environnement, en décrire l'architecture, en simuler le comportement, le dimensionner* » [16]. Les modèles sont utilisés comme « objet intermédiaire » de conception [69], comme un outil de communication avec des tiers dont ils se servent pour justifier et valider les choix de conception selon leurs intérêts et leurs contraintes.

L'INCOSE définit les méthodologies MBSE comme « *l'application formelle de modélisation pour supporter les activités d'analyse des besoins, de conception, de vérification et de validation, de la phase préliminaire de conception et pour l'ensemble des phases du cycle de vie du système* »[53]. L'association qualifie les méthodologies MBSE comme l'approche qui jouera un rôle croissant dans les pratiques de l'ingénierie système [52].

1. Cette dénomination sera utilisée par la suite

Il existe aujourd'hui une multitude de méthodes MBSE : *Arcadia* (Thalès), *Core* (Vitech), *Harmony*, *OOSEM*, *Harmony-SE* (IBM), *INCOSE Object-Oriented Systems Engineering Method* etc. Ces méthodes se différencient par le cycle de vie auxquels elles se conforment, les processus adoptés et le formalisme utilisé [35].

Un des objectifs des méthodologies MBSE est de substituer à une approche « centrée document » une approche « centrée modèle ». La première approche tend à produire une importante quantité d'artéfacts de natures différentes potentiellement utilisés de manière inconsistante. Cette situation entraîne alors une détérioration du contrôle des versions et une augmentation des incohérences entre les documents, ayant comme conséquence un accroissement important des coûts du projet. De plus, l'utilisation du langage naturel pour la rédaction des documents amène fréquemment des ambiguïtés pour leur compréhension.

Les méthodologies MBSE sont employées en remplacement des documents par des modèles car elles proposent de nombreux avantages [11, 52, 86] :
- Maîtrise de la complexité de l'architecture d'un système
- Amélioration de la communication et de la visibilité de l'information entre les parties prenantes
- Meilleure traçabilité des données pour une meilleure cohérence
- Mise en œuvre des mécanismes de *vues* et de transformation de modèles
- Possibilité de réutilisation des modèles
- Réduction des risques lors de la phase de développement
- Meilleure intégration des activités de simulation et de V&V
- Meilleure portabilité

Les méthodes MBSE traitent de l'ensemble des problématiques techniques inhérentes à l'ingénierie système, parmi lesquelles figurent l'analyse des besoins, les architectures logiques et physiques, ou la V&V. Elles couvrent en cela le cycle de vie d'un système.

Par exemple, ARCADIA (ARChitecture Analysis and Design Integrated Approach) est une méthode MBSE développée par Thales depuis 2005 [98]. Son approche est structurée autour des processus d'ingénierie système, établissant une séparation entre les besoins (analyse des besoins opérationnels et systèmes) et les solutions mises en œuvre (architectures logiques et physiques), en accord avec la norme IEEE 1220 [50]. ARCADIA propose une démarche de l'ingénierie système en cinq phases d'analyse modélisées au sein des couches suivantes (Figure 1.11) :

Analyse opérationnelle (*Operational Analysis*)

L'analyse opérationnelle se concentre sur l'identification des besoins, des buts, des missions et des activités des acteurs interagissant avec le système. Elle s'appuie notamment sur la réalisation de scénarios opérationnels. Les processus de

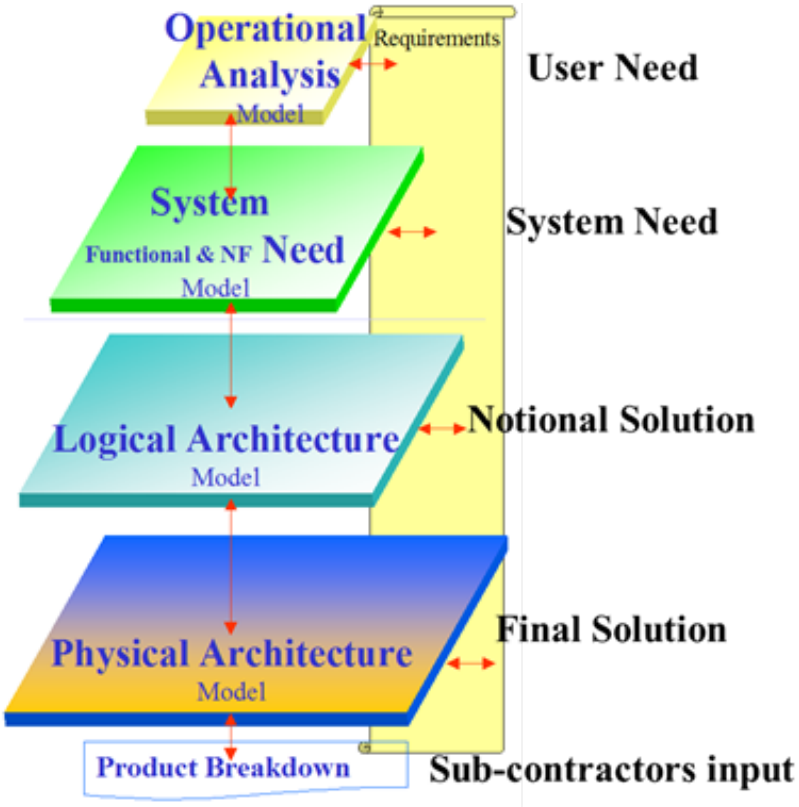


FIGURE 1.11 – Démarche de la méthodologie ARCADIA [98]

V&V doivent être menés pour garantir la bonne couverture des besoins du système.

Analyse système (*System Analysis*)

L'analyse du besoin système est analogue à une analyse fonctionnelle. Elle identifie les fonctions du système nécessaires aux agents pour réaliser leurs tâches. Elle identifie également les contraintes non fonctionnelles du système (sûreté, performances etc.).

Architecture logique (*Logical Architecture Analysis*)

L'architecture logique identifie les composants du système, leur contenu, leurs relations et leurs propriétés. L'ensemble des contraintes non-fonctionnelles (sûreté, performance etc.) sont prises en compte afin d'aider les concepteurs dans leurs choix de l'architecture globale du système, notamment grâce aux mécanismes de *viewpoints*. Dans cette couche, les problématiques de mise en œuvre techniques ne sont pas encore abordées, elles le sont dans la couche suivante.

Architecture physique (*Physical Architecture Analysis*)

L'architecture physique identifie les composants du système et ses relations sous une perspective de mise en œuvre technique. Elle définit ainsi l'architecture

finale du système. Les fonctions du système identifiées dans les couches plus hautes sont allouées aux dispositifs physiques du système.

End-Product Breakdown Structure (EPBS) Cette couche déduit les conditions que devront remplir les composants pour satisfaire aux contraintes et choix de conception de l'architecture.

La méthode ARCADIA repose sur un cycle de vie itératif. Le modèle du système évolue tout au long de son développement. Les premières itérations modèlent un système à un faible niveau de détail et de fidélité. Il est alors utilisé pour valider les attentes du système. Au fur et à mesure des itérations, le système gagne en maturité suite aux choix de conception et d'évaluation jusqu'à sa validation finale.

1.4 Formalisme SysML

Pour les raisons comparables aux normes et aux méthodes, les ingénieurs système ont éprouvé le besoin de disposer de langages de modélisation formalisés et unifiés au sein de la discipline. Ils répondent aux besoins d'expression et de partage d'informations sans incompréhensions et de pouvoir les vérifier de manière formelle. Aujourd'hui, l'ingénierie système compte une multitude de formalismes (SysML, le Functional Flow Block Diagram (FFBD), les diagrammes IDEF0 etc.) qui se différencient par leur pouvoir d'expression, de précision et par leur syntaxe et sémantique. SysML constitue actuellement le formalisme de référence pour la représentation des caractéristiques de systèmes. Il s'agit en effet du langage qui permet de modéliser les exigences, les architectures fonctionnelles et physiques et les comportements dynamiques du système au sein d'un modèle général unique.

L'élaboration de SysML a été initiée au début des années 2000 par un consortium d'industriels sous l'égide du *Object Management Group* (OMG) [80]. Ce langage trouve ses origines dans le langage UML (*Unified Modeling Language*) qui ne proposait pas tous les moyens d'expression nécessaires pour modéliser tous les aspects spécifiques de systèmes.

Le langage SysML est structuré autour de trois catégories de diagrammes qui permettent de modéliser les exigences, les aspects structurels et comportementaux et les relations paramétriques (Figure 1.12).

Les diagrammes d'exigences (*Requirement Diagram*)

Les diagrammes d'exigences représentent graphiquement les exigences du système. Ils permettent ainsi d'améliorer la visualisation des exigences. Ils expriment également les relations existantes entre les exigences et les autres éléments du modèle grâce aux mécanismes d'allocation. Ainsi, il est possible de na-

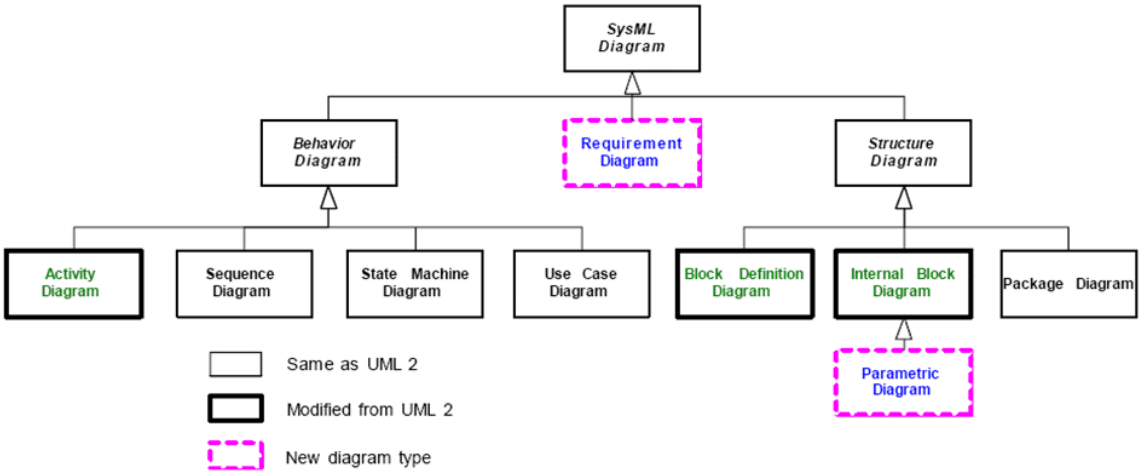


FIGURE 1.12 – Diagrammes SysML

viguer dans le modèle pour tracer la réalisation d'une exigence par des éléments du modèle.

Les diagrammes structurels (*Structure Diagram*)

Les diagrammes structurels sont utilisés pour représenter l'architecture du système en décrivant les éléments statiques (composants physiques, fonctionnels et données échangées). L'élément structurel élémentaire est un *bloc* en SysML. Un bloc décrit le système selon différents niveaux de granularité : système, sous-système, fonction, processus etc. Le diagramme *Block Definition Diagrams* (BDD) décrit la structure hiérarchique et les flux de données d'un bloc sous une forme *boîte noire*. Le diagramme *Internal Block Diagrams* décrit la structure et les flux de données internes d'un bloc (vision *boîte blanche*).

Les diagrammes comportementaux (*Behaviour Diagram*)

Les diagrammes comportementaux décrivent le comportement dynamique des fonctions, les composants, les interactions et les processus du système. Les *diagrammes de cas d'utilisation* identifient les fonctionnalités attendues du système et les acteurs les réalisant. Les *diagrammes d'activité* décrivent les flux de données entre les activités du système. Les *diagrammes de séquence* décrivent les interactions entre les constituants du système et les acteurs.

Le formalisme SysML offre trois qualités pour garantir une approche systémique [16] :

- *Cohérence entre les vues* : Tous les éléments du modèles (objets, relations et données) sont définis de manière unique et utilisable dans l'ensemble des diagrammes du modèle.
- *Généricité* : Le langage adopte une approche liée à la démarche orientée-objet, notamment les liens d'héritage et de généricité. Il est donc possible

de réutiliser des modèles d'un système à un autre, dans une optique de capitalisation des connaissances d'un domaine.
– *Interface analytique* : Les modèles exprimés peuvent être interfacés avec des outils de simulation, en particulier les modèles analytiques. Les simulations permettent d'étudier le comportement du système selon des perspectives différentes, permettant de justifier les choix de conception selon cette perspective. La simulation facilite et améliore les processus de V&V.

1.5 Des lacunes dans la prise en considération des aspects humains

L'ingénierie système est responsable de la mise en œuvre de systèmes répondant à un ensemble de besoins. Elle s'est dotée pour cela de normes, de méthodologies et de formalismes qui encadrent et expriment les caractéristiques des systèmes (Figure 1.13).

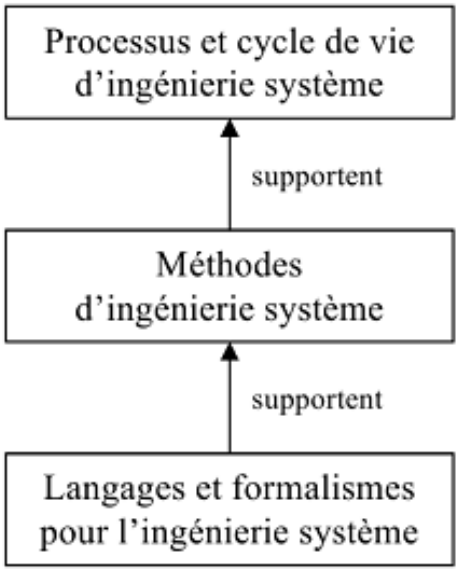


FIGURE 1.13 – Liens entre processus, méthodes et formalismes [112]

La réalisation d'un système implique une multitude de parties prenantes issues de disciplines variées, et dont les intérêts peuvent potentiellement diverger. L'ingénierie système compose avec cette problématique en permettant à ces différents points de vue de s'exprimer afin de sélectionner les compromis les plus satisfaisants.

La conception d'un système est une démarche holistique, qui considère l'ensemble des éléments physiques, humains et organisationnels qui composent un système. Il est par conséquent nécessaire de maîtriser ces trois composants pour assurer un niveau de qualité, de performance et de sûreté optimum. Un système

sociotechnique est influencé par plusieurs facteurs [4] comme par exemple les performances logicielles et matérielles, les compétences et limitations de l'opérateur humain, les conditions et les contraintes de l'environnement du système.

La prise en compte de l'aspect humain dans les systèmes est depuis plusieurs années actée dans les normes de l'ingénierie système. Ainsi, la norme IEEE 1220 formule l'idée que « *la conception d'un produit et les processus de cycle de vie doivent considérer l'homme comme un élément du système dans le but de comprendre les problématiques de l'intégration homme-système et d'assurer le fait que le système conçu soit productible, maintenable et utilisable* ». La norme ISO 15288 établit la nécessité de porter simultanément les compromis de conception sur les composants système et humain, ce dernier étant considéré désormais comme un agent du système, et non plus comme une entité externe au système.

Pourtant, la littérature est importante sur les lacunes de l'ingénierie système dans l'intégration des considérations humaines dans la conception des systèmes.

Tout d'abord, plusieurs travaux [85, 43, 100, 109] montrent que l'ingénierie système ne propose pas suffisamment de méthodes ni d'outils pour intégrer qualitativement et quantitativement les aspects humains, notamment dans les processus initiaux de l'ingénierie système. En effet, peu de méthodes spécifiques existent pour intégrer les caractéristiques propres à l'élément *humain* du système, par exemple ses capacités, ses limitations, les contraintes, les tâches etc. Ce constat est analogue concernant les formalismes, notamment le SysML qui reste limité dans l'expression des caractéristiques humaines.

Ensuite, des études [77, 66] abondent dans le même sens en considérant que les pratiques actuelles de l'ingénierie système n'adressent ces problématiques qu'une fois les choix majeurs de conception et d'architecture déjà pris. De ce fait, la prise en compte des facteurs humains n'est seulement dévolue qu'à l'évaluation du système développé, les préconisations issues des résultats tardifs de ces évaluations deviennent alors coûteuses à mettre en œuvre [44].

En s'appuyant sur les rapports de l'agence U.S. Government Accountability Office (GAO) [79], ils montrent que le dépassement des coûts (environ 40%) et des délais (environ 20%) constatés trouvent leurs origines dans l'échec à concevoir le système en accord avec les capacités et les limitations des opérateurs. Le rapport « CHAOS 2014 » de Standish Group montre que les deux premières causes d'échecs de projet sont liées au recueil incomplet des exigences (13,1%) et à un défaut d'implication des utilisateurs dans le projet (12,4%) [46].

La Figure 1.14 montre l'impact financier d'une erreur selon la progression dans le temps du projet [53]. Ainsi, à la fin de la phase *Concept*, la correction d'une défaillance augmente d'un facteur de 3 à 6 fois le coût du projet, tandis

qu'il augmente de 20 à 100 fois à la fin du développement du projet. Il apparaît qu'une défaillance dans la prise en compte des aspects humains dans le système amène, d'une part, des failles dans la sûreté et dans la performance et d'autre part une augmentation des coûts dans la vie du système. La prise en considération des aspects humains doit donc être réalisée au plus tôt dans le cycle de vie du système.

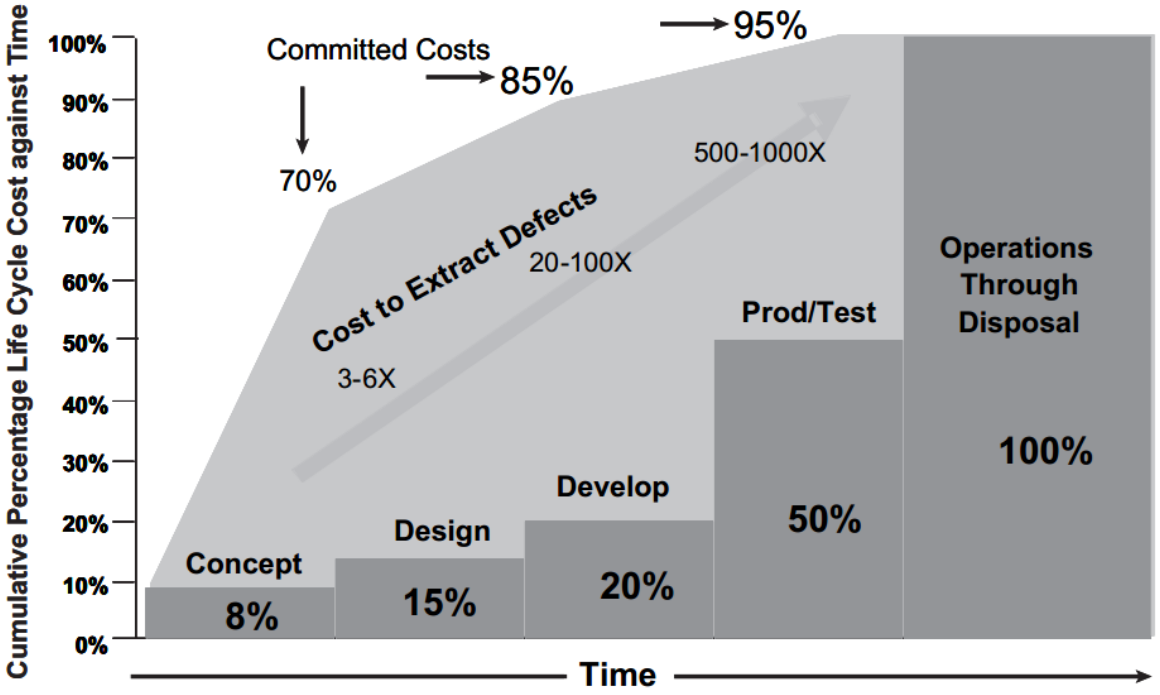


FIGURE 1.14 – Coût du cycle de vie à travers le temps [53]

Enfin, des auteurs [73, 83] mettent en lumière les difficultés à faire collaborer les ingénieurs système et les praticiens des facteurs humains dans un cadre commun de travail. Cette situation est causée en partie par les divergences culturelles, méthodologiques et sémantiques. En conséquence, il est fréquent qu'une des deux disciplines prenne l'ascendant lors de la prise de décisions des choix de conception.

Face à ce constat, l'approche *Human-System Integration* a été proposée pour pallier les difficultés rencontrées par l'ingénierie système à intégrer les aspects humains dans les activités de conception de systèmes. Nous verrons dans le chapitre suivant les moyens employés pour répondre à ces problématiques.

Chapitre 2

L'Intégration Homme-Système (HSI)

En réponse aux défis posés à l'ingénierie système pour intégrer les aspects humains, et face à l'accroissement de la taille et de la complexité des systèmes sociotechniques, l'initiative *Human-System Integration* (HSI) a été proposée.

L'INCOSE définit la démarche HSI comme étant « les processus techniques et de gestion pour l'intégration des considérations au sein et au long de l'ensemble des éléments du système » [53]. Booher et al. la définissent comme « l'approche multidisciplinaire pour intégrer les aspects humains, techniques, et organisationnels au niveau du système, en prenant pleinement en considération les besoins humains » [18].

L'approche HSI s'articule sur la compréhension des capacités, des limitations humaines et des répercutions sur la conception d'un système [18]. Elle propose une stratégie globale, c'est-à-dire qu'elle s'intéresse aux aspects organisationnels, techniques et humains [41].

Les objectifs du HSI sont de plusieurs ordres [27, 85, 41] :
- Améliorer la conception du système afin optimiser la collaboration homme-système en milieu opérationnel, pour des systèmes sociotechniques plus performants et plus sûrs.
- Garantir la conformité du système aux capacités et aux limitations des agents.
- Garantir la sûreté du système et respecter les normes de santé des agents.
- Améliorer la maîtrise du cycle de vie du système. En effet, une fiabilité accrue des choix de conception vis-à-vis des caractéristiques humaines réduit les risques dans la mise en œuvre de corrections, très coûteuses, car le système se révèle inadapté.

L'adoption d'une approche HSI a le potentiel de réduire le coût global de la conception et de l'exploitation du système [41]. Comme expliqué en conclusion du chapitre précédent, la propagation d'une erreur dans l'effort de conception d'un

système amène une augmentation du coût du projet. L'adoption d'une démarche HSI permet d'identifier et d'éliminer une partie des erreurs de conception, avant qu'elles ne se propagent et deviennent difficilement maîtrisable en termes de coûts financiers, temporels et opérationnels.

De ce fait, les efforts de conception préliminaires doivent porter sur l'analyse des trois éléments constitutifs d'un système sociotechnique. Ils ne doivent donc pas être seulement réalisés sur chaque composant individuellement, mais porter également sur leurs interactions. L'approche HSI est généralement menée sur des projets critiques de grandes envergures (nucléaire, militaire, santé etc.). Ces systèmes critiques nécessitent un haut niveau de confiance dans les performances et la sûreté car les conséquences de défaillances peuvent être désastreuses.

Hobbs et al. [48] ont établi trois principes fondamentaux pour concevoir un système robuste (absence de pannes) et fiable (tolérance aux évènements non prévus).

Compatibilité Les fonctions du système doivent être compatibles avec les capacités et les caractéristiques humaines. Les tâches déléguées à l'opérateur doivent pouvoir être réalisées de manière fiable, autant dans un contexte nominal que dégradé. Afin d'assurer les niveaux de performance et de sûreté, les tâches doivent être en adéquation avec les capacités mentales et physiques de l'opérateur. La discipline des facteurs humains propose un ensemble de standards et de bonnes pratiques pour la conception et l'évaluation de la compatibilité entre les tâches demandées et les caractéristiques humaines [2].

Tolérance Comme le montre la littérature, l'erreur humaine demeure inévitable [95]. Un système sociotechnique doit garantir une tolérance à ces erreurs humaines. Un système robuste et fiable doit être capable de détecter, voire d'anticiper, et de proposer des mécanismes de recouvrement.

Coopération Généralement, l'industrie considère l'homme comme un facteur limitant dans un système car il est décrit comme étant responsable des erreurs rencontrées par le système [66]. Cette situation se traduit par la mise en place de procédures de travail contraignantes. Pourtant, les capacités d'adaptation, de réflexion et de créativités propres à l'homme constituent un levier d'amélioration de la performance et de la sûreté d'un système dynamique. Ainsi, une coopération entre l'homme et le système peut améliorer la fiabilité et la robustesse d'un système sociotechnique.

2.1 Les domaines du HSI

Neuf domaines dans lesquels la composante humaine doit être considérée ont été identifiés [18] :

Facteurs Humains La discipline des facteurs humains étudie les caractéristiques humaines dans l'environnement de travail des agents. Elle cherche à améliorer l'utilisabilité des systèmes face aux capacités et aux limitations humaines. L'analyse des facteurs humains porte sur plusieurs domaines :

- Cognitif : charge cognitive, temps de réponse, autonomie, etc.
- Physique : ergonomie de l'environnement de travail, anthropologie, etc.
- Sensoriel : perception tactile, auditive, oculaire, etc.
- Dynamique d'équipe : communication et délégation, partage de tâches, gestion d'équipe, etc.

Sûreté Le domaine de la sûreté évalue le système dans le but de prévenir des défaillances portant atteinte au système. Elle intervient par conséquent dans l'étude des erreurs humaines, matérielles, environnementales et organisationnelles.

Santé Le domaine de la santé évalue les caractéristiques et les procédures du système pouvant potentiellement porter un préjudice lié à la santé des agents du système : nuisances sonores importantes, températures inadéquates, dangers chimiques ou explosifs etc.

Environnement Le domaine *environnement* évalue le milieu dans lequel le système évolue. Une réflexion est faite pour protéger le système sociotechnique contre les perturbations éventuelles de l'environnement.

Entraînement L'entraînement permet de former les agents aux tâches du système à réaliser pour remplir ses objectifs. Le développement des programmes et des méthodes d'entraînement représente une part importante dans le processus global de conception d'un système. En effet, il est important de prévoir les besoins en termes d'expertise et d'aptitude pour l'obtention de niveaux de performances optimum. A noter que l'entraînement s'intéresse aux tâches individuelles et collectives.

Personnel Le domaine *Personnel* se concentre sur les besoins en termes d'aptitudes, de compétences et d'expériences des agents opérant avec le système.

Main-d'œuvre La main-d'œuvre se réfère au nombre et au type de personnels intervenant directement avec le système : opérateurs, mainteneurs, formateurs etc. Les décisions prises sur cette problématique impactent directement les exigences et les fonctionnalités du système, sur la sélection et la formation de la main-d'œuvre [85].

Survivabilité Le domaine de la survivabilité étudie les phénomènes pouvant mettre en péril les agents, comme lors d'attaques militaires. Le but est de maximiser les chances de survie des opérateurs. Ce domaine ne s'applique généralement que dans un contexte militaire.

Habitabilité Le domaine de l'habitabilité évalue les dispositifs permettant d'assurer le confort des agents dans leur environnement de travail. Le but est d'améliorer l'efficacité des agents dans leurs tâches.

Bien que distincts, les domaines du HSI ne sont pas indépendants, ils présentent des interactions. Par exemple, plus une personne est qualifiée (domaine *Personnel*), moins elle nécessitera de formation (domaine *Entraînement*). Cependant, il est généralement plus difficile de recruter des personnes qualifiées (domaine *Main-d'œuvre*). L'étude des domaines du HSI doit être traitée comme un espace de compromis lors de la conception du système afin de répondre au mieux aux exigences techniques, humaines et environnementales.

2.2 Une vision par processus de l'approche HSI

L'approche HSI promeut une intégration des aspects humains et organisationnels dans les activités de l'ingénierie système. Booher et al. [18] proposent un processus global de la démarche (Figure 2.1)

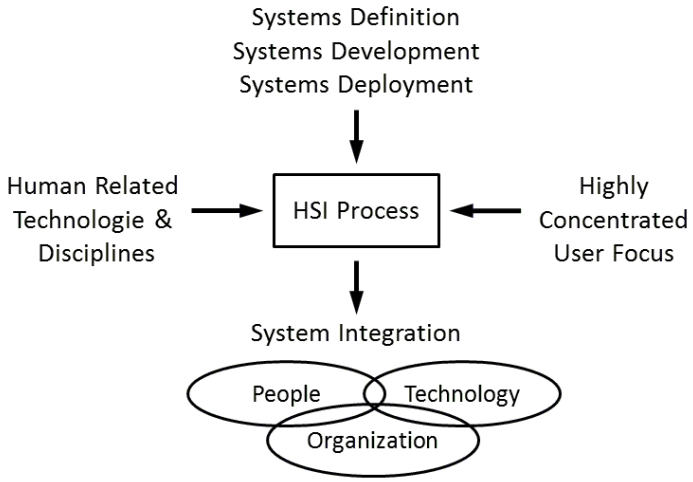


FIGURE 2.1 – Processus global du HSI [18]

Il montre qu'elle se positionne dans les activités de l'ingénierie système (*Systems definition, systems development and systems deployment*). Elle se concentre sur les besoins utilisateur (*highly concentrated user focus*) et exploite les disciplines fondées sur l'étude des caractéristiques humaines (*human related technologies & disciplines*). Le système produit intègre les composants techniques (*technology*), humains (*people*) et organisationnels (*Organization*).

D'autre part, O'Neil et al. [81] ont présenté un modèle d'activité pour guider la démarche HSI (Figure 2.2). Ce modèle conceptualise la construction progressive du système grâce à l'intégration des efforts techniques et humains. D'un point de vue technique, le système fournit les moyens pour réaliser ses objectifs dans un environnement contraint (*Affordances & Constraints*). Du point de vue humain,

l'effort est porté sur l'analyse des capacités et des limitations humaines dans le système. Ce modèle propose d'intégrer les aspects techniques et humains pour satisfaire les critères de mesure définis (*Proposed HSI Metric*) et ainsi atteindre les objectifs de performance.

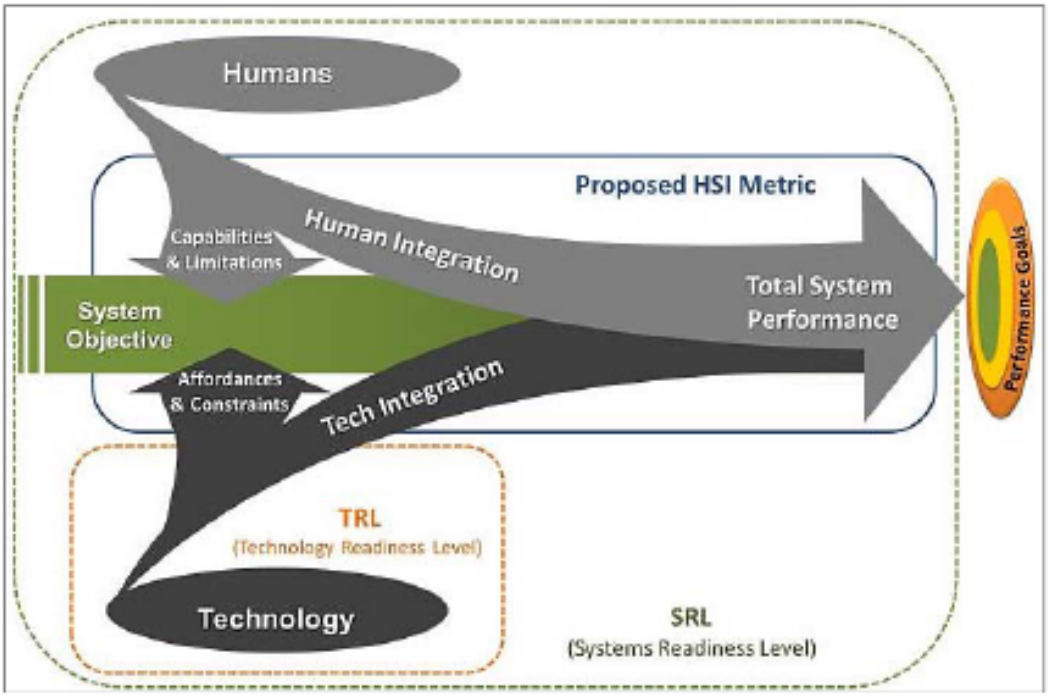


FIGURE 2.2 – Modèle d'activité HSI [81]

Arnold et al. [9] ont proposé le modèle *Homme-Système* (Figure 2.3). Ce modèle, structuré autour de quatre vues, propose un ensemble de processus à mener pour assurer l'intégration des aspects humains dans le cycle de vie du système. Il complète les processus de la norme ISO/IEC/IEEE 15288 [3], et s'appuie sur la méthodologie *Conception Centrée Utilisateur* décrite par la norme 9241-210 [55] (voir Chapitre 2.3 – *La conception centrée utilisateur*).

Facteurs humains dans le cycle de vie Cette vue explicite le fait qu'une démarche HSI doit être employée dans toutes les étapes du cycle de vie d'un système (définies dans la norme ISO 15288 [3]) : conceptualisation, développement, utilisation, support et retrait (Chapitre 1.2.1). La mise en œuvre de ces processus HSI permet de tracer les exigences humaines, et d'anticiper les problématiques d'intégration dans les différentes étapes du cycle de vie du système.

Intégration des facteurs humains L'intégration des facteurs humains dans les processus organisationnels de l'ingénierie système permet de garantir que les facteurs humains sont effectivement pris en compte dans la définition du système. Cette vue définit les processus à mener en termes de capture, de stratégies et de planification. Il s'agit donc de garantir que les questions humaines soient considérées par l'ensemble des parties prenantes.

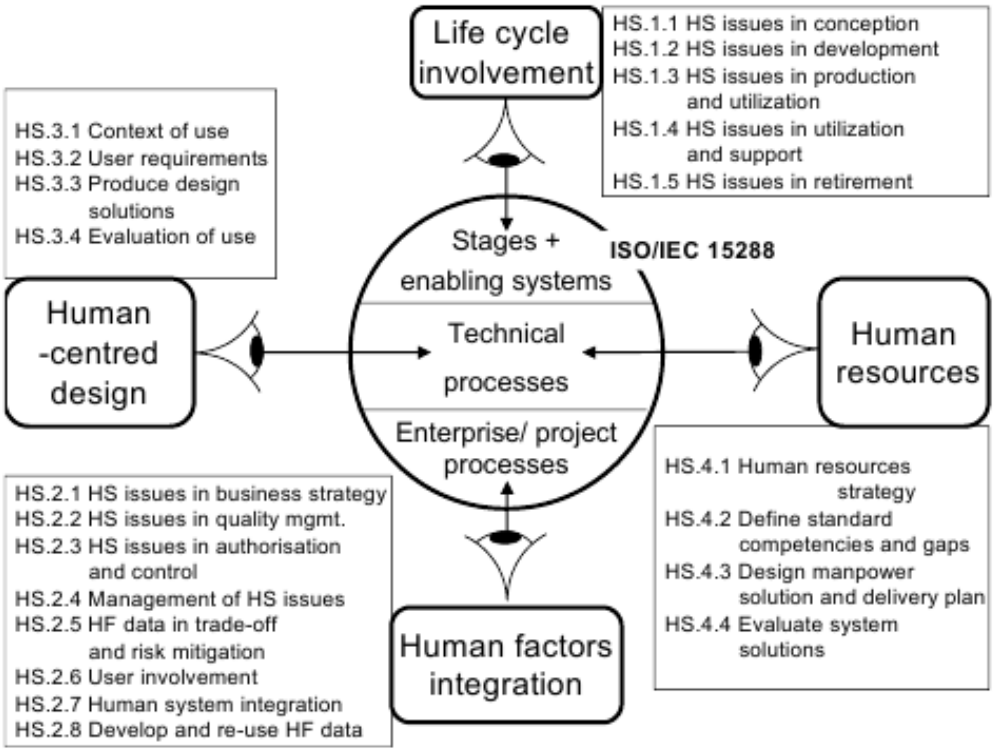


FIGURE 2.3 – Modèle Homme-Système [9]

Conception Centrée Humain La conception centrée humain permet de s'assurer que les caractéristiques humaines soient prises en compte dans les aspects techniques du système. Cette démarche améliore l'adaptation du système à l'opérateur et à son environnement. Elle se concentre notamment sur la définition des besoins humains, de la mise en œuvre d'une interface adaptée (portée par les ingénieurs IHM) et son évaluation.

Ressources humaines Cette vue fournit les moyens de résolution des problématiques liées aux ressources humaines. Elle permet d'identifier les profils et les compétences requis par les concepteurs du système. Ces processus assurent ainsi que le système sera produit par des personnes disposant des ressources de travail adaptées.

2.3 La conception centrée utilisateur

Les processus de conception centrée utilisateur [55] favorisent l'intégration des aspects humains dans les activités de conception de systèmes. Ils sont définis par la norme ISO 9241-210 « Ergonomie de l'interaction homme-système - Partie 210 : Conception centrée sur l'opérateur humain pour les systèmes interactifs » [55].

La conception centrée utilisateur recommande de fonder la conception des systèmes sur la compréhension explicite des opérateurs, de leurs environnements de leurs tâches. Les opérateurs finaux doivent être impliqués dans la conception et le développement des systèmes, d'une part pour recueillir directement les besoins et les données nécessaires, et d'autre part pour évaluer les solutions proposées. Enfin, la conception centrée utilisateur doit s'appliquer itérativement, car comme présenté précédemment (Chapitre 1.1.1 – *Un système possède un cycle de vie*), les besoins d'un système émergent au fur et à mesure de l'avancement du projet.

La norme ISO 9241-210 [55] définit une série de processus pour la conception centrée utilisateur.

P1 Comprendre et spécifier le contexte d'utilisation

P2 Spécifier les exigences de l'utilisateur et d'organisation

P3 Produire des solutions de conception

P4 Évaluer la conception par rapport aux exigences

La conception centrée utilisateur s'appuie sur de nombreuses de méthodes pour chacun de ces processus : entretien, focus group, observation, brainstorming, personas, tri de cartes etc. [63].

Comme le montre Boy [19], la conception centrée utilisateur représente un moyen pertinent pour mener une démarche HSI. Elle intègre pleinement les aspects humains et environnementaux dans les activités de définition et de développement de systèmes. Elle améliore la définition des besoins des opérateurs et leur permet de juger la réponse apportée. De plus, la conception centrée utilisateur s'intègre dans la norme 15288 de l'ingénierie système comme le montre le tableau suivant (Table 2.4).

2.4 Le HSI dans les modèles MBSE

Outre les processus, la démarche HSI doit s'appliquer dans les modèles de systèmes. En ce sens, plusieurs travaux ont défini et étendu les caractéristiques HSI à considérer dans les modèles issus des méthodes MBSE.

Orellana et Madni [83] ont proposé une ontologie explicitant le besoin de disposer d'un point de vue adapté (*HSI3 Profile*) pour exprimer les propriétés HSI dans les modèles du système. Le diagramme suivant (Figure 2.5) présente les constituants de la vue de l'ontologie HSI. Il présente et hiérarchise les facteurs liés à l'humain à exprimer dans les modèles MBSE du système.

Processus UCD 9241-210	Processus de cycle de vie du système (ISO 15288:2008)										
	Processus de définition des exigences des parties prenantes	Processus d'analyse des exigences	Processus de conception d'architecture	Processus de mise en œuvre	Processus d'intégration	Processus de vérification	Processus de mise à disposition	Processus de validation	Processus opérationnel	Processus d'entretien	Processus de mise au rebut
P1. Comprendre et spécifier le contexte d'utilisation	X	X						X	X		X
P2. Spécifier les exigences de l'utilisateur et de l'organisation	X	X						X	X	X	X
P3. Produire des solutions de conception	X	X	X	X							
P4. Evaluer la conception par rapport aux exigences	X	X				X		X	X		

FIGURE 2.4 – Liens entre l'ingénierie système et l'UCD

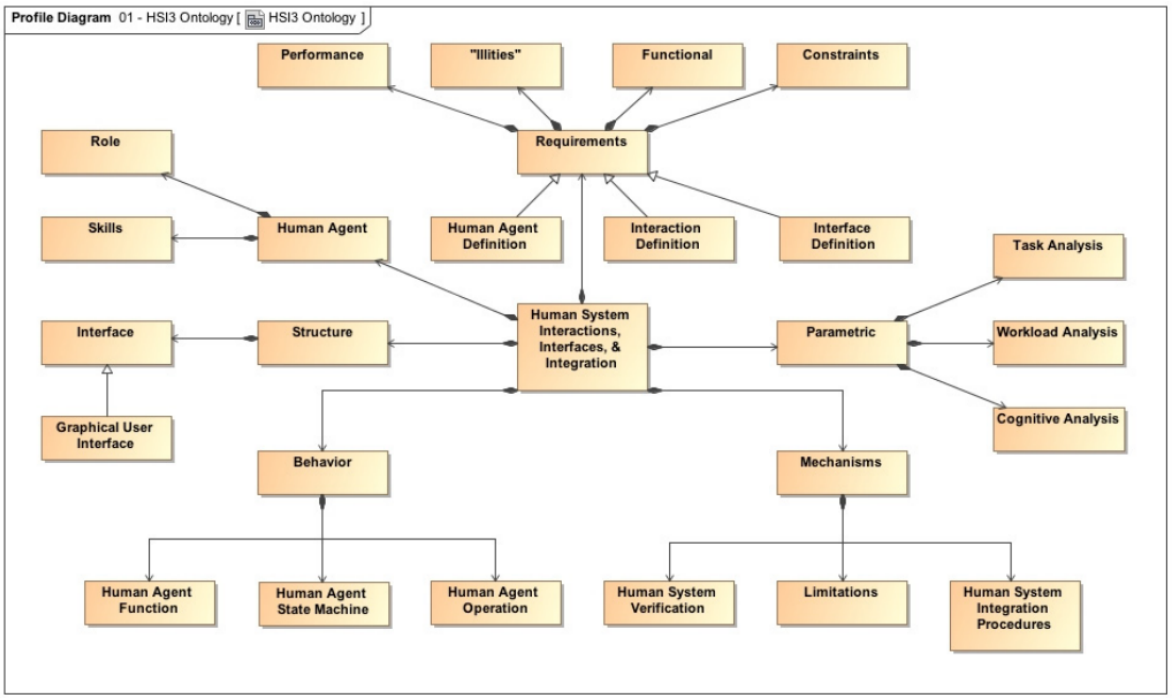


FIGURE 2.5 – Ontologie HSI [83]

Exigences L'ontologie HSI explicite le fait que les exigences système, outre leurs aspects techniques, doivent également intégrer les caractéristiques humaines : performance, fonction, contraintes et les « -ilities »(*reliability*, *availabi-*

lity, *safety* etc.). Les *exigences* sont liées aux autres éléments de la modélisation.

Agent humain La norme ISO/IEC/IEEE 15288 [3] considère le contributeur humain comme un « agent »du système, et non plus comme une entité externe au système. Les travaux des facteurs humains bénéficient à l'approche HSI par leurs capacités à définir les caractéristiques humaines : anthropométrie, cognition, performance, sociale etc. Une multitude d'agents intervient dans le système (opérateur, mainteneur, formateur etc.), il est donc nécessaire de disposer de moyens pour définir le rôle, les compétences et les limitations de ces agents. L'ensemble de ces caractéristiques aide les concepteurs du système à définir des compromis de conception pour analyser le système selon une perspective donnée, telle que la performance ou la sûreté.

Comportement L'analyse comportementale d'un système permet d'identifier les interactions et les tâches réalisées par les agents avec le système. Il est nécessaire d'identifier les fonctions, les opérations et les caractéristiques des activités des opérateurs, elles contribuent à l'architecture du système par l'analyse et l'allocation fonctionnelle, et la production des Interactions Homme-Machine (IHM). En termes de HSI, l'analyse comportementale contribue à l'étude d'une majorité des domaines HSI.

Structure L'ontologie HSI fournit les moyens pour étendre la sémantique de modélisation des interfaces Homme-Machine.

Paramétrique La modélisation paramétrique permet d'analyser le modèle du système de manière analytique. Elle constitue notamment un point d'entrée pour les outils de simulation utilisés pour l'évaluation du comportement d'un système. Grâce aux modèles conçus par les facteurs humains, il est possible de s'appuyer sur les modèles paramétriques pour évaluer les caractéristiques humaines, comme la charge cognitive, la fatigue etc. [54]

Mécanismes Au travers du pilier *mécanismes*, l'ontologie HSI exprime les processus, les procédures, les tests et les moyens de vérification nécessaires à l'évaluation HSI.

Dans une idée analogue, Bruseberg [21] a produit un ensemble de *Human Views* qui étendent la structure MBSE de la méthode MoDAF. Elle propose d'inclure les vues suivantes dans le modèle général du système, qui correspondent aux domaines du HSI (Chapitre 2.1 – *Les domaines du HSI*).

- *HV-A Personal Availability* : Définit les besoins et les processus pour assurer la conformité du nombre de personnel et de leurs compétences pour effectuer les tâches
- *HV-B Quality objectives and metrics* : Rassemble les critères et les mesures de performance humaine

- *HV-C Human Interaction Structure* : Capture la structure organisationnelle des opérateurs humains
- *HV-D Organisation* : Définit les propriétés de l'organisation de travail selon les tâches à accomplir
- *HV-E Human Functions and Tasks* : Spécifie les fonctions et les activités humaines en relation avec la définition du système
- *HV-F Roles and Competencies* : Spécifie les besoins en termes de ressources humaines au regard des tâches humaines, des rôles et des compétences du personnel
- *HV-G Dynamic Drivers of Human Behaviour* : Capture les facteurs influençant le comportement humain. Cette vue constitue un lien entre la définition statique de l'architecture et les moyens de simulation

De la même manière, Handley et Smillie [42] ont proposé les *Human Views* pour la méthode NAF.

- *HV-A Concept* : Représentation conceptuelle de haut niveau de la composante humaine dans le système
- *HV-B Constraints* : Définition des caractéristiques
- *HV-C Tasks* : Description des activités humaines dans le système
- *HV-D Roles* : Description des rôles des agents
- *HV-E Human Network* : Identification des moyens de communication interpersonnel
- *HV-F Training* : Description des programmes d'entraînement et de formation des agents
- *HV-G Metrics* : Rassemble les critères et les mesures caractérisant l'agent dans le système
- *HV-G Human Dynamics* : Identification des aspects humains dynamiques influençant les autres vues

Le schéma suivant (Figure 2.6) illustre les liens entre les *Human Views* et les domaines du HSI.

Les *Human Views* identifient et positionnent les aspects humains à considérer dans les méthodes MBSE pour mener une approche HSI. Ces études montrent les éléments à intégrer dans les modèles MBSE du système. Ils ne définissent cependant pas les moyens pour le faire, ni les méthodes à utiliser pour faire émerger ces informations. La conception centrée utilisateur et l'ingénierie cognitive présentées dans les chapitres suivants constituent des démarches pertinentes.

2.5 L'ingénierie cognitive pour l'analyse de l'activité humaine

L'ingénierie cognitive est une discipline qui se positionne à la croisée de la psychologie cognitive, de l'ergonomie et de l'ingénierie système. Une des ambitions de l'ingénierie cognitive est de développer des méthodes et des outils pour

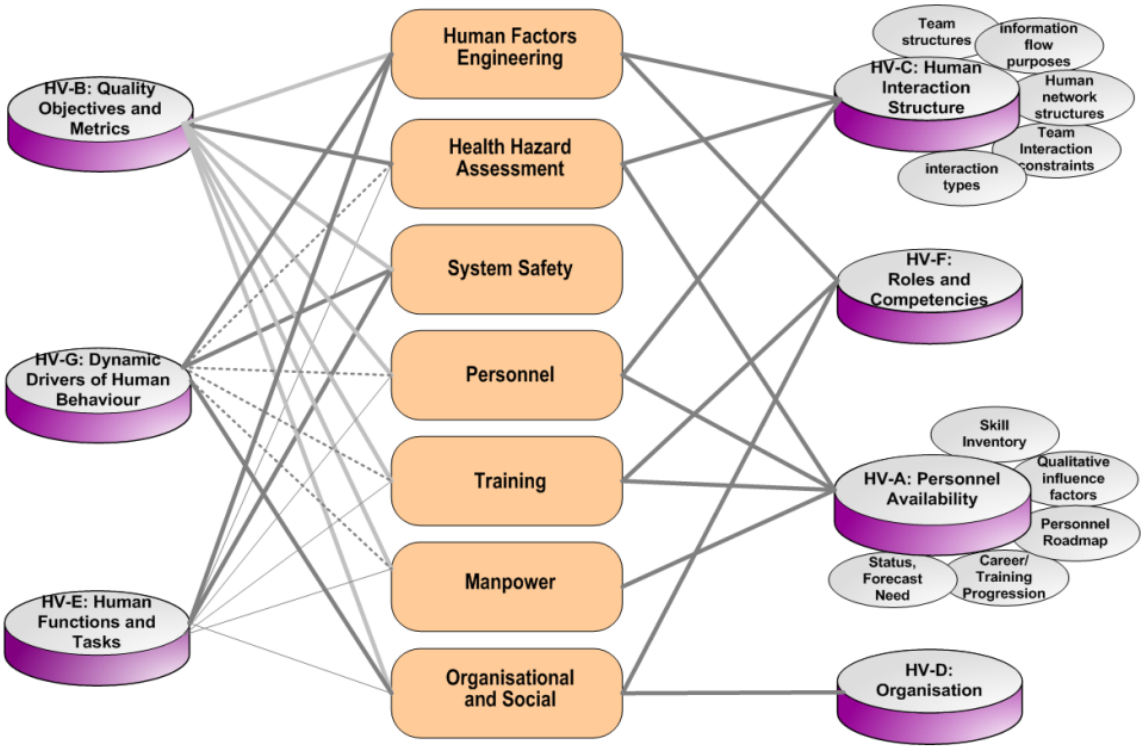


FIGURE 2.6 – Couverture des *Human Views* selon les domaines HSI [21]

guider la conception de systèmes sociotechniques dans une perspective de prise en compte des domaines du HSI. Elle vient en aide au développement des mécanismes d'allocation de tâches entre opérateurs humains et fonctions d'automatisation, aux systèmes à forte charge cognitive, à la définition des compétences nécessaires pour manœuvrer un système [14]. Les systèmes produits sont alors mieux adaptés aux opérateurs, en s'appuyant par exemple sur leurs modes de traitement de l'information, et aux contraintes imposées par l'environnement de travail.

Une grande partie des contributions de l'ingénierie cognitive est axée sur l'analyse de l'activité humaine dans son milieu opérationnel [64]. Elle se définie comme « *l'étude de ce que doit faire un opérateur, ou un groupe d'opérateurs, en termes d'actions et/ou de processus cognitifs pour atteindre les buts du système* » [62].

L'analyse de l'activité humaine est formalisée grâce aux modèles de la tâche. Il existe une grande variété de modèles de la tâche dans la littérature [33] : la décomposition hiérarchique de la tâche (*Hierarchical Task Analysis* – HTA), la Méthode Analytique de Description des tâches (MAD) [103], l'analyse cognitive de la tâche (*Cognitive Task Analysis* – CTA) [104], analyse des tâches concurrentes (ConcurTaskTrees) [84] etc.

Ces méthodes décrivent les tâches en termes d'objectifs et des actions à réaliser pour les atteindre. Les actions sont décomposées selon un arbre hiérarchique et sont liées par relations logiques et temporelles (choix, itération, parallélisme, séquence etc.). Elles déterminent aussi leurs conditions de déclenchement et de fin ou de leur fréquence dans les missions des opérateurs.

Outre l'analyse de la tâche, les méthodes de l'ingénierie cognitive s'intéressent à la caractérisation des utilisateurs. Par exemple, la méthode des *personas* [20]. Elle permet de définir des profils d'utilisateurs du système qui se différencient par leurs caractéristiques physiologiques (âge, sexe, handicap), leur personnalité, leur sociabilité, leurs niveaux de compétences ou le contexte de l'activité. La méthode des personas complète l'analyse de l'activité humaine pour identifier les divers usages actuels ou futurs du système selon les différents profils d'utilisateurs modélisés.

Les données modélisées par les méthodes d'analyse de la tâche sont très utiles pour l'ingénierie système. Elles permettent d'identifier les opérateurs, les informations nécessaires pour leurs activités, la séquence des actions et les flux de données échangées. Elles contribuent fortement à la définition des exigences, de l'architecture fonctionnelle et physique du système. De plus, les modèles de la tâche peuvent s'exprimer facilement avec les diagrammes d'activité ou de séquence du SysML (voir Chapitre 1.4 – *Formalisme SysML*).

Le modèle HTA suivant (Figure 2.7) présente un exemple de la décomposition hiérarchique de la tâche [101]. Il modélise l'objectif de la procédure et décompose les actions à réaliser. L'opérateur doit, de manière séquentielle, exécuter les tâches (de la tâche *1* à *8*). La tâche 4 est décomposée en sous-tâches successives.

Les méthodes de l'analyse de la tâche font partie des approches normatives et descriptives de l'analyse de l'activité selon la classification de Rasmussen [89]. La vision normative décrit l'activité comme elle devrait se réaliser conformément aux procédures de travail établies. L'approche descriptive décrit l'activité comme elle se réalise en pratique par les opérateurs. Bien que pertinentes sur de nombreux points, ces deux approches présentent des limitations.

Les méthodes d'analyse de la tâche sont dépendantes des situations observées ou imaginées par les concepteurs du système. La qualité des analyses est tributaire des ressources allouées et de la compétence des concepteurs impliqués. Dans tous les cas, l'énumération complète des situations est dans la pratique inenvisageable pour des questions de complexité, de coût et de temps ; l'analyse de la tâche ne peut être complète. Dès lors que le système entre en milieu opérationnel, la bonne marche du système repose sur la capacité des opérateurs à affronter des situations non prévues pendant la conception du système, avec les moyens disponibles qui ne répondent potentiellement pas au contexte.

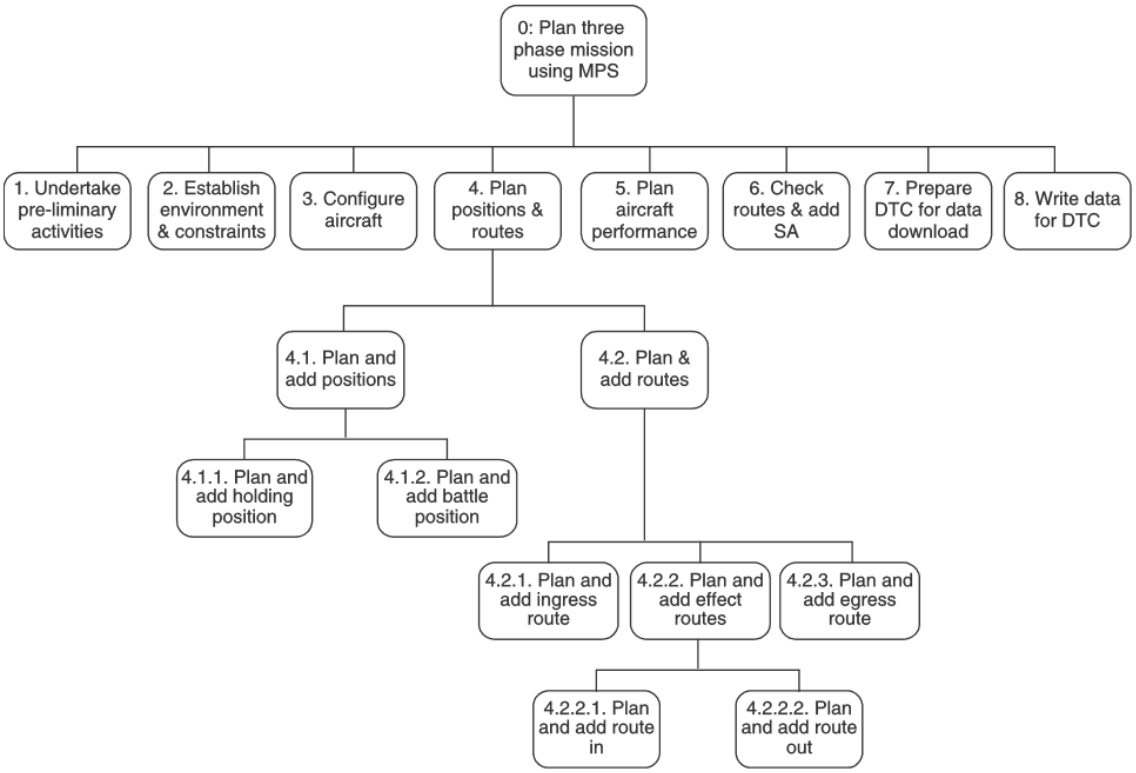


FIGURE 2.7 – Exemple d'un modèle HTA

Face à ces difficultés, une voie différente de l'analyse de l'activité a été proposée avec l'approche formative, qui représente la troisième approche de la classification de Rasmussen.

L'approche formative part du principe qu'un système sociotechnique est rarement stable dans le temps. La modélisation des tâches peut se retrouver invalidée par des évènements imprévus ou par des évolutions de l'environnement lui-même. Elle se distingue des autres méthodes d'analyse de l'activité par le fait de souligner l'importance de décrire l'ensemble des moyens d'actions présents dans le système permettant aux opérateurs d'accomplir leurs activités. Elle considère que l'activité de l'opérateur est assujettie par les contraintes émanant du système et de son environnement. En décrivant les contraintes, et non les tâches, cela permet de focaliser l'analyse sur les potentialités de l'environnement de travail dans un cadre borné (Figure 2.8).

Ainsi, l'approche formative promeut la compréhension des contraintes fondamentales d'un domaine de travail avant de s'engager dans l'analyse de ses fonctions. Cela revient à « *comprendre le terrain avant de comprendre les chemins que l'on peut y emprunter* » [34].

Malgré quelques travaux [32, 94, 78, 102], les liens entre l'approche formative et l'ingénierie système est un sujet qui demeure peu exploité dans la littéra-

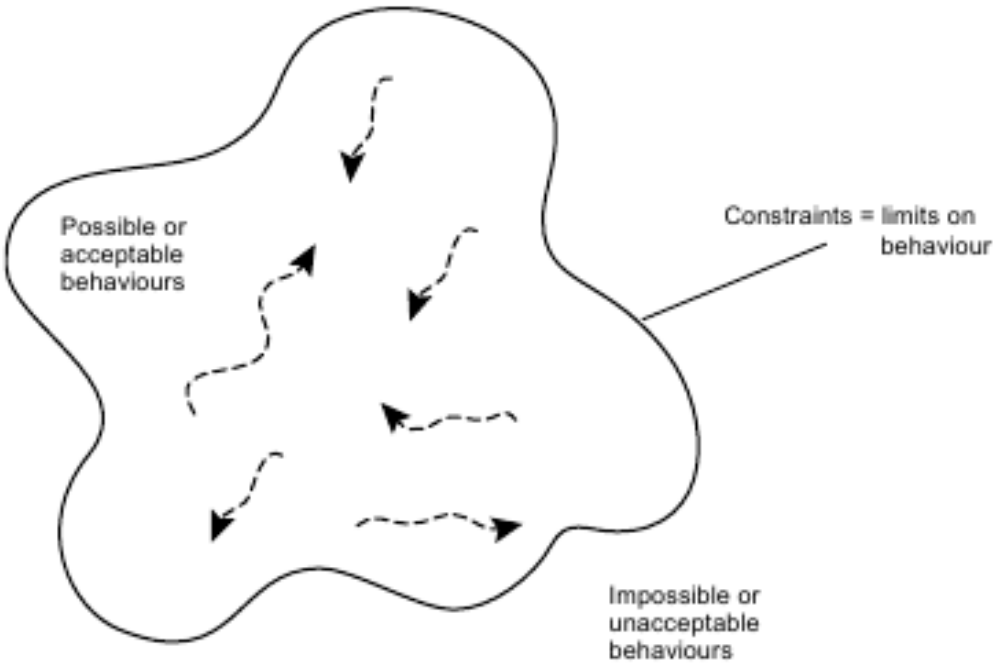


FIGURE 2.8 – L'espace constitué par les contraintes [74]

ture. Pourtant, l'approche formative incarne une méthode originale de l'ingénierie cognitive pour l'ingénierie système de par ses caractéristiques. Cette relation gagnerait à être davantage étudiée car elle présente un potentiel d'amélioration dans la conception de systèmes.

2.6 Synthèse

La démarche HSI a été proposée afin de répondre aux difficultés rencontrées par l'ingénierie système pour intégrer la composante humaine dans ses activités. L'objectif est de concevoir des systèmes compatibles avec les caractéristiques humaines, tolérants envers les erreurs humaines qui assurent une coopération optimale entre les composantes humaines, organisationnelles et techniques.

Ce chapitre a été l'occasion de présenter les domaines traités par le HSI, les processus dans le cycle de vie du système et l'intégration du HSI dans les modèles des systèmes des méthodes MBSE. Les processus de la conception centrée utilisateur constitue une référence de travail idoine pour la démarche HSI en recommandant d'impliquer, de manière itérative, les utilisateurs finaux dans les choix de conception et dans l'évaluation des solutions proposées.

L'ingénierie cognitive propose des méthodes et des outils pour faire émerger auprès des opérateurs les informations nécessaires à leurs activités. Elle permet ainsi d'étudier le comportement et les caractéristiques des opérateurs dans

leur environnement de travail, de recueillir leurs besoins et d'identifier les services fonctionnels et physiques que le système devra être apte à fournir. Ces informations nourrissent directement les modèles d'exigences et les architectures fonctionnelles et physiques du modèle global du système.

Parmi les méthodes de l'ingénierie cognitive, l'analyse de l'activité distingue trois approches : normative, descriptive et formative. Les deux premières sont répandues et intégrées par l'ingénierie système. Bien qu'indispensables et pertinentes, ces approches rencontrent quelques faiblesses, notamment liées à l'impossibilité d'observer ou d'imaginer l'ensemble des situations rencontrées par le système. L'approche formative offre un moyen alternatif d'étudier les besoins des opérateurs en se concentrant sur l'identification des contraintes du système avec lesquelles l'opérateur doit composer pour atteindre ses objectifs. Toutefois, l'approche formative a peu été étudiée dans un contexte d'ingénierie système.

Face à ce constat, nous proposons d'étendre l'étude sur l'utilisation de la démarche formative dans les activités de l'ingénierie système pour soutenir l'approche HSI. Ce travail est avant tout exploratoire.

Le chapitre suivant (Chapitre I.3 – *Cognitive Work Analysis*) présente les caractéristiques de la méthode formative et de son cadre conceptuel le *Cognitive Work Analysis* (CWA).

Chapitre 3

Cognitive Work Analysis

Le chapitre précédent a montré que la démarche HSI s'appuie sur l'ingénierie cognitive pour étudier l'activité humaine dans son contexte de travail. Parmi ces méthodes, l'approche formative constitue une approche originale en se concentrant non pas sur les tâches, mais sur les contraintes qui forment le domaine de travail des opérateurs. Cette approche a néanmoins peu été explorée dans la conception de système répondant aux critères HSI.

Ce chapitre présente les propriétés de l'analyse cognitive du travail (*Cognitive Work Analysis* – CWA) qui constitue la principale méthode de conception selon une approche formative.

3.1 Cognitive Work Analysis

Le CWA est une méthode de conception de systèmes complexes [88, 89, 113]. Elle propose une analyse du système en se concentrant sur les contraintes imposées par l'environnement (le domaine de travail) sur l'opérateur et non sur l'analyse directe des tâches. Le CWA appartient en cela à l'approche formative de l'analyse de l'activité selon la classification de Rasmussen [89] (voir Chapitre 2.5 – *L'ingénierie cognitive pour l'analyse de l'activité humaine*). Il a été utilisé dans de nombreux domaines parmi lesquels figurent le contrôle de trafic aérien [6], le militaire [76], le nucléaire [24], le transport [28, 107], le médical [32] ou l'ordonnancement de véhicule de transport [38].

Le CWA étudie l'ensemble des contraintes qui s'imposent à l'opérateur dans son environnement de travail. Il forme une approche holistique qui examine simultanément plusieurs dimensions d'un domaine de travail au travers de cinq étapes d'analyse.

- Analyse du domaine de travail (*Work Domain Analysis* – WDA)
- Analyse des tâches de contrôle (*Control Task Analysis* – ConTA)
- Analyse des stratégies (*Strategies Analysis* – SA)
- Analyse de l'organisation sociale et de la coopération (*Social Organization and Cooperation Analysis* - SOCA)
- Analyse des compétences (*Worker Competencies Analysis* – WCA)

Vicente [113] catégorise ces cinq étapes en deux groupes. La première catégorie est constituée des trois premières étapes. Elle décrit les exigences du problème qui doivent être satisfaites. La seconde catégorie, constituée des deux dernières, décrit les caractéristiques de l'organisation et des acteurs impliqués pour répondre à ces exigences.

L'analyse du domaine de travail L'analyse du domaine de travail modélise les contraintes intentionnelles, fonctionnelles et physiques du système sociotechnique. Elle explicite les objectifs du système, les critères de mesure d'obtention des objectifs, les fonctions utilisées pour les atteindre et les processus et les dispositifs physiques pour les réaliser. L'analyse du domaine de travail est la phase d'analyse la plus utilisée du CWA [93].

L'analyse des tâches de contrôle L'analyse des tâches de contrôle identifie les processus physiques et cognitifs engagés pour réaliser les fonctions du système. Cette analyse définit les tâches du domaine de travail indépendamment de la personne en charge et de la manière dont elles sont réalisées.

L'analyse des stratégies L'analyse des stratégies se concentre sur la manière dont se réalise une activité. Le terme stratégie se réfère au fait qu'une tâche peut être réalisée de façons différentes, selon l'état du système, de l'environnement ou bien des contraintes cognitives et physiques de l'opérateur.

L'analyse de l'organisation sociale et de la coopération L'analyse de l'organisation et de la coopération s'intéresse à l'organisation du travail au sein du système. En effet, une activité peut être réalisée par une ou plusieurs personnes, simultanément ou non, de manière automatisée ou non. Le travail peut être une collaboration humain-humain, humain-système ou système-système. L'organisation du travail est influencée par les conditions dynamiques dans lesquelles évoluent le système et l'opérateur (charge de travail, fatigue, compétences de l'opérateur etc.).

L'analyse des compétences des travailleurs La dernière phase, l'analyse des compétences, modélise les outils et les compétences nécessaires aux opérateurs pour mener les activités du système.

Les cinq étapes d'analyse restreignent au fur et à mesure l'espace de conception du système considéré. À chaque étape successive, les contraintes et les affordances exposées lors de l'étape précédente constituent l'objet de l'étude. Ainsi, chaque phase constitue un raffinage de l'étude du système [34]. L'analyse des tâches de contrôle s'appuie en effet sur l'analyse du domaine du domaine de travail et ainsi de suite.

Le tableau suivant (Table 3.1) résume les contraintes exposées par chaque phase du CWA [75].

Phase du CWA	Type de contrainte
WDA	Objectifs, critères et priorités, fonctions et ressources physiques
ConTA	Activités en termes de situation de travail, fonctions de travail et tâches de contrôle
SA	Stratégies de mise en œuvre des activités
SOCA	Allocation du travail entre individus ou groupes
WCA	Capacités cognitive des opérateurs

TABLE 3.1 – Nature de contrainte identifiée selon les phases du CWA

3.2 L'analyse du domaine de travail

L'analyse du domaine de travail est la première et principale étape du CWA. Son objectif est de décrire l'espace « intentionnel-fonctionnel-topologique » du domaine de travail [75]. Le contexte *intentionnel* représente les objectifs et les critères de mesure d'obtention de ces objectifs. Le contexte *fonctionnel* décrit les moyens disponibles aux opérateurs pour réaliser leurs missions. Enfin, le contexte *topologique* impose des contraintes en spécifiant les objets physiques disponibles aux opérateurs dans le domaine de travail. Ensemble, le contexte du système de travail définit l'espace fondamental de problème des acteurs en identifiant les objectifs, les valeurs, les priorités et les fonctions que doivent assurer le système de travail, en utilisant les ressources physiques identifiées [75]. Ainsi, l'activité d'un opérateur se définit comme « *un ensemble de possibles qui se forge sur la base de ces différents ensembles de contraintes* » [71].

Selon Vicente [113], il existe une différence notable entre les objectifs (*purposes*) et les buts (*goals*) d'un système. Les objectifs sont vus comme étant « les intentions globales pour lesquelles un système a été conçu et qu'il doit atteindre. Les objectifs constituent les propriétés du domaine de travail, et non des acteurs, et sont relativement stables dans le temps ». Quant aux buts, ils sont définis comme « un état à atteindre, ou à maintenir, par un acteur à un instant donné. Les buts constituent des attributs des acteurs, et sont dynamiques ». Ainsi, les opérateurs effectuent des activités pour que, d'une manière ou d'une autre, ils puissent atteindre un but permettant au système d'atteindre ses objectifs [101]. En termes d'ingénierie cognitive, la vision formative vise donc à décrire les objectifs du système, tandis que les méthodes d'analyse de la tâche décrivent les buts du système.

Une des caractéristiques essentielles de l'analyse du domaine de travail est le fait que son analyse est indépendante des situations de vie du domaine de travail et de l'opérateur qui réalise l'activité [113]. Les objectifs principaux du système étant stable, l'analyse du domaine de travail fournit le contexte du système à un haut niveau d'abstraction. Qu'importe la situation dans laquelle se trouve le

système, le contexte identifié restera viable, même lorsque le système fera face à des situations imprévues.

L'indépendance de l'analyse répond à la problématique liée à l'impossibilité d'identifier l'ensemble des évènements et des conditions environnementales que le système peut potentiellement rencontrer. En ce sens, l'analyse du domaine de travail est un artefact essentiel pour la compréhension du contexte du système.

3.2.1 Contraintes intentionnelles-causales

Les contraintes d'un domaine de travail sont de natures différentes. Elles se positionnent dans un continuum causal-intentionnel qui exprime les lois qui régissent le comportement du domaine de travail. Les contraintes causales sont basées sur les lois de la nature (physique, chimique, thermodynamique etc.). Le comportement d'un barrage hydraulique est par exemple fortement régi par le transfert d'énergie résultant du passage de l'eau. Les contraintes intentionnelles sont quant à elles basées sur les règles sociales formelles ou informelles, les législations ou les motivations personnelles. Il est intéressant de qualifier les contraintes d'un domaine de travail car elles guident la recherche d'information et identifient les parties prenantes conceptrices à mobiliser. Par exemple, le domaine de travail du barrage hydraulique nécessitera des spécialistes en physique et en mécanique.

Rasmussen [89] définit cinq catégories de système de travail, de hautement causal à hautement intentionnel (Table 3.2).

3.3 La Hiérarchie d'Abstraction

L'analyse du domaine de travail est modélisée par la hiérarchie d'abstraction. Ce formalisme est structuré en cinq niveaux d'abstraction, dont les dénominations diffèrent selon les auteurs. Nous utiliserons la nomenclature de Rasmussen [89] car elle est la plus documentée. Les niveaux sont :

- Objectifs Fonctionnels
- Fonctions Abstraites
- Fonctions Généralisées
- Fonctions Physiques
- Formes Physiques

Bien que généralement adopté comme tel, le nombre de niveau d'une hiérarchie d'abstraction n'est pas fixé, il peut évoluer selon le système de travail [113]. Cependant, peu de travaux exploitent cette idée, probablement dû à l'absence de méthode établie pour déterminer le nombre de niveaux à modéliser.

Type de domaines de travail	**Nature des contraintes**	**Exemples**
Automatisés, gouvernés par les lois de la nature	Causales, basées sur les lois de la nature	Usine de processus industriels (énergie, chimie etc.)
Mécanisés gouvernés par les codes de conduite	Causales, basées sur les lois de la nature, et intentionnelles car liées aux procédures formelles de travail des opérateurs	Usine de biens manufacturés de manière mécanique
Gouvernés par les intentions des acteurs	Intentionnelles, basées sur les législations les conventions ou les habitudes de travail	Usines de manufacture basée sur le travail manuel, hôpitaux etc.
Gouvernés par les objectifs personnels des acteurs	Intentionnels, basés sur les objectifs institutionnels de haut-niveau	Systèmes de service public, universités etc.
Indépendants pour acteurs occasionnels	Intentionnelles, basées sur les buts et les préférences personnels	Systèmes d'information pour le grand public

TABLE 3.2 – Continuum causal-intentionnel de domaines de travail [89]

La hiérarchie d'abstraction modélise les contraintes du domaine de travail selon le contexte intentionnel-fonctionnel-topologique déterminé par l'analyse du domaine. Les deux premiers niveaux définissent les objectifs du domaine de travail et les moyens de mesure, les deux niveaux suivants expriment les moyens fonctionnels pour les atteindre, et enfin le dernier niveau modélise les affordances physiques du domaine de travail.

Les relations qui lient les niveaux d'abstraction adjacents entre eux sont représentées par les liens *moyens-fins* (*means-ends relationships*). Pour un niveau d'abstraction donné, l'élément du niveau supérieur décrit ce qu'il faut atteindre (le « *pourquoi* ») et l'élément du niveau inférieur décrit le moyen d'obtention (le « *comment* »).

Les relations « moyens-fins » améliorent la compréhension du système de travail. En effet, le parcours descendant de la hiérarchie d'abstraction détaille le fonctionnement du système, de l'objectif à son moyen de réalisation. Inversement, le parcours ascendant renseigne sur les objectifs à atteindre à partir des dispositifs physiques disponibles dans le système de travail. La Figure 3.1 illustre cette notion sur l'ensemble de la hiérarchie.

Chaque niveau de la hiérarchie d'abstraction est présenté plus en détails dans la suite de ce chapitre.

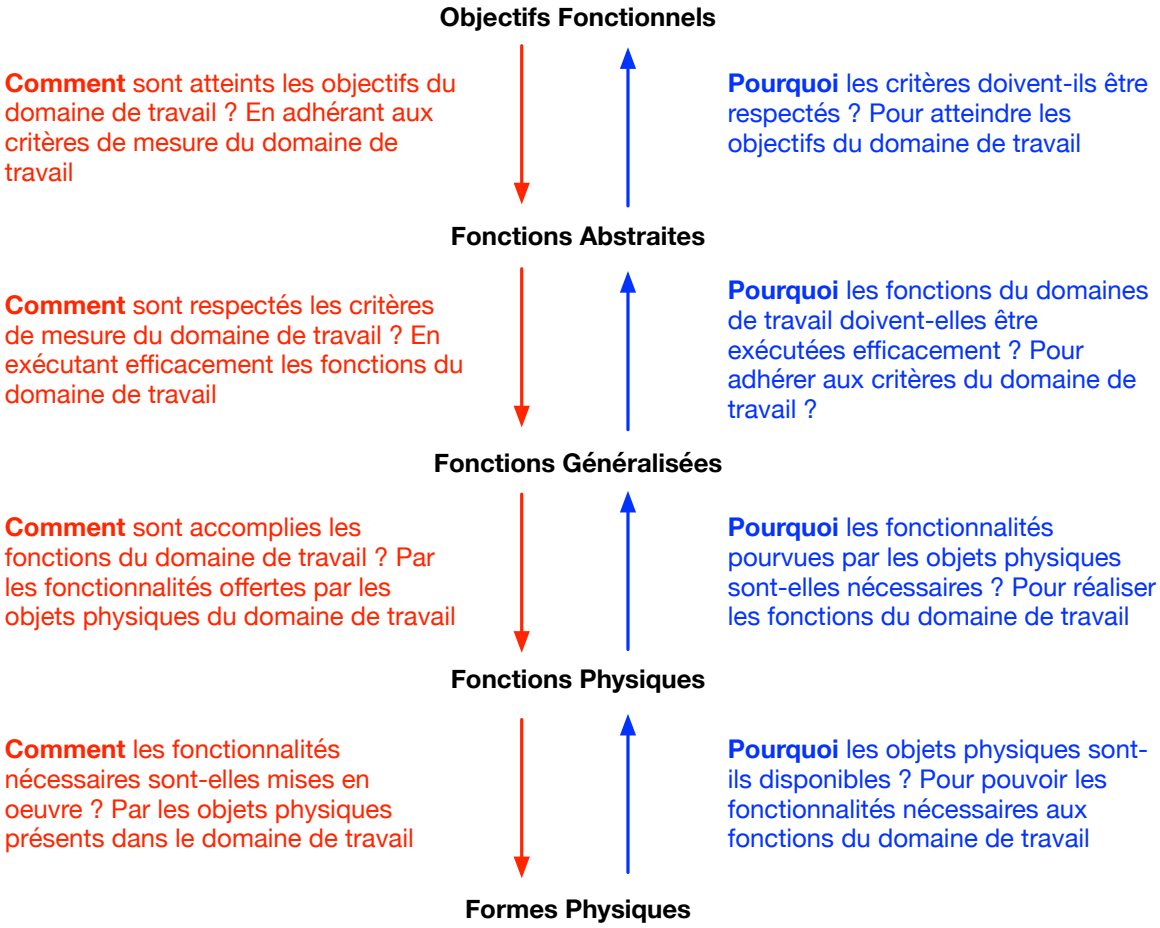


FIGURE 3.1 – Relations moyens-fins de la hiérarchie d'abstraction. La relation *moyen* est en rouge, la relation *fin* est en bleu (Figure adaptée de [75]).

Objectifs Fonctionnels

Le premier niveau d'abstraction « Objectif Fonctionnel » identifie les objectifs primordiaux pour lesquels le système de travail est conçu. Ils expriment les raisons d'être du système. Ce niveau décrit également les contraintes externes imposées par l'environnement sur le domaine de travail.

Le tableau 3.3 ci-dessous présente quelques exemples de questions auxquelles répond le niveau des objectifs fonctionnels [75].

Fonctions Abstraites

Le niveau « Fonction Abstraite » identifie les critères de mesure de la progression globale du système envers l'atteinte des objectifs définis au niveau supérieur (« Objectifs Fonctionnels »). Ainsi, le système peut atteindre ses objectifs seulement s'ils respectent les critères de mesure exprimés à ce niveau.

Questions pour les objectifs fonctionnels
Objectifs – Pour quelles raisons le système existe-t-il ? – Quels sont les objectifs de plus haut niveau d'importance ? – Quels services fournit le système à son environnement ? – Quels besoins de l'environnement le système satisfait ? Contraintes extérieures – Quels types de contraintes impose l'environnement au système ? – Quelles valeurs, régulations ou lois impose l'environnement au système ?

TABLE 3.3 – Questions auxquelles répondent les objectifs fonctionnels [75]

Les fonctions abstraites dérivent généralement des principes fondamentaux relatifs au domaine de travail, comme par exemple les lois physiques de l'environnement (pour les systèmes causals), ou les lois sociales et les valeurs liées à l'humain (pour les systèmes intentionnels) [13]. Les critères de mesure peuvent ainsi s'exprimer sous formes quantitatives ou qualitatives selon la nature de ces critères. Par exemple, les critères peuvent mesurer l'efficacité, l'efficience, la fiabilité, les délais, les coûts etc. ou le respect des procédures ou des législations.

Il est important de noter que les critères de mesure restent stables dans le domaine de travail, même lorsque le système fait face à des situations non prévues lors de sa conception [75].

Le tableau 3.4 ci-dessous donne quelques exemples de questions auxquelles répond le niveau des fonctions abstraites [75].

Questions pour les fonctions abstraites
Objectifs – Quels critères pour juger la progression du système vers l'obtention de ses objectifs ? – Quels critères pour juger la satisfaction du système face à ses contraintes extérieures ? – Comment évaluer les performances des fonctions généralisées identifiées ?

TABLE 3.4 – Questions auxquelles répondent les fonctions abstraites [75]

Fonctions Généralisées

Le troisième niveau « Fonction Généralisée » décrit les fonctions à réaliser dans le système afin d'atteindre les objectifs du domaine de travail (*Objectifs*

Fonctionnels), en s'appuyant sur les dispositifs présents dans le système (*Objets Physiques*). L'opérateur doit gérer et coordonner les fonctions dont il est responsable afin d'atteindre les objectifs définis tout en respectant les contraintes et les ressources physiques identifiées.

Comme vu précédemment, l'analyse du domaine de travail est construite indépendamment des opérateurs et des situations. De ce fait, l'opérateur responsable de l'accomplissement de chaque fonction n'est pas précisé ; il peut donc s'agir d'un opérateur humain ou d'un mécanisme d'automatisation.

Les fonctions généralisées sont représentées sous une forme dite de *boîte noire*, c'est-à-dire qu'il n'est pas nécessaire de connaître leur fonctionnement interne.

Le tableau 3.5 ci-dessous donne quelques exemples de questions auxquelles répond le niveau des fonctions généralisées [75].

Questions pour les fonctions généralisées
Objectifs – Quelles fonctions sont requises pour atteindre les objectifs du système ? – Quelles fonctions sont requises pour satisfaire les contraintes externes du système ? – Quelles fonctions sont réalisées dans le système ? – Quelles fonctions sont réalisées avec les ressources physiques du système ?

TABLE 3.5 – Questions auxquelles répondent les fonctions généralisées [75]

Fonctions Physiques

Le quatrième niveau d'abstraction « Fonction Physique »décrit les processus fonctionnels ou les capacités fonctionnelles des objets physiques du système de travail. Généralement, ce niveau reflète les processus physiques et intentionnels consommés par les fonctions généralisées et délivrés par les formes physiques.

Le tableau 3.6 ci-dessous donne quelques exemples de questions auxquelles répond le niveau des processus physiques [75].

Formes Physiques

Le cinquième et dernier niveau d'abstraction *Forme Physique* représente les ressources et les objets physiques utilisés pour réaliser les fonctions physiques définies au niveau supérieur. Les éléments composant ce niveau peuvent être de nature très variée : outil, infrastructure, catégorie de personnel etc.

Questions pour les fonctions physiques
Objectifs – Qu'offrent les formes physiques comme capacité pour le domaine de travail ? – Dans quels processus les objets physiques du système sont-ils utilisés ? – Quelles sont les capacités fonctionnelles et les limitations des objets physiques dans le système ? – Quels processus physiques, mécaniques, électriques ou chimiques sont fournis par les objets physiques dans le système ? – Quelles fonctionnalités sont requises pour rendre possible les fonctions généralisées ?

TABLE 3.6 – Questions auxquelles répondent les fonctions physiques [75]

Le tableau 3.7 ci-dessous donne quelques exemples de questions auxquelles répond le niveau des formes physiques [75].

Questions pour les formes physiques
Objectifs – Quelles sont les objets et les ressources physiques au sein du domaine de travail ? – Quelles sont les objets et les ressources physiques nécessaires aux processus et aux fonctions du système ? – Quelles sont les caractéristiques des objets et des ressources physiques du domaine de travail ?

TABLE 3.7 – Questions auxquelles répondent les formes physiques [75]

Exemple de hiérarchie d'abstraction

À des fins d'exemple, la hiérarchie d'abstraction suivante modélise le domaine de travail d'un thermostat pour des particuliers (Figure 3.2).

L'objectif de ce thermostat est d'*optimiser le système de chauffage existant* et d'*optimiser l'expérience de l'utilisateur* (Objectif fonctionnel). La réponse à la question *comment ?* faire pour atteindre ces objectifs est exprimée par les liens moyens-fins. Par exemple, le premier objectif fonctionnel est atteint en respectant les quatre critères fonctions abstraites : *minimiser l'impact environnemental*, *minimiser la consommation énergétique*, *maximiser la commodité* et *maximiser le confort thermique*. Le parcours descendant de la hiérarchie d'abstraction décrit le processus à réaliser pour atteindre les objectifs fonctionnels.

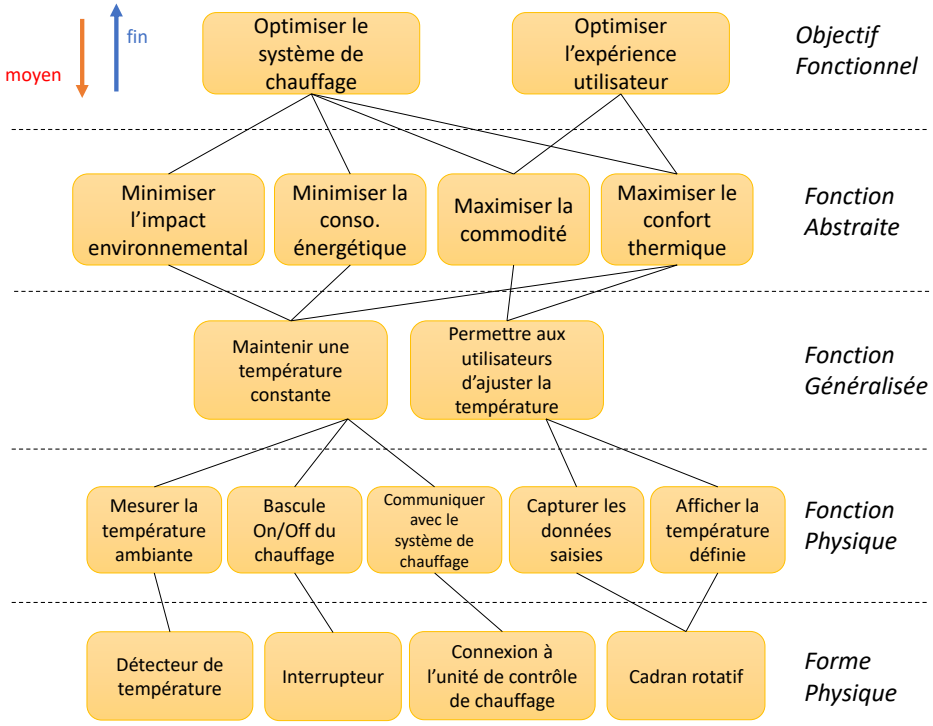


FIGURE 3.2 – Hiérarchie d'abstraction d'un thermostat [61]

La lecture ascendante décrit le *pourquoi* faire. Par exemple, la forme physique *détecteur de température* existe dans le domaine de travail pour la fonction physique *mesurer la température ambiante*. En poursuivant la lecture ascendante, la température ambiante est mesurée pour la fonction généralisée *maintenir une température constante*.

3.3.1 Méthode de construction

La construction de la hiérarchie d'abstraction a fait l'objet de deux méthodes principales.

Vicente [113] liste des recommandations pour construire la hiérarchie d'abstraction.

1. Définir les frontières du domaine de travail en restreignant les interactions entre le domaine de travail et son environnement.
2. Pour chaque élément, il faut se demander si l'élément lié au niveau inférieur représente bien une partie. Et réciproquement, en vérifiant que l'élément lié au niveau supérieur constitue effectivement un tout au regard des éléments sous-ordonnés.
3. Il est plus aisé de débuter l'analyse du domaine en identifiant les objectifs fonctionnels, les formes physiques et les fonctions physiques (respectivement le premier, quatrième et cinquième niveaux d'abstraction). Ensuite,

il faut identifier les éléments des niveaux intermédiaires. Dans le cas où le domaine satisfait plusieurs objectifs fonctionnels, il peut être utile de développer une hiérarchie d'abstraction pour chacun d'eux, puis de les mutualiser par la suite.

4. S'assurer que les éléments d'un même niveau utilisent un même formalisme, chacun des niveaux d'abstraction ayant son propre formalisme
5. Vérifier la conformité des liens moyens-fins en recourant aux questions *pourquoi ?*, *quoi ?* et *comment ?*
6. Être préparé à remanier la hiérarchie d'abstraction plusieurs fois, le processus de construction étant itératif

Naikar et al. [75] ont proposé une méthode de construction plus formelle de la hiérarchie d'abstraction. Elle est composée des neuf étapes suivantes.

Étape 1 : Détermination des objectifs de l'analyse du domaine

La première étape de la méthode s'attache à déterminer les objectifs de l'analyse du domaine de travail. Cette étape porte sur la détermination des problèmes adressés et des moyens à mettre en œuvre pour y répondre. La problématique sélectionnée orientera la modélisation, notamment en délimitant l'espace du problème à considérer.

Afin de déterminer les objectifs du WDA, Rasmussen et al. [90] suggèrent d'étudier le système de travail selon sa nature (entreprise, service publique, etc.), ses domaines d'application, ses objectifs et l'identification des personnes utilisatrices du système. Il est également nécessaire d'identifier les contraintes externes auxquelles le système doit répondre (règlementations, normes de qualité etc). Ces informations peuvent être extraites par des études documentaires, des entrevues avec des experts et des observations in situ.

Étape 2 : Identification des contraintes du projet

La deuxième étape de la méthodologie vise à identifier les contraintes qui affectent l'organisation du projet, généralement liées au délai et au coût du projet. Ces contraintes ont un fort impact ; elles conditionnent l'étendu et les moyens disponibles pour mener l'analyse WDA. L'étude des contraintes du projet conditionne le nombre d'itération d'ADS à produire dans le cadre de cette méthodologie (Étape 3-6).

Étape 3 : Détermination des limites de l'analyse du domaine

La troisième étape de la méthodologie détermine les limites du système. Cela induit une différenciation entre les éléments du système et les éléments externes de son environnement.

La détermination des limites s'appuie sur les résultats des deux étapes précédentes. En effet, l'étendue des limites du WDA sera influencée par les problématiques de l'étude WDA identifiées (Étape 1), et par les ressources plus ou moins importantes allouées à l'étude (Étape 2).

Dans un second temps, Rasmussen et al. [90] recommandent que les limites soient établies de manière à ce que les éléments du système soient fortement liés entre eux, et dans le même temps que ces éléments soient faiblement liés aux éléments externes. De cette façon, les évènements externes au système influencent peu le système, respectant de ce fait l'indépendance vis-à-vis des évènements de l'analyse du domaine. En pratique, les limites du domaine sont d'autant plus difficiles à établir que le système est ouvert à son environnement. Par exemple, une centrale nucléaire représente un système fermé, la détermination de ses limites est relativement aisée, contrairement à un système naval qui évolue dans un milieu ouvert et fortement dynamique.

Étape 4 : Identification de la nature des contraintes

Une contrainte du domaine est qualifiée de *causale* ou d'*intentionnelle* (voir Chapitre 3.2.1 – *Contraintes intentionnelles-causales*). Leur nature dépend principalement de l'objectif de la modélisation (Étape 1). En effet, si l'analyse porte sur les aspects techniques du système, les contraintes seront de type *causal*. D'un autre côté, si l'analyse porte sur les interactions sociales et les caractéristiques des opérateurs, alors les contraintes seront de type *intentionnel*. La caractérisation des contraintes guide les analystes dans l'identification des sources d'information. Par exemple, un domaine de travail hautement intentionnel nécessitera un effort important de recueil de données auprès des opérateurs et des utilisateurs du système.

Étape 5 : Identification des sources d'information

L'objectif de la cinquième étape est d'identifier les sources d'information pour la construction de la hiérarchie d'abstraction. Généralement, les informations sont issues de l'étude des documents de travail des acteurs du système : manuels, rapports, procédures de travail, supports de formation, rapports d'accident etc. Les observations *in situ* permettent également de faire émerger des informations relatives au milieu de travail des acteurs et leur organisation pour la réalisation de leurs tâches. Enfin, les entretiens avec des experts du domaine permettent de faire émerger des informations utiles. Dans le cas de la conception de nouveaux systèmes, il est intéressant d'étudier des systèmes similaires et les retours d'expérience sur des projets analogues.

Le tableau suivant (Table 3.8) synthétise les sources d'information selon les niveaux d'abstraction de la hiérarchie d'abstraction et de la nature de la source d'information. Cependant, comme le soulignent Naikar et al. [75], l'étude des

documents de travail décrit principalement les tâches selon des approches descriptives ou normatives, il revient donc aux analystes de définir les contraintes du système en utilisant ses sources informatives.

	Documents	**Milieux de travail**	**Experts**
Objectif Fonctionnel	Planning, documents de projet	Réunion de gestion du travail	Direction et gestionnaire
Fonction Abstraite			
Fonction Généralisée	Documentation opérationnelle (manuel, procédures ...)	Stations de travail et session de formation	Chef d'équipe, opérateurs ...
Fonction Physique	Document d'ingénierie, manuels techniques	Postes de travail, sessions formations et maintenance	Opérateurs, techniciens, mainteneurs, ingénieurs ...
Forme Physique			

TABLE 3.8 – Sources d'information pour la hiérarchie d'abstraction [75]

Étapes 6-8 : Construction de la hiérarchie d'abstraction

La construction de la hiérarchie d'abstraction à proprement parler se déroule théoriquement en trois étapes, possiblement moins selon les moyens disponibles pour l'étude (voir Étape 2).

- La première étape identifie les éléments constituant le domaine de travail et leur expression dans une hiérarchie d'abstraction. Ce travail s'appuie sur les informations extraites des sources d'information identifiées lors de la phase précédente. Les analystes positionnent ensuite les propriétés du domaine de travail selon les niveaux de la hiérarchie d'abstraction et les relations moyens-fins.
- La deuxième étape complète la hiérarchie d'abstraction avec l'apport de nouvelles sources d'information, en particulier celles issues des observations et des entretiens avec des experts du domaine.
- La troisième étape vise à vérifier la complétude et l'exactitude de la hiérarchie d'abstraction à l'aide d'experts du domaine. Les experts impliqués dans cette activité doivent être issus de domaines correspondant aux différents niveaux de la hiérarchie d'abstraction. Par exemple, les ingénieurs et les opérateurs sont a priori plus aptes à évaluer les problématiques relatives aux processus et aux ressources physiques du domaine de travail,

tandis que les équipes de direction peuvent évaluer les objectifs du domaine de travail.

Étape 9 : Validation

La dernière étape a pour but de valider l'analyse du domaine de travail. D'une manière analogue aux activités de Vérification & Validation de l'ingénierie système, l'étape de validation juge la complétude et la correspondance de l'analyse réalisée face au domaine de travail existant.

La littérature propose plusieurs moyens de valider une hiérarchie d'abstraction. Burns et al. [22] évaluent l'adéquation entre le déroulement de scénarios opérationnels réels et le parcours de la hiérarchie d'abstraction. Miller et Vicente [70] proposent d'utiliser la hiérarchie d'abstraction pour contrôler sa couverture face à des évènements accidentels, donc a priori non anticipés.

Naikar [75] constate des limites dans les méthodes de validation. En effet, elles reposent essentiellement sur l'examen de situations particulières. Naikar conclut sur le constat qu'il n'existe pas actuellement de meilleures alternatives pour valider une hiérarchie d'abstraction.

3.4 Le CWA et l'ingénierie système

Les méthodes de l'ingénierie système et le CWA proviennent de deux communautés distinctes. Plusieurs travaux ont construit des ponts entre le CWA et l'ingénierie système [102, 111, 113, 106]. Le tableau suivant (Table 3.3) synthétise les apports du CWA pour l'ingénierie système [102].

Ces études montrent que l'analyse du domaine est utile pour une majorité des activités de l'ingénierie système.

Tout d'abord, elle est pertinente pour le développement des exigences du système. Elle met en lumière les raisons pour lesquelles le système existe, les fonctions du système et les dispositifs physiques pour les réaliser. Elle est également intéressante pour les phases de conception des éléments logiciels et physiques du système par sa capacité à les définir. L'analyse du domaine peut être utilisée pour les activités de simulation et d'évaluation de la solution de conception. Elle fournit en effet une vue globale du système qui permet de vérifier à un haut niveau d'abstraction la complétude et les liens entre les éléments constitutifs d'un système.

L'analyse du domaine est également intéressante pour la modélisation des scénarios opérationnels. Cette assertion est davantage présentée ultérieurement (Chapitre 3.5.3 – *Liens entre les approches de l'ingénierie cognitive* ».

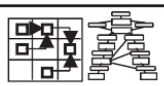
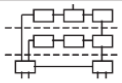
	WDA	CTA	SA	SOA	WCA
				*Annotation of other diagrams*	
	Purpose and structure	Control tasks and coordination	How control tasks carried out	Who does what and with whom	Mental processes entailed (SRK)
Requirements	develop				
Specifications	develop	develop			
Design					
Hardware, software	define				
Control tasks	given	define			
Dialog support		given	define		
Actor roles			given	define	
Interface formats				given	define
Simulation	means/ends	activities	options	agent(s)	ag. properties
Evaluation of design(s)	char/eval/comp	char/eval/comp	char/eval/comp	char/eval/comp	char/eval/comp
Implementation	guide				
Test	judge match	judge perf	judge process	judge roles	judge workload
Operator Selection				guide	guide
Operator Training	guide	guide	guide	guide	guide
Routine use	describe	describe	describe	describe	describe
Non-routine use	describe	describe	describe	describe	describe
Maintenance	describe				
Research (HF studies)	system ID	task contexts	tools, options	human context	support needs
Upgrades	model effects	model effects	model effects	model effects	model effects
System retirement	judge shortfall	judge shortfall			

FIGURE 3.3 – Le CWA dans les activités de l'ingénierie système [102]

D'un point de vue de l'architecture du système, l'analyse du domaine aide à identifier les fonctions et les dispositifs physiques. Elle détermine les services et les composants physiques mis à disposition aux opérateurs pour accomplir leurs missions, certes à un haut niveau d'abstraction. De plus, ces éléments sont contextualisés dans l'ensemble du système grâce à la décomposition en niveaux et les liens moyens-fins de la hiérarchie d'abstraction.

D'autre part, plusieurs travaux montrent les liens qui existent au niveau des formalismes. Par exemple, Moïse et al. [72] ont construit le méta-modèle de la hiérarchie d'abstraction pour qu'elle soit exploitable dans les modèles d'ingénierie système. Dhukaram et al. [32] a montré des convergences entre la hiérarchie d'abstraction et le langage UML.

Ces divers travaux montrent une relation intéressante à exploiter entre l'ingénierie système et le CWA, notamment avec l'analyse du domaine. Ces travaux restent néanmoins peu explicites sur les méthodes à employer pour effectivement faire converger les deux approches.

3.5 Le CWA et le HSI

L'analyse du domaine est une méthode proposée par l'ingénierie cognitive pour améliorer la prise en considération des aspects humains dans les systèmes. Cette section montre que l'analyse du domaine s'intègre dans les processus de la

conception centrée utilisateur et dans les méthodes de modélisation proposées par la démarche HSI.

3.5.1 Le CWA et la conception centrée utilisateur

La construction des cinq phases d'analyse du CWA repose essentiellement sur les données recueillies lors de séances d'observation ou d'entrevues avec les opérateurs (Chapitre 2.3 – *La conception centrée utilisateur*). Elle s'inscrit ainsi dans une démarche de conception centrée utilisateur [49, 94].

Hori et al. [49] ont proposé d'intégrer le CWA dans la démarche de conception centrée utilisateur dans le cycle de vie d'un système. Au moment de la publication de cette étude, la démarche de conception centrée utilisateur était décrite par la norme ISO 13407 [1]. Aujourd'hui, cette norme est dépréciée au profit de la norme ISO 9241-210 [55].

Pour rappel, le processus de conception centrée utilisateur est composé de quatre activités :

- P1 : Compréhension et spécification du contexte d'utilisation
- P2 : Spécification des exigences des utilisateurs et des organisations
- P3 : Conception de solutions
- P4 : Évaluation des solutions face aux exigences

Le schéma suivant (Figure 3.4) décrit le processus global de conception centrée utilisateur enrichie par l'intégration du CWA, appliqué à l'ensemble du cycle de vie du projet. Ce processus global est composé de six sous-processus (de *P0* à *P5*). Les processus de *P1* à *P4* correspondent aux processus de la démarche centrée utilisateur de la norme ISO 13407.

Le processus *P0* constitue une étape préalable de collecte d'informations fondée sur l'exploitation des documents de travail pour construire une base de connaissance nécessaire aux processus suivants.

Les processus *P1* et *P2* (*Extraction*) formalisent les informations issues du processus *P0*. Plus spécifiquement, le processus *P1* décrit le contexte du système à travers la description des caractéristiques des utilisateurs, des tâches, de l'environnement physique et organisationnel du système. Le processus *P2* (*Design goals*), spécifie les exigences des utilisateurs et l'allocation des tâches.

Les processus P3 et P4 utilisent le CWA pour modéliser les contraintes de travail en s'appuyant sur les données recueillies. Ces modèles fournissent des informations précieuses pour la conception du système.

Enfin, le processus *P5* traite des étapes de maintenance, de formation, de mise à jour et de retrait du système décrites par la norme ISO 15288 [3].

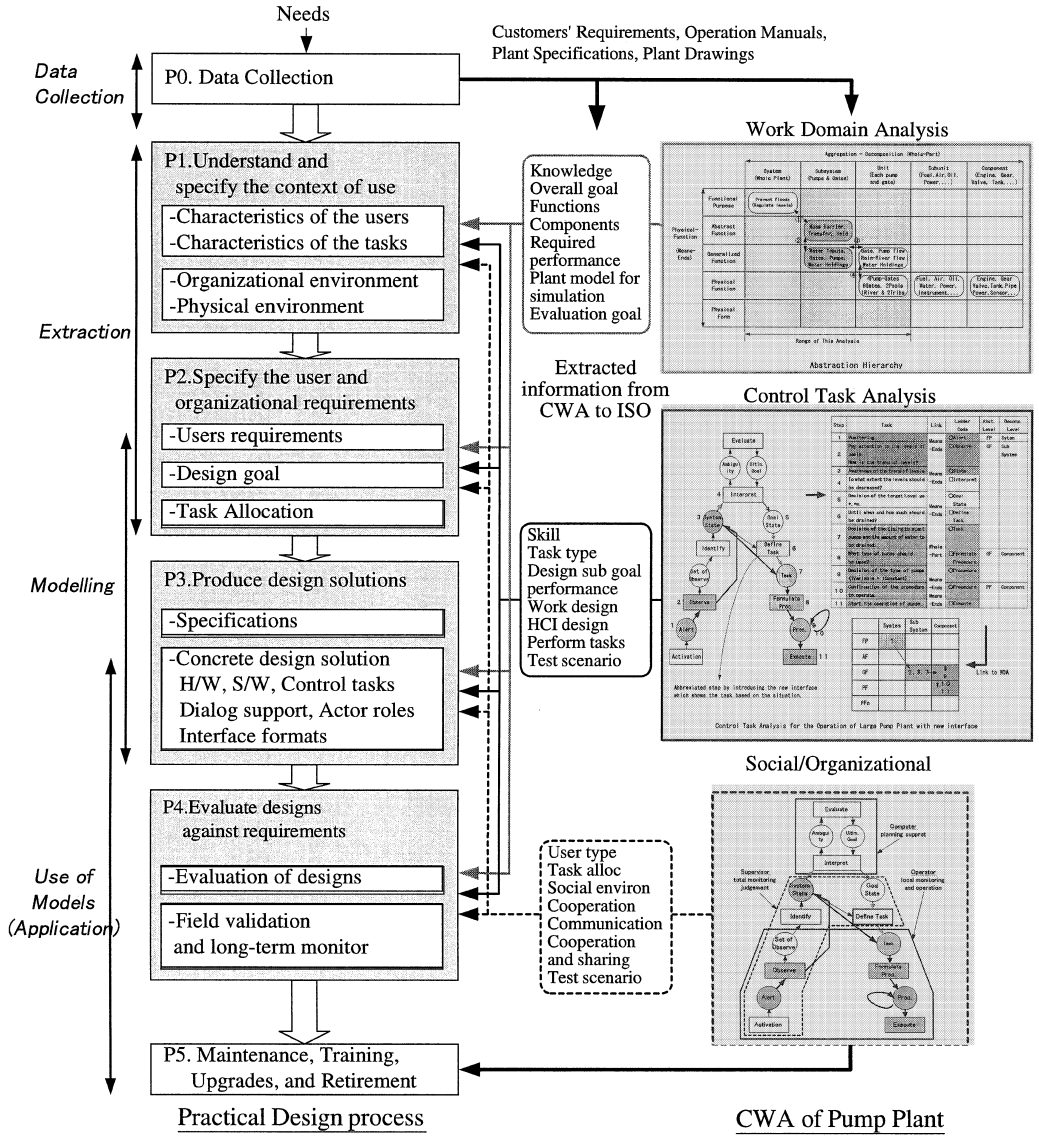


Figure 1. Relationship between CWA, ISO13407 design processes, and practical design processes.

FIGURE 3.4 – Liens entre le CWA, la conception centrée utilisateur (norme 13407 [1]) et les processus d'ingénierie système [3]

L'intégration de l'analyse du domaine dans la conception centrée utilisateur permet de faire émerger des connaissances globales du système, directement issues des parties prenantes utilisatrices : les objectifs et leurs critères de mesure d'obtention, les fonctions et les éléments physiques du système.

3.5.2 CWA et Human-Views

Les *Human Views* [21] proposent un cadre méthodologique pour la prise en compte des aspects HSI dans l'ingénierie système (voir Chapitre 2.4 – *Le HSI dans les modèles MBSE*). Cette étude montre que les *Human Views* et le CWA présentent de forts liens. Le schéma suivant (Figure 3.5) positionne les éléments des *Human Views*, du CWA et du cadre d'architecture d'un système [21].

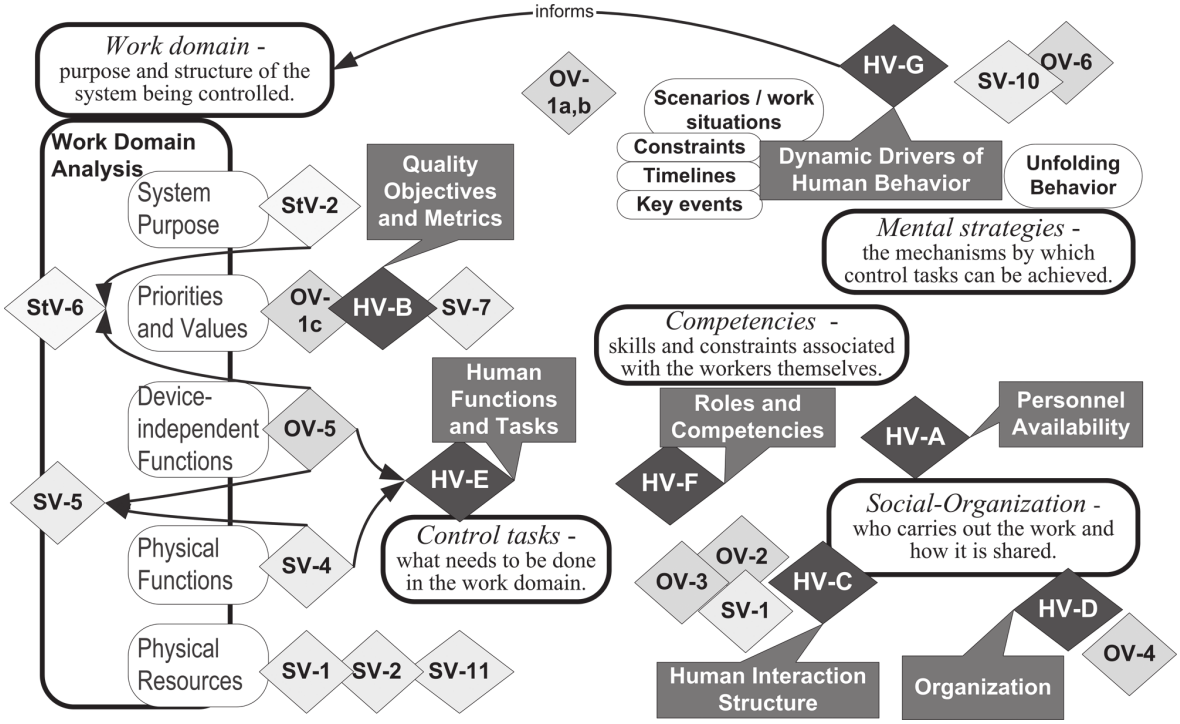


FIGURE 3.5 – Relations entre les *Human Views*, le CWA et les vues du MODAF [21]

Les vues *HV-A – Personnel Availability*, *HV-C – Human Interaction Structure* et *HV-D – Organization* analysent les besoins en termes d'organisation et du nombre des effectifs. Ces vues complètent la phase d'*analyse de l'organisation sociale et de la coopération* du CWA qui décrit l'allocation des activités ;

La vue *HV-B – Quality Objectifs and metrics* constitue un référentiel de critères de mesure des caractéristiques humaines. Cet aspect est également couvert par le niveau *Fonctions Abstraites* de l'analyse du domaine de travail.

La vue *HV-E – Human Functions and Tasks* spécifie les fonctions et les tâches allouées aux opérateurs humains du système. L'*analyse des tâches de contrôle* analyse également les fonctions de cette nature en étudiant les schèmes cognitifs mis en œuvre.

La vue *HV-F – Roles and Competencies* définie les rôles et les compétences des opérateurs pour réaliser les activités au sein du système. Cette vue peut être supportée par l'*analyse des compétences* du CWA, à l'aide de la taxonomie *Skills, Rules, Knowledge* (SRK) [87].

La vue *HV-G – Dynamic Drivers of Human Behaviour* analyse les facteurs dynamiques qui influencent, contraignent et caractérisent le comportement humain dans ses activités. Cette analyse formule des scénarios dynamiques de l'activité selon les facteurs observés, ce qui le CWA formule grâce aux stratégies de l'*Analyse des stratégies*

Les phases d'analyse du CWA sont essentielles pour informer les *Human Views*. Elles capturent principalement les résultats d'analyses, les *Human Views* se concentrent sur la capture des décisions de conception de haut niveau dans le cadre des spécifications fonctionnelles [21]. Les *Human Views* constituent alors un lien entre l'analyse de haut niveau proposée par le CWA et les activités de conception des différentes disciplines de l'ingénierie système.

3.5.3 Liens entre les approches de l'ingénierie cognitive

Le chapitre 2.5 – *L'ingénierie cognitive pour l'analyse de l'activité humaine* a présenté les trois approches de l'analyse de l'activité humaine (normative, descriptive et formative). Elles ont toutes pour objectif d'étudier les caractéristiques humaines dans un environnement afin d'adapter le travail aux capacités et aux limitations humaines. Pour rappel, l'approche normative décrit le travail comme il devrait être réalisé par les opérateurs, l'approche descriptive le décrit comme il se réalise dans les faits. L'approche formative analyse quant à elle les contraintes du domaine qui forment l'objet d'action des opérateurs.

À la lumière de la présentation de l'analyse du domaine, les liens entre les trois approches d'analyse peuvent être davantage étudiés, en soulignant les distinctions et leurs points de convergence.

Tout d'abord, les approches normatives/descriptives et formatives présentent des divergences conceptuelles et méthodologiques.

Miller et Vicente [70] montrent que les approches normatives/descriptives et formatives font émerger des liens *moyens-fins* de nature différente. D'un côté, le premier groupe forme des liens d'*actions* qui décrivent les activités à mener pour

l'obtention d'un but [1]. D'un autre côté, l'approche formative forme des liens *structurels* exprimant les contraintes à respecter pour atteindre un objectif, quelle que soit la manière dont l'action est menée.

Une deuxième divergence se situe au niveau de la dépendance d'analyse face aux évènements et aux opérateurs [75]. Les méthodes normatives/descriptives sont dépendantes de l'évènement étudié car elles sont menées pour des situations dont la finalité est connue, donc anticipée. Selon Naikar [75], ces méthodes sont hautement dépendantes du nombre et de la nature des observations réalisées. En se concentrant sur les contraintes existantes, le CWA propose une analyse indépendante de la situation qui reste alors pertinente pour une grande variété d'évènements encourus, notamment ceux non anticipés. Elle se concentre davantage sur la potentialité des activités.

Ernst [34] propose une analogie intéressante pour décrire les différentes théoriques entre les approches formatives et normatives-descriptives. Il compare l'approche formative à l'approche déclarative qui existe en informatique. Une approche déclarative fonctionne comme une *boîte noire*, c'est-à-dire qu'on obtient un résultat sans connaître le traitement qui a mené à ce résultat. Respectivement, les autres approches fonctionnent de manière procédurale, c'est-à-dire qu'il est nécessaire de décrire le cheminement qui amène à la solution.

Salmon et al. [101] montrent que l'analyse du domaine et l'analyse de la tâche décrivent le système avec des niveaux de granularité différents. L'analyse du domaine décrit le système à un haut niveau d'abstraction, en précisant le contexte général du domaine de travail. L'analyse de la tâche offre un niveau d'analyse plus fin en décrivant plutôt les modes opératoires. De plus, l'analyse de la tâche dispose de nombreuses extensions spécialisées pour orienter l'analyse vers des problématiques plus spécifiques comme par exemple avec les méthodes d'analyse de l'erreur humaine (HAZOP [51], THERP [108], DYLAM [25]).

Bien que différentes aux niveaux conceptuels et méthodologiques, les trois approches d'analyse n'en restent pas moins compatibles. En effet, plusieurs études abondent en ce sens [22, 34, 40, 60, 70, 101, 111]. Elles conviennent de la compatibilité des approches normatives/descriptives et formatives et mettent en avant les bénéfices d'un déploiement conjoint. L'analyse du domaine modélise la structure intentionnelle-fonctionnelle-topologique du domaine de travail, l'analyse de la tâche permet ensuite de naviguer au sein de cette structure pour déterminer les tâches à accomplir pour atteindre les objectifs du système.

Hajdukiewicz et Vicente [40] ont proposé une méthode décrivant l'utilisation de l'analyse du domaine et de l'analyse de la tâche :

1. Construire l'analyse complète du domaine de travail du système

1. La différence entre *buts* et *objectifs* est expliquée dans le chapitre de présentation de l'analyse du domaine de travail (Chapitre 3.2 – *L'analyse du domaine de travail*)

2. Identifier la structure pertinente de l'analyse du domaine pour un contexte de travail donné
3. Identifier les potentialités d'action du système pour cet extrait
4. Décrire l'état actuel puis celui à obtenir du domaine de travail pour chaque potentialité identifiée
5. La transition entre l'état actuel et l'état à obtenir fait l'objet d'une analyse de tâche qui identifie les actions réalisées pour mener une telle transition

Le schéma ci-dessous résume cette méthode (Figure 3.6).

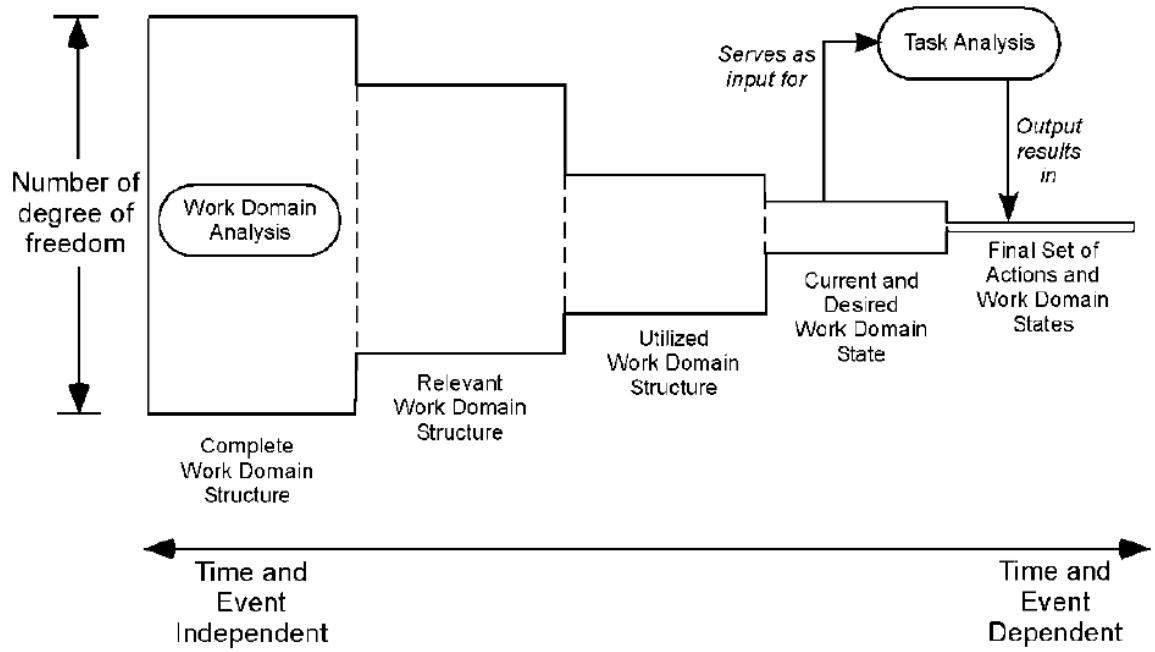


FIGURE 3.6 – Liens entre l'analyse du domaine et analyse de la tâche [40]

Les approches étant compatibles, la question a été posée quant à leur enchaînement. Des travaux [34, 101] suggèrent de mener premièrement l'analyse du domaine de travail, puis l'analyse de la tâche. Cet enchaînement s'explique par la correspondance entre le niveau de compréhension du domaine de travail et le niveau d'abstraction nécessaire pour l'exprimer. Ainsi, l'analyse du domaine de travail fournit aux concepteurs du système le contexte global du domaine de travail, alors que la seconde méthode est menée lorsque les situations ont déjà été identifiées.

3.6 Synthèse

Ce chapitre a présenté la méthode formative CWA utilisée pour la conception de systèmes complexes. Issue de l'ingénierie cognitive, le CWA et plus particulièrement l'analyse du domaine forment une approche intéressante pour le HSI.

La hiérarchie d'abstraction forme un modèle intéressant pour décrire des systèmes complexes. Les dimensions intentionnelles, fonctionnelles et topologiques y sont décrites par les cinq niveaux d'abstraction, et elles sont justifiées par les relations moyens-fins. Sa construction et son exploitation améliorent la compréhension du système pour ses concepteurs.

Les éléments recueillis par l'analyse du domaine constituent des sources d'informations utiles pour l'ingénierie système et pour les méthodes MBSE, comme l'illustre le point de vue *Human Views*.

L'analyse du domaine s'inscrit complètement dans une démarche de conception centrée utilisateur. Elle étudie le contexte d'utilisation du système en décrivant ses services et ses affordances et implique les utilisateurs finaux dans sa construction et son évaluation de manière itérative.

La modélisation des tâches est une activité requise pour décrire l'activité humaine dans un système. Elle détermine entre autres les actions opérées, leur temporalité ou les flux d'information échangés. Elle fait naître une quantité importante d'exigences et participe à la conception des architectures fonctionnelles et physiques du modèle du système. La modélisation des tâches est donc d'une aide considérable pour les ingénieurs système.

L'analyse du domaine présente l'avantage de ne pas être en rupture avec l'analyse de la tâche. Elle est même complémentaire par sa capacité à faire émerger ou à vérifier des situations de travail grâce aux divers moyens de parcours de la hiérarchie d'abstraction.

Malgré ses avantages, l'analyse du domaine est peu exploitée par l'ingénierie système [65]. Les deux communautés demeurent assez éloignées. Les points d'achoppement résident dans la différence des concepts manipulés (tâches ou contraintes), le manque d'une méthode intégrée ou les différences de formalismes [93].

Chapitre 4

Synthèse et proposition

À la vue de cette première partie, nous pouvons dire que la méthode CWA constitue une méthode adaptée pour mener l'approche HSI [91, 92]. Elle permet de décrire les aspects techniques, humains et organisationnels d'un système complexe.

L'analyse du domaine de travail (WDA) définit les contraintes associées à une majorité des domaines du HSI. L'analyse des tâches de contrôle (ConTA) identifie les ressources physiques et cognitives sollicitées pour la réalisation de tâches. L'analyse des stratégies (SA) définit les différentes alternatives pour la résolution de ces tâches. L'analyse de l'organisation (SOCA) guide la prise en compte de l'ensemble des domaines du HSI à la vue des facteurs impactant l'organisation du travail (nombre de personnes requises, leurs compétences, leurs états, la situation etc.). Enfin, l'analyse des compétences (WC) définit le nombre de personnels et leur niveau de compétence requis, proposant ainsi un socle pour établir les formations des opérateurs. Le tableau suivant (Table 4.1) illustre la couverture des phases du CWA selon les domaines du HSI.

	WDA	ConTA	SA	SOCA	WCA
FH	✓	✓	✓		✓
Sûreté	✓				
Santé	✓				
Environnement	✓				
Entraînement					✓
Personnel			✓	✓	✓
Main-d'œuvre			✓	✓	

TABLE 4.1 – Couverture des domaines HSI par les phases du CWA [91, 92]

Parmi les phases du CWA, l'analyse du domaine de travail présente le plus d'intérêt par sa faculté à identifier et à lier les contraintes d'un système socio-

technique, indépendamment des situations et des acteurs. La hiérarchie d'abstraction modélise les contraintes liées aux objectifs, aux critères de mesure de leur obtention, les fonctions opérationnelles et les composants physiques. Elle forme un espace de réflexion et d'investigation pour les concepteurs d'un système, particulièrement dans les premières étapes du cycle de vie. Elle permet de modéliser un système existant ou en devenir, en permettant d'évaluer l'impact d'un ou plusieurs éléments sur la globalité du système, en exposant les moyens d'action des agents du système.

Nous avons également vu que l'analyse du domaine est compatible avec les méthodes d'analyse de la tâche de l'ingénierie cognitive. Elle ne constitue donc pas une rupture, mais une vue complémentaire avec les approches normatives et descriptives qui demeurent indispensables. De même, plusieurs travaux montrent que l'analyse du domaine a le potentiel de contribuer à l'ingénierie système.

Malgré ces intérêts, peu de travaux ont étudié l'intégration de l'analyse du domaine dans les processus d'ingénierie système au sein d'une méthode unifiée. Nous nous positionnons dans une telle démarche.

Les avantages espérés de l'analyse du domaine intégrée dans une démarche d'ingénierie système sont les suivants :

- Amélioration de la prise en compte des aspects techniques, humains et organisationnels du système
- Intégration dans les stades précoces des processus de conception
- Amélioration de la collaboration entre les ingénieurs système et les ergonomes
- Intégration dans la démarche de la conception centrée utilisateur
- Identification les services et les ressources requis du domaine de travail

L'identification de l'analyse du domaine comme levier d'amélioration de la prise en compte des aspects humains dans les activités de l'ingénierie système répond au premier objectif de la thèse. L'ingénierie système et l'analyse du domaine manquent toutefois de points de convergence, et y remédier fonde le second objectif de la thèse.

Nous orientons notre proposition vers la constitution d'une méthode incluant l'analyse du domaine dans les phases de conception de l'ingénierie système. Cette méthode devra intervenir dans les stades précoces du cycle de vie, en incluant les parties prenantes dans les choix de conception et leurs évaluations. Elle devra être généralisable pour s'adapter à la diversité des systèmes existants. Elle devra également pouvoir intégrer la hiérarchie d'abstraction dans le modèle global assuré par le concept MBSE.

Nous avons décidé d'expérimenter l'analyse du domaine directement auprès d'ingénieurs système. Ils ont eu pour tâche de modéliser un système répondant

à un besoin, celui de permettre à un voyageur de préparer un vol. Le but de cette expérimentation était d'évaluer les productions des ingénieurs, de mesurer les critères subjectifs et de recueillir leurs verbalisations. Ces résultats nous ont permis de valider les hypothèses que nous avions émises au sujet de l'apport de l'analyse du domaine de travail pour l'ingénierie système.

Suite aux résultats de l'état de l'art et de l'expérimentation, nous proposons dans la troisième partie du document une méthode qui intègre l'analyse du domaine dans les processus de conception d'ingénierie système. Elle sera par la suite appliquée sur les deux cas d'étude NECTAR et DURESS.

Deuxième partie

Expérimentation

Chapitre 1

Expérimentation

Nous avons vu dans la première partie du document que l'analyse du domaine semblait être une méthode intéressante et complémentaire de l'ingénierie système pour soutenir l'approche HSI. Nous avons voulu conforter cette hypothèse en expérimentant l'analyse du domaine auprès d'ingénieurs système pour étudier leurs productions et recueillir leurs sentiments.

Nous avons confié la tâche à des ingénieurs système du groupe Altran de modéliser un système selon un besoin exprimé, et en leur fournissant soit sur une analyse de la tâche (groupe HTA), soit sur une analyse du domaine (groupe WDA). L'analyse de la tâche a été présentée au chapitre 2.5 – *L'ingénierie cognitive pour l'analyse de l'activité humaine*. Deux groupes d'ingénieurs système ont été constitués pour pouvoir comparer les productions et les ressentis. Le choix de la méthode HTA a été fait car elle s'apparente aux méthodes utilisées généralement en ingénierie système. Il constitue en ce sens le groupe de contrôle de l'expérimentation.

Dans un premier temps, le cadre de l'étude expérimentale sera présenté. À cette occasion, les hypothèses de travail seront établies. Dans un second temps, les résultats de l'expérimentation seront étudiés à travers d'une analyse des modèles produits et des ressentis subjectifs exprimés. Enfin, les résultats seront confrontés aux hypothèses pour confirmer ou non l'idée d'associer l'analyse du domaine et l'ingénierie système pour soutenir l'approche HSI.

1.1 Cadre de l'étude expérimentale

Cette section présente le cadre de l'expérimentation. Elle décrit les hypothèses émises pour la comparaison des deux méthodes employées par les participants. Enfin, le protocole expérimental sera énoncé.

1.1.1 Hypothèses

Nous proposons plusieurs hypothèses que nous validerons ou non selon les résultats obtenus lors de l'expérimentation. Les hypothèses 1 et 2 analysent l'in-

fluence des méthodes sur les performances et sur la qualité des productions. Les hypothèses suivantes se concentrent sur les ressentis subjectifs des participants.

Hypothèses sur les performances

Hypothèse #1 : Performance temporelle

Les ingénieurs système n'ont pas d'expérience de l'analyse du domaine, hormis une formation préalable au début de la session d'expérimentation. Nous émettons l'hypothèse que les participants du groupe WDA mettront plus de temps à réaliser les exercices que les participants du groupe HTA.

Hypothèse #2 : Qualité des productions

Nous émettons l'hypothèse que la qualité des productions des participants du groupe WDA sera meilleure que celle du groupe HTA, notamment au niveau de la couverture des besoins exprimés et de l'intégration des aspects liés aux utilisateurs du système.

Hypothèses sur les ressentis

Hypothèse #3 : Effort cognitif

La méthode WDA est nouvelle pour les participants, tandis que la méthode HTA est analogue aux méthodes d'ingénierie système. De ce fait, nous estimons que l'effort cognitif ressenti par les participants du groupe WDA sera plus important que celui du groupe HTA.

Hypothèse #4 : Acceptation des méthodes

L'approche formative proposée par le WDA diffère notablement des méthodes généralement appliquées dans l'ingénierie système. Nous estimons que cette méthode sera moins acceptée par les participants que la méthode HTA.

Hypothèse #5 : Difficulté et sensation d'échec/succès

L'analyse du domaine étant nouvelle, nous jugeons que la difficulté et la sensation d'échec seront davantage exprimées par les participants du groupe WDA que celui du groupe HTA.

Hypothèse #6 : Influence du niveau d'expérience des ingénieurs système

Les ingénieurs systèmes qui ont une forte expérience en conception ont l'habitude d'appliquer leurs méthodes. Ils auront plus de difficultés à utiliser l'analyse du domaine que l'analyse de la tâche.

1.1.2 Participants

Dix ingénieurs système de la société Altran ont participé à l'étude. Ces ingénieurs travaillent habituellement sur des projets de conseil en ingénierie système pour des clients issus de différents domaines (aéronautique, automobile, santé etc.). Les ingénieurs système ont été répartis dans les groupes WDA et HTA sans critères distinctifs de sélection.

Les participants se distinguent principalement par leur niveau d'expertise en ingénierie système. Altran considère qu'un ingénieur est expert dès cinq ans d'expérience, ce que nous retiendrons comme critère. Le groupe WDA compte trois ingénieurs experts et deux ingénieurs juniors. Le groupe HTA compte trois experts et deux juniors.

Tous les participants ont les connaissances nécessaires en langage SysML pour réaliser l'intégralité des exercices. Nous nous sommes assurés au travers du questionnaire préliminaire (Annexe V.1.1.) qu'aucun participant n'avait de formation particulière en ergonomie avant l'expérimentation, ceci afin de pouvoir comparer les résultats sans que cet aspect soit une influence sur les productions. À noter que les participants n'avaient pas connaissance des objectifs finaux de l'étude.

Le faible nombre de participants est principalement dû au nombre restreint d'ingénieurs disponibles et à leur disponibilité réduite hors des horaires de travail.

Le tableau suivant (Table 1.1) présente les caractéristiques des participants selon le groupe d'étude.

1.1.3 Protocole expérimental

Les ingénieurs système ont la tâche de modéliser un système à partir d'un besoin exprimé. Ils ont à leur disposition soit une analyse du domaine (groupe WDA), soit une analyse de la tâche (groupe HTA). Les passations se sont déroulées par groupe de cinq pour une durée totale de deux heures. Le protocole expérimental est présenté ci-dessous (Figure 1.1).

L'expérimentation débute par la distribution aux participants d'un premier questionnaire afin qu'ils communiquent les informations utiles de leur profil : âge, sexe, expérience, expertise en facteurs humains etc.

Une formation à la méthode (Annexe V.1.2 et Annexe V.1.3) est ensuite dispensée pour une durée de trente minutes, afin de familiariser les ingénieurs système à la méthode qu'ils devront utiliser. Le support de la formation est mis à disposition des participants. À la suite de cette formation, un questionnaire à choix

Groupe WDA				
Participant	**Âge**	**Sexe**	**Expertise**	**Connaissances FH**
P1	29	M	Expert (5 ans)	Non
P2	27	M	Junior (1,5 ans)	Débutant
P3	25	F	Expert (5 ans)	Non
P4	43	M	Expert (18 ans)	Non
P5	28	F	Junior (3 ans)	Non
Groupe HTA				
Participant	**Âge**	**Sexe**	**Expertise**	**Connaissances FH**
P1	33	M	Expert (12 ans)	Non
P2	26	F	Junior (0,7 an)	Non
P3	45	M	Expert (22 ans)	Débutant
P4	24	M	Junior (0,2 an)	Non
P5	52	M	Expert (11 ans)	Débutant

TABLE 1.1 – Répartition des participants des groupes WDA et HTA

multiples est soumis aux participants afin de contrôler la bonne compréhension de la méthode présentée (Annexe V.1.4).

Dès lors, les participants ont pour tâche de modéliser un système qui fournit les services nécessaires pour la préparation d'un vol pour les voyageurs comme l'achat du billet ou le dépôt de bagages. Le besoin présenté aux ingénieurs est le suivant :

Les participants disposent d'une analyse de la tâche (Annexe V.1.5) ou d'une hiérarchie d'abstraction (Annexe Annexe V.1.6) selon leur groupe d'affectation. Ces modèles sont présentés aux participants comme étant réalisés par des ergonomes lors du recueil initial du besoin. L'exercice de modélisation doit être réalisé en quarante minutes maximum, sans ordre imposé pour la réalisation des exercices. Les temps d'exécution pour chaque exercice ont été enregistrés pour évaluer les performances des participants.

Les participants modélisent le système sur support papier pour pallier les difficultés logistiques (ordinateurs et licences d'exploitation) et celles liées à l'utilisation d'un outil de modélisation potentiellement non maîtrisé qui pourrait perturber le participant.

Suite aux exercices de modélisation, quatre questionnaires subjectifs ont été soumis aux participants pour recueillir les ressentis ainsi que leurs verbalisations.

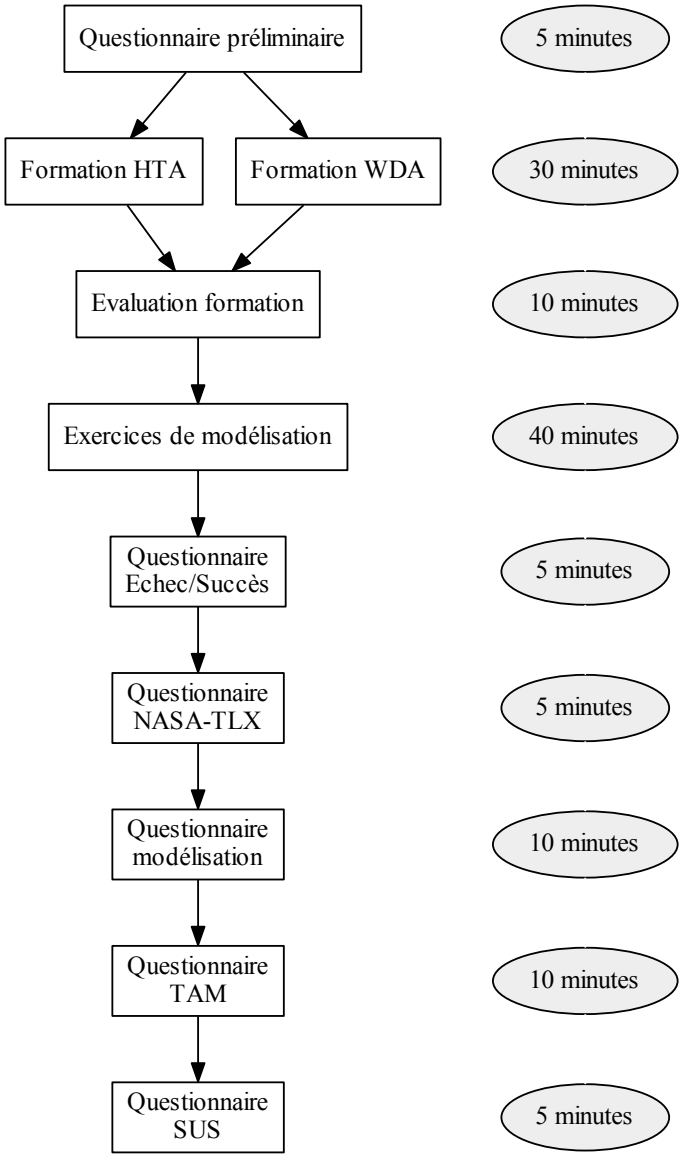


FIGURE 1.1 – Protocole expérimental de l'étude

Le premier questionnaire recueille le ressenti quant à l'échec ou la réussite perçu face aux exercices de modélisation. Les résultats sont exprimés par la verbalisation des participants.

Ensuite, le test NASA-TLX [45] est soumis aux participants (Annexe V.1.8). Il évalue la charge de travail perçue lors de la réalisation d'une tâche ou de l'utilisation d'un système. Elle permet de mesurer quantitativement les exigences physiques, mentales et temporelles ressenties d'une part, et de rendre compte de la performance, de l'effort de la frustration ressentis d'autre part. Le test NASA-TLX doit être soumis au maximum quinze minutes après la fin de la tâche pour

« *Pour se déplacer en avion, un voyageur doit effectuer un ensemble de tâches :*
- *Acheter un billet d'avion auprès de services d'achat en ligne, de bornes automatiques ou de comptoirs d'agence dédiés à l'aéroport*
- *S'enregistrer auprès de la compagnie grâce au service d'enregistrement en ligne (site Internet), de bornes automatiques ou aux comptoirs d'enregistrement dédiés*
- *Déposer ses éventuels bagages auprès des comptoirs d'enregistrement ou depuis un dispositif automatique de dépôt. Certaines compagnies proposent un service de récupération de bagages directement au domicile du voyageur*
- *Se soumettre aux contrôles de sécurité de l'aéroport*
- *Se présenter à la porte d'embarquement de son vol pour pouvoir accéder à l'avion*

L'ensemble de ces tâches doit respecter les règles de sécurité en vigueur (présentation de documents, délais à respecter, liste de produits prohibés, etc.).

L'aéroport est équipé de panneaux indicateurs et propose des kiosques d'information pour aider les voyageurs à s'orienter vers les services adéquats.

De manière générale, la satisfaction de l'expérience du voyageur doit être prise en compte durant l'ensemble ses activités. Par exemple, il s'agit de réduire les temps d'attente dans l'ensemble des tâches, d'assurer un niveau adéquat de confort, de réduire les niveaux de nuisance sonore ... »

TABLE 1.2 – Besoin exprimé par le client du système

être pertinent.

Un ensemble de questions directement lié aux exercices de modélisation est ensuite présenté aux participants (Annexe V.1.7). Il propose aux participants de décrire verbalement la manière dont ils ont utilisé les sources d'information pour modéliser le système. Le recueil des verbalisations de ces questions permet d'analyser davantage les processus mis en œuvre dans l'exploitation des méthodes présentées.

Le test TAM (Technology Acceptance Model) [29] recueille le point de vue subjectif des participants quant à l'utilité et la facilité perçues de la méthode utilisée (Annexe V.1.10). L'utilité perçue renvoie au niveau ressenti de l'amélioration de la performance par l'utilisation de la méthode. La facilité d'utilisation perçue se réfère à la force avec laquelle une personne croit que l'utilisation du système lui demandera peu ou pas d'efforts. Ces deux aspects permettent d'évaluer l'intérêt perçu de telles méthodes pour leur activité d'ingénierie système.

Le test SUS (System Usability Scale) [12] est un questionnaire qui mesure l'utilisabilité d'un système. Dans notre cas, ce test évalue l'utilisabilité de la mé-

thode (Annexe V.1.9). Il permet de mesurer l'efficacité, l'efficience et la satisfaction ressentie d'un participant quant à l'utilisation d'une méthode ergonomique. En ce sens, le test SUS est complémentaire du TAM.

L'ensemble des questionnaires est mené conjointement avec le recueil des verbalisations. Elles permettent de recueillir les justifications subjectives des réponses données.

1.1.4 Tests statistiques

Les scores obtenus par les participants sont évalués selon la moyenne ($\bar{x}$) et l'écart-type (σ). Ces deux moyens de mesure permettent de faire émerger une tendance globale et sa distribution au sein d'un même groupe.

Pour comparer la distribution des résultats, le test de Mann-Whitney [67] a été sélectionné (Annexe V.1.19). Il s'applique dans les cas où la taille des populations est faible et où les variables n'ont peut-être pas une distribution normale, ce qui est le cas de cette expérimentation. Il permet de vérifier si l'hypothèse « *la distribution des données est la même dans les deux groupes HTA et WDA* » est vraie ou non. Si l'hypothèse est vraie, alors les résultats générés sont répartis de la même façon, il n'y a pas de différences significatives entre l'utilisation des deux méthodes.

Le test de Spearman analyse la relation analyse la corrélation existence ou non entre deux variables quantitatives. Il sera utilisé pour vérifier la relation entre le test TAM et SUS qui étudient, de manière indépendante, la facilité perçue de l'utilisation des méthodes. Le test de Spearman s'applique dans le cas om le nombre de participants est faible et que la distribution des variables ne suit pas forcément une loi normale.

1.2 Résultats de l'expérimentation

Cette section analyse les modèles obtenus par les deux groupes. Les résultats permettront de répondre aux hypothèses émises en étudiant les critères de performance (temps d'exécution, sentiment d'échec ou de réussite et qualité des productions) et les critères subjectifs (perceptions de l'effort cognitif, de l'utilité de la méthode employée, facilité d'utilisation et charge de travail).

1.2.1 Évaluation des formations

Un questionnaire à choix multiples a été soumis aux participants afin de s'assurer de la bonne compréhension de la formation aux méthodes HTA et WDA (Annexe V.1.4). Dans les deux cas, le support de formation a été fourni. L'évaluation des connaissances sur la méthode HTA comporte neuf questions, et celle sur la méthode WDA en comprenait treize. Pour obtenir un même référentiel, les

notations ont été ramenées sur 20. Le graphique ci-dessous (Figure 1.2 montre les notes obtenues pour les deux groupes.

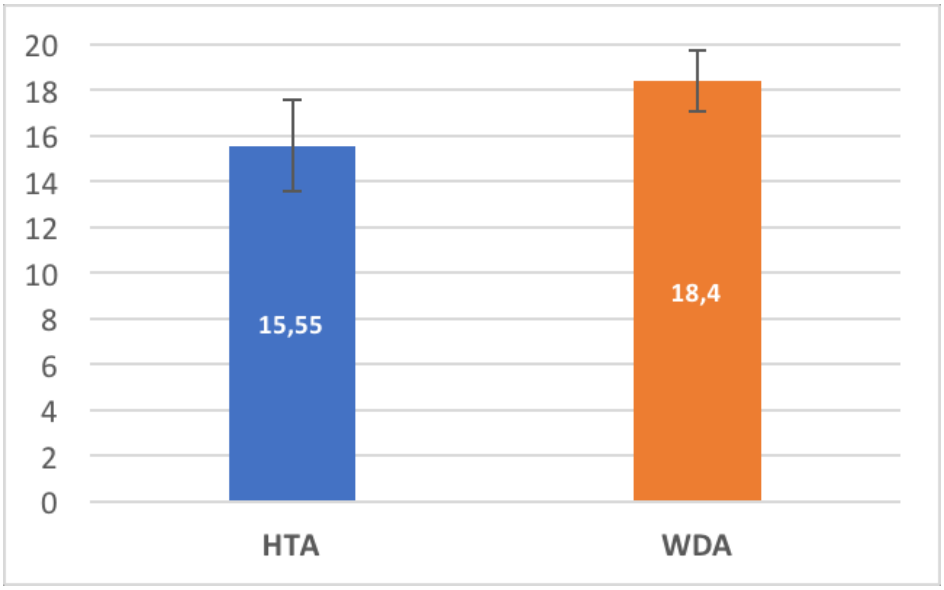


FIGURE 1.2 – Notes obtenues du contrôle des connaissances de la formation

Les groupe HTA et WDA ont de très bons résultats aux questionnaires relatifs à la compréhension de la formation, avec une faible variabilité (respectivement $\bar{x}_{hta} = 15,55$; $\sigma_{hta} = 2,1$ et $\bar{x}_{wda} = 18,4$; $\sigma_{wda} = 1,34$). À la vue de ces résultats, les participants ont convenablement compris les concepts des deux méthodes, et ils sont donc aptes à utiliser les méthodes pour les exercices de modélisation. Pour ne pas mettre les participants en difficulté, les supports de formation ont été mis à disposition pour l'ensemble de la passation.

1.2.2 Temps de réalisation

Quatre exercices de modélisation ont été organisés pour une durée totale de quarante minutes. Le premier exercice concernait la modélisation des exigences du système. Le deuxième exercice se concentrait sur la modélisation des cas d'utilisation. Les deux exercices suivants demandaient aux participants de rédiger textuellement des scénarios nominaux et dégradés relatifs à l'achat d'un billet d'avion.

Le temps de réalisation de chaque exercice a été mesuré afin d'évaluer la performance temporelle des participants. Le graphique suivant 1.3 présente la moyenne des temps consacrés pour les quatre exercices. À noter que les temps de réalisation du participant HTA-P3 n'ont pas été retenus pour les exercices, en effet ce participant n'a pas réalisé les deux derniers exercices.

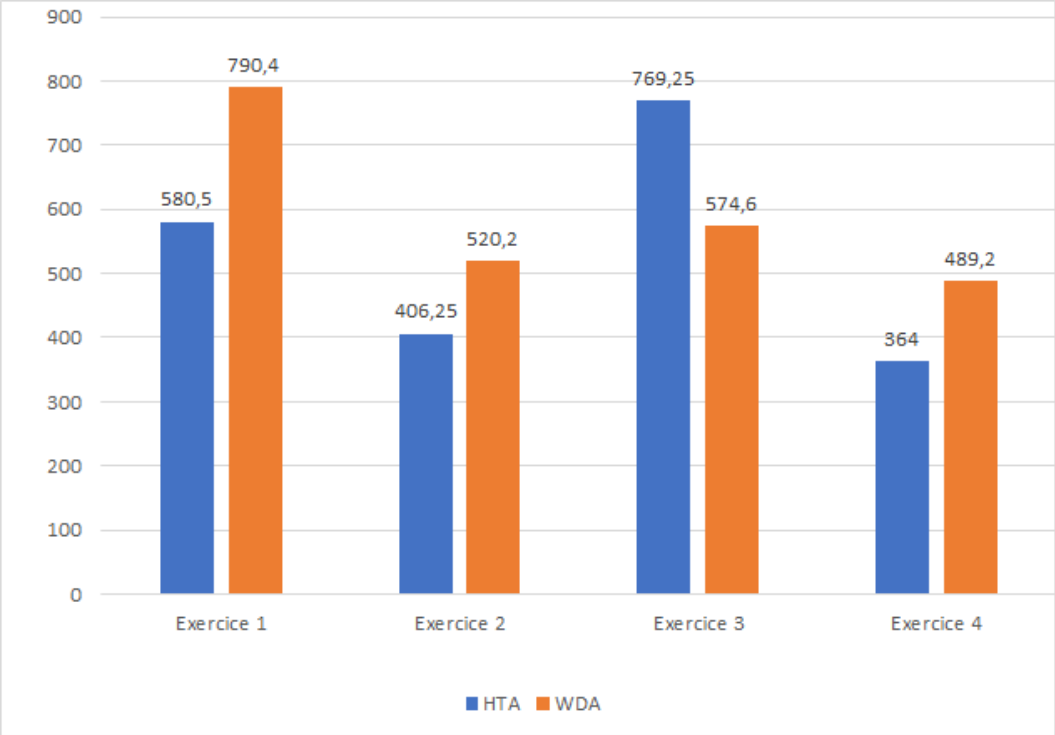


FIGURE 1.3 – Moyenne de temps de réalisation des exercices (en secondes)

Les temps de réalisation mesurés montrent que le groupe HTA a réalisé les exercices 1, 2 et 4 plus rapidement que le groupe WDA (respectivement 7 minutes 30 et 10 minutes en moyenne). À l'inverse, le troisième exercice a nécessité moins de temps pour le groupe WDA que le groupe HTA (respectivement 9 minutes 35 contre 12 minutes 48 en moyenne). Cependant, la variabilité pour les quatre exercices est forte, il est donc difficile de généraliser une tendance au sujet des temps de réalisation.

1.2.3 Sentiment de réussite ou d'échec

Le sentiment de réussite des participants est jugé très bon pour les deux groupes (Figure 1.4). Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que les exercices proposés ne présentent pas de difficultés particulières pour un ingénieur système. La modélisation des exigences, des cas d'utilisation et la rédaction de scénarios représentent des activités habituelles pour ces profils. Les résultats du participant HTA-P3 n'ont pas été pris en compte pour cette dimension pour les mêmes raisons que la mesure des temps de réalisation.

1.2.4 Qualité des productions

Pour répondre aux hypothèses posées, il est nécessaire d'évaluer les productions des participants. La méthode d'évaluation par les pairs a été retenue pour juger de la qualité des modèles. Cette section présente la méthode d'évaluation de la qualité des production ainsi que les résultats des modèles des exigences,

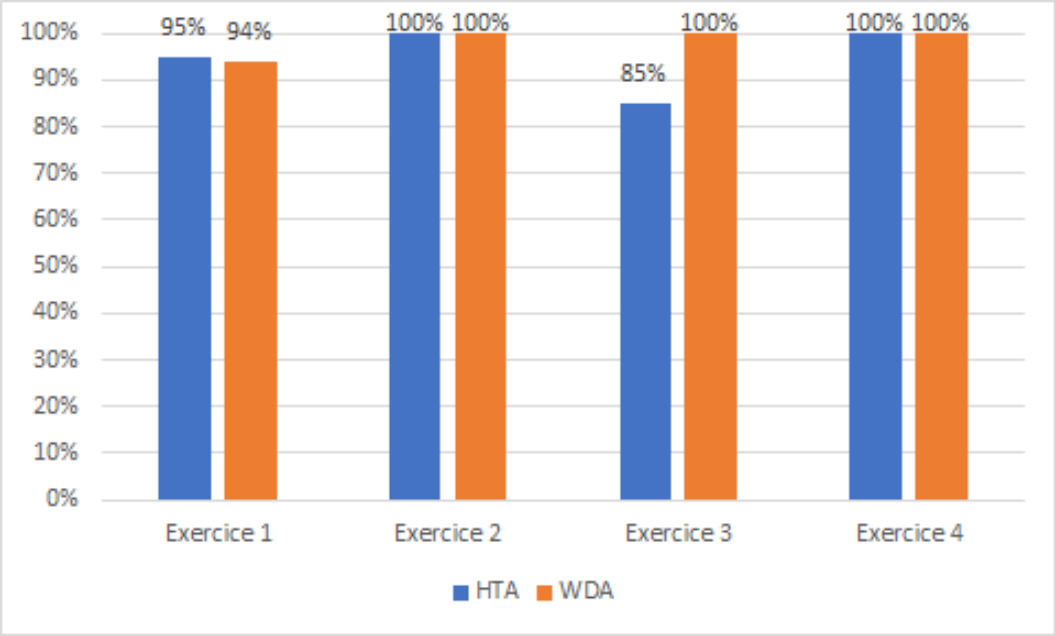


FIGURE 1.4 – Sentiment de réussite des participants

des cas d'utilisation et de la rédaction de scénarios nominaux et dégradés. Les modèles produits sont compilés dans les annexes (Annexe V.1.13).

La conception de systèmes traite de problèmes ouverts dans lesquels plusieurs solutions possibles et acceptables peuvent répondre un même problème. L'énoncé du besoin est peu détaillé et il ne fournit pas toutes les informations nécessaires à la résolution du problème. Pour ces raisons, il est difficile d'établir un modèle de référence qui permet de le comparer avec les productions des participants.

Modélisation des exigences

Une exigence « *prescrit une propriété dont l'obtention est jugée nécessaire. Son énoncé peut être une fonction, une aptitude, une caractéristique ou une limitation à laquelle doit satisfaire un système, un produit ou un processus* » [5]. Le besoin exprimé (Table 1.2) et les modèles HTA et WDA mettent en lumière un ensemble d'exigences à identifier et à modéliser.

Cette expérimentation est basée sur une description brève et peu détaillée d'un système, le niveau de granularité des besoins est faible. Il est donc demandé aux participants de modéliser les exigences à un haut degré d'abstraction.

Les exigences répondent à des critères de qualité (voir Chapitre 1.2.5 – *Processus de définition des exigences*). Parmi ces critères de qualité, certains sont difficilement applicables dans les conditions de l'expérimentation et, à la vue de

la brièveté du besoin exprimé, ils ne seront donc pas retenus pour juger la qualité des exigences. Les critères retenus sur le plan unitaire sont *la nécessité*, *la non-ambiguïté*, *la complétude*, et sur le plan global *la complétude* et *la cohérence*.

Les ingénieurs système organisent généralement les exigences selon différentes catégories. Outre les exigences fonctionnelles telles que l'achat de billet ou le dépôt de bagages, la description du système (Table 1.2) exprime la nécessité la prise en compte des aspects liés à l'expérience utilisateur : niveau de confort adéquat, réduction des nuisances sonores, aide à l'orientation. Des contraintes de sécurité doivent aussi être considérées. Ces différentes typologies d'exigences peuvent être organisées lors de la modélisation des exigences. Cette classification sert généralement à répartir l'effort de conception aux parties prenantes adéquats.

Pour l'exercice, trois catégories d'exigences ont été identifiées : « Exigences fonctionnelles », « Exigences facteurs humains » et « Contraintes ». Seul un participant de chaque groupe n'a pas catégorisé les exigences, et un participant du groupe WDA n'a modélisé que la catégorie « Exigences fonctionnelles ». Néanmoins, l'absence de catégorie ne préfigure pas l'absence d'exigences liées aux facteurs humains. Le participant WDA-P4 n'a effectivement pas catégorisé ses exigences bien que son modèle contienne des exigences de facteurs humains.

Plusieurs enseignements émergent à la vue des modèles d'exigences produits. Le tableau suivant (Table 1.3) synthétise les résultats obtenus pour la modélisation des exigences.

Les juges ont établi trois critères pour évaluer les exigences comme correctes, inférées ou surspécifiées. Les exigences inférées constituent des exigences qui ne sont pas explicitement énoncées dans le besoin ou dans les modèles HTA/WDA. Les exigences surspécifiées expriment des propriétés non exprimées sur des exigences correctes (comme par exemple le volume en décibel acceptable sur les nuisances sonores, cette valeur ni l'unité de mesure n'étant émises).

La ligne *Exigences organisées* indique le fait que le participant ait organisé ou non les exigences en catégorie.

Le groupe HTA a légèrement modélisé moins d'exigences jugées correctes que le groupe WDA, mais avec une variabilité importante ($\bar{x}_{hta} = 7,8$; $\sigma_{hta} = 4,15$) et ($\bar{x}_{wda} = 10$; $\sigma_{wda} = 2,65$). On constate également que le groupe HTA a eu davantage tendance à surspécifier des exigences, de manière assez uniforme ($\bar{x}_{hta} = 2,4$; $\sigma_{hta} = 1,67$) et ($\bar{x}_{wda} = 0,8$; $\sigma_{wda} = 0,83$). Enfin, peu d'exigences ont été inférées en général hormis pour le participant HTA-P1.

	HTA					WDA				
	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5
Exigences organisées	✓	✓	✓	×	✓	×	✓	✓	×	✓
Exigences correctes	2	10	12	10	5	7	9	14	11	9
- dont fonctionnelles	1	7	9	10	4	6	6	10	8	6
- dont FH	1	2	1	0	0	0	2	4	3	2
- dont contraintes	0	1	2	0	1	1	1	0	0	1
Exigences surspécifiées	4	2	2	0	4	0	1	0	2	1
- dont fonctionnelles	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0
- dont FH	4	2	0	0	0	0	1	0	2	1
- dont contraintes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Exigences inférées	7	0	2	0	1	0	0	0	0	1

TABLE 1.3 – Synthèse des cas d'utilisation modélisés

Modélisation des cas d'utilisation

Les cas d'utilisation décrivent les exigences comportementales d'un système avec ses acteurs externes [58]. Ils mettent en évidence les services rendus par le système avec lesquels un acteur interagit afin d'atteindre ses objectifs. Les modèles de cas d'utilisation sont caractérisés par trois composants : les acteurs, les cas d'utilisation eux-même et leurs associations. Ils sont formalisés en SysML par les diagrammes de cas d'utilisation [80].

Le tableau suivant présente les acteurs modélisés dans les diagrammes de cas d'utilisation (Table 1.4).

Au total, sept acteurs ont été modélisés. L'acteur principal *Voyageur* représente dix occurrences, montrant que l'intégralité des participants ont intégré cet acteur.

Pour le groupe HTA, on observe que seul le participant HTA-P2 a modélisé des acteurs secondaires (*Site Internet*, *Borne automatique*, *Comptoir* et *Porte d'embarquement*). Trois participants du groupe WDA ont modélisé des acteurs secondaires. En terme quantitatif, les deux groupes ont à peu près modélisé le même nombre d'acteurs.

Le tableau ci-dessous (Table 1.5) synthétise les résultats de la modélisation des cas d'utilisation, le détail étant adressé aux annexes (Annexe V.1.13). Le

Acteurs	**HTA**					**WDA**				
	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5
Voyageur	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Site Internet		✓								
Borne automatique		✓								
Comptoir		✓								
P. Embarquement		✓							✓	
Sécurité						✓		✓	✓	
Compagnie									✓	
Résultats	($\bar{x} = 1,8$; $\sigma = 1,78$)					($\bar{x} = 2$; $\sigma = 1,22$)				

TABLE 1.4 – Acteurs modélisés dans les cas d'utilisation

test Mann-Whitney montre que la distribution des résultats est identique dans les deux groupes (Annexe V.1.20).

Les cas d'utilisation ont été regroupés dès lors que leurs services sont semblables. Cependant, nous avons décidé que deux cas d'utilisation semblables mais avec des niveaux de détails différents constituent deux cas d'utilisation uniques. Par exemple, les cas d'utilisation *Retirer le billet* et *Génération d'un document* constituent deux cas d'utilisation différents, car même si le service est semblable, le niveau de détail est suffisamment important pour les différencier. Dans le premier cas, la génération d'un billet est un cas spécifique de la génération générale d'un document.

Cas d'utilisation	**HTA**					**WDA**				
	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5
Corrects	2	16	4	5	4	13	10	11	12	14
Surspécifiés	11	0	6	0	0	0	0	0	0	1
Inférés	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TABLE 1.5 – Synthèse des cas d'utilisation modélisés

Au total, vingt-quatre cas d'utilisation jugés corrects ont été modélisés. Les résultats montrent que les participants du groupe HTA modélisent deux fois moins de cas d'utilisation corrects que les participants du groupe WDA. Surtout, le groupe WDA affiche une très faible variabilité contrairement à l'autre groupe ($\bar{x}_{hta} = 6,2$; $\sigma_{hta} = 5,59$ et $\bar{x}_{wda} = 12$; $\sigma_{wda} = 1,58$). Hormis les participants HTA-P1 et HTA-P3, très peu de cas d'utilisation surspécifié ont été modélisés, pour aucun cas d'utilisation inféré.

En considérant que les cas d'utilisation *Acheter un billet, S'enregistrer, Déposer un bagage, Satisfaire le contrôle de sécurité* et *Embarquer* représentent les services principaux du système, la figure 1.5 montre que l'ensemble des services principaux a été modélisé par le groupe WDA. En revanche, le groupe HTA a modélisé 60% en moyenne de ces cas d'utilisation, avec seulement le participant HTA-P5 ayant modélisé l'ensemble de ces services.

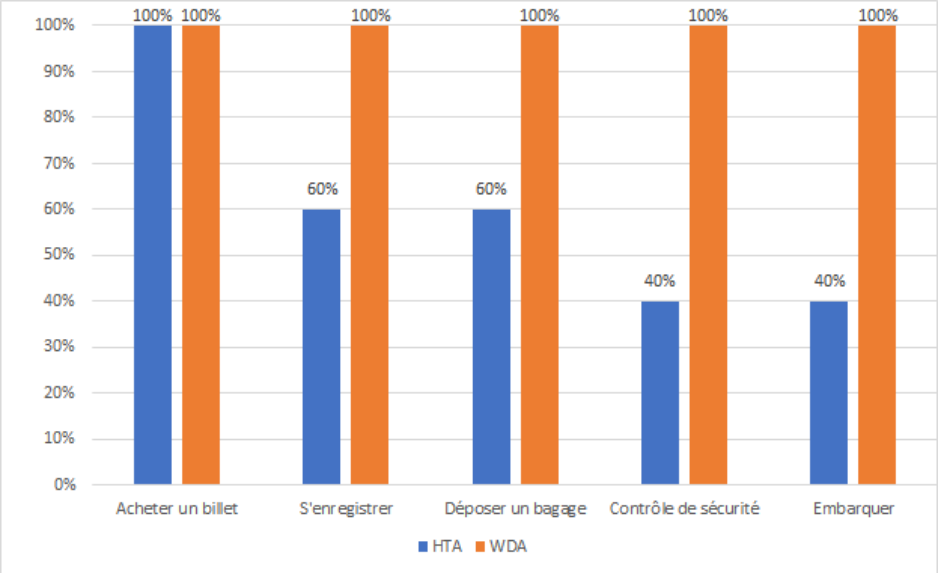


FIGURE 1.5 – Pourcentage de couverture des cas d'utilisation principaux

Rédaction des scénarios nominaux et dégradés

Il était demandé aux participants de rédiger des scénarios du système. L'intérêt de cet exercice est de recueillir les moyens mis en œuvre pour exploiter les sources d'information fournies aux participants pour faire émerger des situations de vie du système.

Les participants ont été invités à répondre à un questionnaire, en verbalisant leurs réponses (Annexe V.1.7). Les premières questions s'intéressent à l'utilisation ou non du modèle fourni, et d'attribuer un score sur la facilité ressentie de son utilisation, de 1 à 5 (de très difficile à très facile). Ces questions sont posées au sujet de la rédaction des scénarios nominaux puis des scénarios dégradés.

Contrairement aux exercices précédents, il n'était pas demandé aux participants de modéliser les scénarios en SysML. Ils devaient seulement rédiger, sous forme de brefs textes, le contexte et le contenu du scénario. Ce choix a été fait pour éviter aux participants de passer trop de temps et de trop rentrer dans les détails.

Le tableau suivant (Table 1.6) synthétise les résultats recueillis.

Scénarios nominaux	**HTA**					**WDA**				
	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5
Modèle HTA/WDA utilisé	✓	✓	×	✓	✓	×	✓	✓	×	✓
Facilité perçue (1 à 5)	5	4	-	3	4	3	5	3	3	5
Nombre de scénarios	5	3	-	3	3	3	3	3	5	8
Scénarios dégradés	**HTA**					**WDA**				
	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5
Modèle HTA/WDA utilisé	×	×	×	×	×	×	×	✓	×	✓
Facilité perçue (1 à 5)	-	-	-	-	-	-	-	3	-	5
Nombre de scénarios	3	2	-	2	4	2	3	3	9	6

TABLE 1.6 – Résultats de la rédaction des scénarios nominaux et dégradés

Concernant les scénarios nominaux, il est à noter que le participant HTA-P3 n'a pas réalisé cet exercice par manque de temps. De plus, il est difficile de juger quantitativement les résultats obtenus, en raison de la forme de rédaction des scénarios qui est très inégale suivant les participants. Néanmoins, les verbalisations permettent de faire émerger des aspects qualitatifs.

Tout d'abord, les participants du groupe HTA ont répondu unanimement sur le fait que la modèle de tâche ressemble fortement aux modèles qu'ils utilisent régulièrement en ingénierie système. Ils ont parcouru le modèle et développé différents scénarios lorsque plusieurs choix se présentent aux voyageurs pour préparer leur vol (s'enregistrer en ligne ou sur place, bagage à déposer ou non etc.).

Pour le groupe WDA, les deux stratégies « bottom-up » et « top-down » ont été mises en place. La première se concentrait d'abord sur les fonctions généralisées puis sur les alternatives proposées par le niveau inférieur. La seconde stratégie recensait les formes physiques disponibles permettant de se représenter leur rôle dans le domaine de travail.

Au sujet des scénarios dégradés, aucun participant du groupe HTA n'a utilisé son modèle de la tâche. En effet, ils se sont tous appuyés sur l'exploitation des cas d'utilisation et des scénarios nominaux pour rédiger les potentialités d'échec de ces derniers. Une des explications possibles suggérées par le participant HTA-P2 est que le modèle ne présente pas explicitement les fautes éventuelles.

L'utilisation de l'analyse du domaine du groupe WDA pour la rédaction des scénarios dégradés présente des résultats différents. Trois participants n'ont pas

utilisé l'analyse du domaine pour les raisons semblables au groupe HTA. Comme eux, ils ont fondé leur raisonnement à partir des cas d'utilisation et des scénarios nominaux.

En revanche, les participants WDA-P1 et WDA-P3 ont utilisé l'analyse du domaine. Les verbalisations, présentées ci-dessous, montrent qu'ils se sont tous les deux concentrés sur le cinquième niveau de la hiérarchie d'abstraction pour identifier les dispositifs physiques qui pouvaient être défectueux. Ils ont ensuite adopté un raisonnement « bottom-up », qui consiste à parcourir la hiérarchie d'abstraction à partir des fonctions physiques et à remonter aux niveaux supérieurs pour identifier des situations problématiques supplémentaires.

> WDA-P1, concernant les scénarios dégradés : « *j'ai utilisé le niveau des fonctions généralisées qui en fait permet de retranscrire très bien les tâches finales. Et ensuite, pour les scénarios dégradés, je regardais les dispositifs physiques qui pouvaient être en panne, et là je remontais. Là aussi* [en montrant le 4ème niveau] *je les mettais ensemble. Et après, ça dépend comment on décrit le scénario, c'est un des deux.* »

> WDA-P3, concernant les scénarios dégradés : « *Oui, j'ai regardé en fin de compte la cinquième couche, tout ce qui est dispositif physique, pareil pour les scénarios dégradés. Je me suis dit, est-ce que les panneaux indicateurs peuvent être défectueux, ou est-ce que le site Internet peut être défectueux. J'ai réfléchi en bottom-up en fin de compte. Et je me suis un petit peu intéressé aux quatre couches, mais d'une manière générale j'ai quand même regardé plus la couche physique qui m'a plus parlée. Il y a aussi des couches qui m'ont plus parlé, comme la couche 3, qui sont en fait pour nous les différentes fonctions à accomplir pour répondre aux besoins du système. Du coup, oui je me suis servi de l'analyse du domaine, ça c'est sûr.* »

Interprétation des résultats des modèles produits

L'évaluation des modèles fait émerger une tendance globalement positive pour l'analyse du domaine.

Au niveau des exigences, les deux groupes ont modélisé à peu près le même nombre d'exigences jugées correctes, mais avec une plus faible variabilité pour le groupe WDA. Surtout, le groupe WDA a modélisé bien plus d'exigences liées aux facteurs humains que le groupe HTA. Ce résultat est intéressant pour la prise en compte des aspects humains dans le système.

La différence entre les deux groupes est mise en lumière pour les cas d'utilisation puisqu'ils ont tous modélisé les cas d'utilisation principaux du système, avec un niveau de détail supérieur. Les verbalisations montrent que leur identification est facilitée car les services du système sont tous exposés au niveau des fonctions généralisées.

Enfin, l'évaluation des scénarios opérationnels est difficile compte tenu de l'absence de modèles pour un participant du groupe HTA. A priori, l'analyse de la tâche est appropriée pour cet exercice car elle met en avant la séquence des actions à réaliser et leurs alternatives. Toutefois, le groupe WDA a obtenu des résultats à peu près similaires pour les participants qui ont utilisé la hiérarchie d'abstraction, son parcours ascendant et descendant ayant permis de faire émerger des scénarios nominaux et dégradés.

1.2.5 Test NASA-TLX

Le test NASA-TLX [45] est une méthode de mesure subjective de la charge globale de travail. Il se compose de six items spécifiques, chacun comprenant une échelle d'évaluation sur laquelle le participant indique son ressenti face à l'aspect mesuré. Les trois premières dimensions représentent les astreintes imposées au sujet par la tâche : exigences physiques, mentales et temporelles. Les trois autres rendent compte des interactions du sujet avec la tâche : performance, effort et frustration. L'échelle est graduée de vingt cases, mais ne contient qu'un indicateur à chaque extrémité de l'importance de la note afin de ne pas influencer le participant. Outre l'évaluation quantitative, les justifications verbales des participants permettent d'améliorer la compréhension des réponses données.

D'après Cegarra [26], la version francophone du NASA-TLX conserve une corrélation forte entre le score pondéré et le score moyenné. En effet, malgré le fait que certaines dimensions sont plus importantes que d'autres, le calcul de la moyenne des six dimensions reste pertinent.

Groupe HTA

Les résultats suivants (Figure 1.6) présentent les scores moyens obtenus du groupe HTA pour chaque question du test NASA-TLX.

Tout d'abord au niveau de l'exigence mentale, le score obtenu indique que l'utilisation de la méthode HTA n'implique pas une réflexion importante ($\bar{x}_{hta} = 35$; $\sigma_{hta} = 16,50$).

L'exigence physique faible ($\bar{x}_{hta} = 22$; $\sigma_{hta} = 25,39$) résulte du fait que l'activité demandée ne consistait qu'à écrire sur une feuille. L'écart-type important s'explique par la difficulté ressentie par le participant HTA-P2 de rédiger sur papier, ce qu'il n'a plus l'habitude de faire.

Le score important et l'analyse des verbalisations concernant l'exigence temporelle montrent que les participants ont ressenti une pression temporelle importante ($\bar{x}_{hta} = 69$; $\sigma_{hta} = 15,57$) due à un manque de temps pour réaliser les tâches. Cette pression temporelle n'a toutefois pas empêché quatre participants de compléter les exercices, le dernier n'ayant pu qu'accomplir les deux premiers.

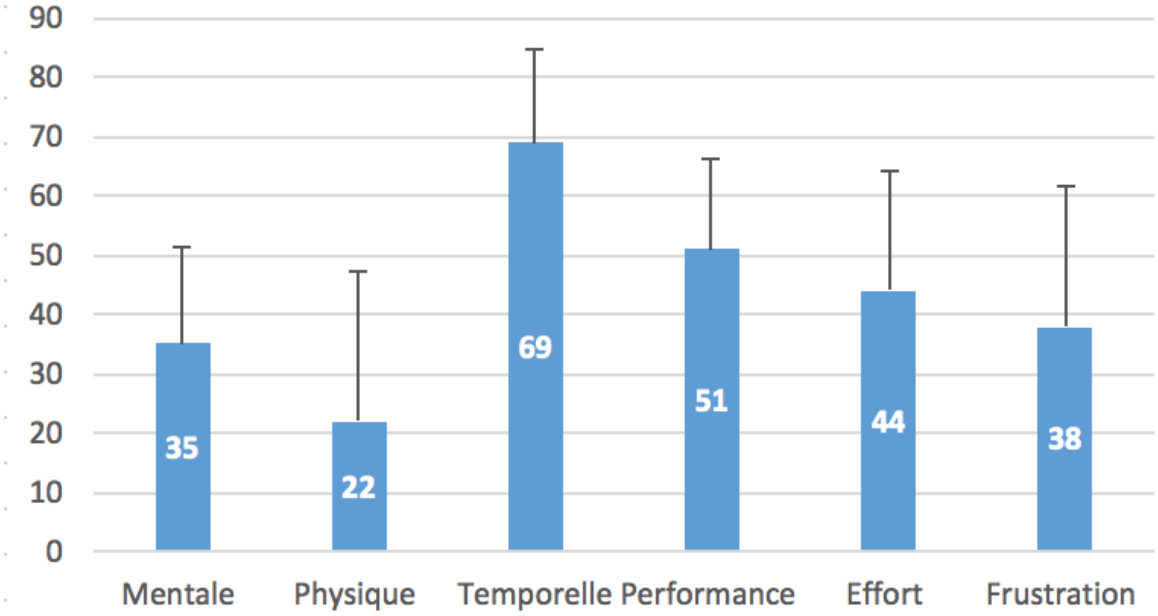


FIGURE 1.6 – Moyenne des résultats du groupe HTA du test NASA-TLX

Le sentiment de performance est neutre ($\bar{x}_{hta} = 51$; $\sigma_{hta} = 15,16$). Ce score s'explique par deux aspects. Tout d'abord, les participants verbalisent une satisfaction de leur production mais regrettent le temps imparti insuffisant pour améliorer leurs solutions. Ensuite, on note que le participant HTA-P5 a jugé sa performance très faible, car il considère que sa réponse à l'exercice 3 est hors-sujet. En réalité, il a modélisé les scénarios nominaux en utilisant un diagramme d'activité, et non en rédigeant succinctement le scénario comme demandé. Ces scénarios sont malgré tout utilisables pour l'analyse de sa production, seul le formalisme diffère et non le contenu.

Concernant le ressenti de l'effort, la moyenne du test obtient un score relativement neutre ($\bar{x}_{hta} = 44$; $\sigma_{hta} = 20,43$). Les verbalisations ne montrent pas de tendance globale ou d'explication sur les résultats obtenus.

Le score moyen du ressenti de la frustration est relativement bas mais assez disparate ($\bar{x}_{hta} = 38$; $\sigma_{hta} = 23,61$). Les deux participants HTA-P2 et HTA-P3 ont ressenti un sentiment de frustration évalué respectivement à 60 et 65. Le premier a exprimé un sentiment de stress face à la pression temporelle qui l'a gêné pour son travail, le second a exprimé sa frustration due au fait de ne pas avoir fait les deux derniers exercices. Quant aux trois autres participants, ils ont exprimé une faible frustration (entre 10 et 30).

Groupe WDA

Les résultats suivants (Figure 1.7) présente les scores moyens obtenus par le groupe WDA.

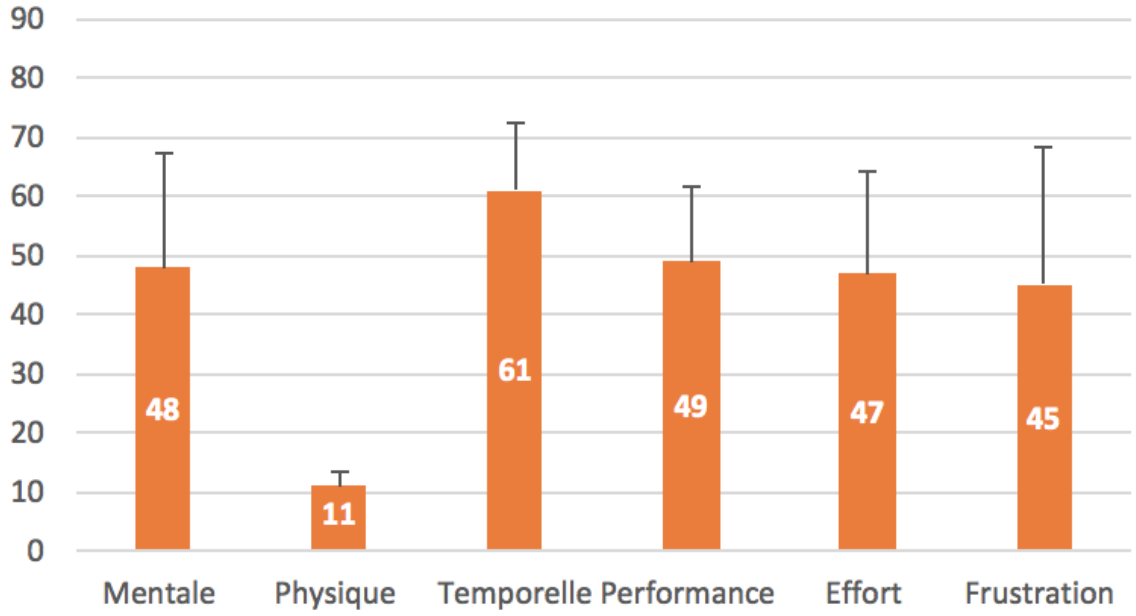


FIGURE 1.7 – Moyenne des résultats du groupe WDA du test NASA-TLX

Les exigences mentales ont été évaluées avec un score moyen, mais hétérogène ($\bar{x}_{wda} = 48$; $\sigma_{wda} = 19,23$). Les trois participants WDA-P3, WDA-P4 et WDA-P5 ont exprimé un ressenti neutre (entre 40 et 60). Le participant WDA-P1 exprime une charge mentale élevée (score de 70) face au caractère nouveau de la méthode qui lui a demandé un effort de réflexion et d'adaptation important. Il juge néanmoins avoir réussi son travail. Le participant WDA-P2 considère sa charge mentale comme faible, avec un score de 20. Il ne formule pas verbalement de justification.

Les résultats au sujet des exigences physiques sont semblables au groupe HTA ($\bar{x}_{wda} = 11$; $\sigma_{wda} = 2,23$), les participants jugeant unanimement que la méthode requiert peu d'exigences physiques.

Les participants jugent que la pression temporelle est relativement moyenne ($\bar{x}_{wda} = 61$; $\sigma_{wda} = 11,40$). Dans l'ensemble, les participants n'ont pas exprimé de difficulté significative sur ce point hormis la nécessité de contrôler le temps imparti.

Le sentiment de performance est moyen et uniformément exprimé par les participants ($\bar{x}_{wda} = 49$; $\sigma_{wda} = 12,44$). Plusieurs participants ont émis des réserves quant à leur sentiment de performance. En effet, la méthode étant nouvelle, ils n'ont que peu de repères pour évaluer la performance. Ce sentiment est exprimé par la verbalisation suivante.

L'évaluation de l'effort demandé récolte un score moyen ($\bar{x}_{wda} = 47$; $\sigma_{wda} = 17,17$). Les verbalisations montrent que les exercices de modélisation demeurent

habituels, mais la nouveauté de la méthode et le temps limité ont contribué à accroître l'effort, sans toutefois être oppressant.

Enfin, la frustration ressentie a été exprimée en moyenne à un niveau neutre mais de manière hétérogène ($\bar{x}_{wda} = 45$; $\sigma_{wda} = 23,18$). Le participant WDA-P3 verbalise sa frustration, évaluée à 75, par la difficulté d'appréhension de la nouvelle méthode et aux différences conceptuelles face aux méthodes habituelles d'ingénierie système. En revanche, le participant WDA-P4 juge sa frustration faible (score de 10), mais ne justifie pas sa réponse dans les verbalisations. Les trois autres participants jugent de manière neutre leur frustration, en exprimant tout de même le manque de temps pour réaliser les exercices.

Interprétation du test NASA-TLX

Le graphique suivant (Figure 1.8) compare les résultats du test NASA-TLX pour les deux groupes.

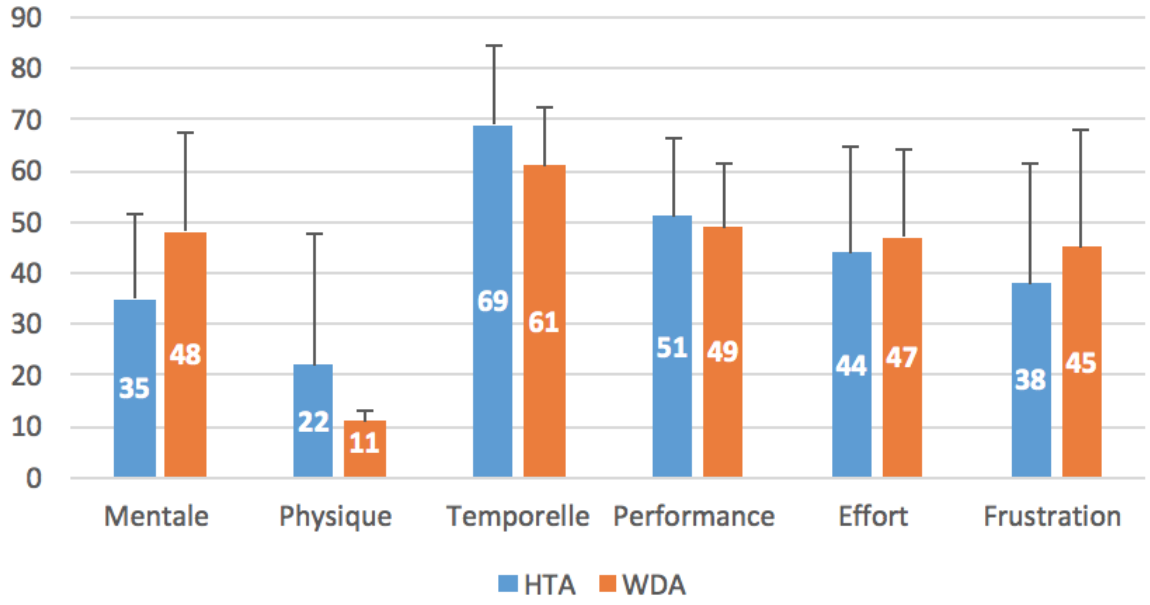


FIGURE 1.8 – Comparaison des résultats du test NASA-TLX

Afin de comparer la distribution des résultats du test NASA-TLX, le test non-paramétrique de Mann-Whitney a été utilisé puisque le nombre de participants est faible et les variables n'ayant pas une distribution normale. L'hypothèse à vérifier est *H0 : la distribution des données est la même dans les deux groupes*. Les résultats du test montre que l'hypothèse est valide (Annexe V.1.20). Cela signifie que les résultats sont répartis de la même façon pour chaque dimension du test NASA-TLX, et qu'il n'y a pas de différences significatives entre l'utilisation des deux méthodes.

On observe que les participants des deux groupes ont obtenu des résultats relativement similaires pour les dimensions du NASA-TLX qui traitent des interactions du sujet avec la tâche (performance, effort et frustration).

Pour les dimensions en lien avec les astreintes imposées au sujet (exigences mentales, physiques et temporelles), on observe quelques différences. L'exigence mentale est plus élevée pour l'utilisation de l'analyse du domaine du fait de la nouveauté de la méthode comme le suggèrent les verbalisations. La différence au niveau des exigences temporelles s'explique principalement par le fait qu'un participant n'est pas terminé les deux derniers exercices. En ne le considérant pas, les ressentis de cette dimension restent analogues pour les deux groupes.

1.2.6 TAM

Le test TAM [29] est une méthode d'évaluation subjective de l'utilité perçue et de la facilité d'utilisation perçue d'un système ou d'une méthode. Il est composé de seize questions, chacun de ces deux aspects étant traité par huit questions. L'échelle de lecture des réponses est présentée ci-dessous (Figure 1.9). Les scores possibles sont échelonnés de 1 (« pas du tout d'accord ») à 7 (« tout à fait d'accord »), le score 4 indiquant une réponse neutre.

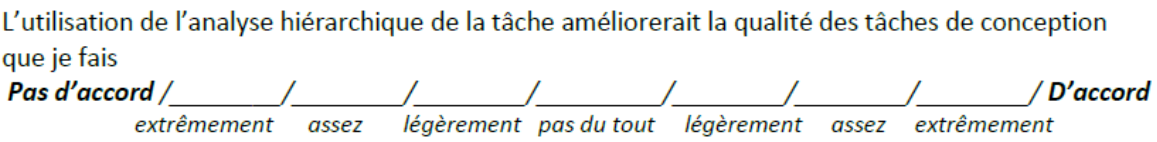


FIGURE 1.9 – Exemple d'une question du test TAM

Groupe HTA

Les résultat suivants (Figure 1.10) présentent les résultats obtenus par le groupe HTA pour les seize questions du test TAM.

Au sujet de l'utilité perçue, les participants ont majoritairement répondu avec un fort taux d'acceptation aux questions portant sur la qualité des tâches de conception ($\bar{Q}1_{hta} = 6$, $\sigma_{hta} = 0$), sur la qualité des livrables ($\bar{Q}2_{hta} = 6$, $\sigma_{hta} = 0,70$), sur la productivité ($\bar{Q}3_{hta} = 5,4$, $\sigma_{hta} = 1,34$), l'efficacité ($\bar{Q}6_{hta} = 5,6$, $\sigma_{hta} = 1,52$), la facilité ($\bar{Q}7_{hta} = 5,8$, $\sigma_{hta} = 0,84$) et l'utilité dans la réalisation des tâches de conception ($\bar{Q}8_{hta} = 6$, $\sigma_{hta} = 0,70$).

> HTA-P1, concernant la question 3 : *« Je pense que ça ne fait pas gagner de temps, ça permet juste d'être sûr que le résultat soit bon. Mais ça demande du temps pour le faire. C'est plutôt une question de qualité, je pense. »*

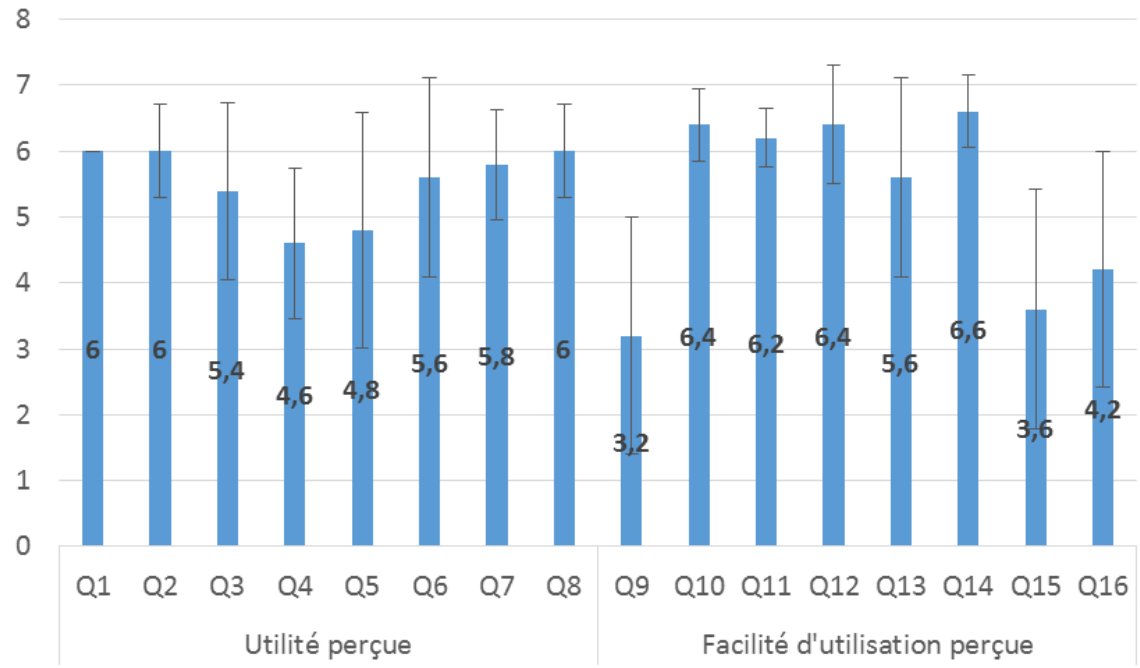


FIGURE 1.10 – Résultat du groupe HTA pour le test TAM

La quatrième question porte sur la prise en charge des aspects essentiels des tâches de conception. En moyenne, les participants ont répondu « légèrement d'accord » ($\bar{Q}4_{hta} = 4,6$, $\sigma_{hta} = 1,14$). Certains participants verbalisent le fait que l'analyse de la tâche ne répond que partiellement aux problématiques de l'ingénierie système. Cette méthode se concentre principalement sur les aspects fonctionnels comme le suggère la verbalisation suivante.

> HTA-P2, concernant la question 4 : *« Légèrement, quand même parce que c'est très fonctionnel. Mais on doit prendre d'autres aspects comme le non-fonctionnel. On doit gérer les interfaces, les conceptions à plus bas niveaux. C'est assez séquentiel et si on doit avoir des scénarios plus compliqués, j'ai un doute si ça permet de couvrir ces aspects ou pas. »*

La cinquième question porte sur la couverture d'aspects que les ingénieurs système ne rencontrent pas habituellement. Les participants ont répondu en moyenne « légèrement d'accord » ($\bar{Q}5_{hta} = 4,8$, $\sigma_{hta} = 1,79$). Comme expliqué précédemment, la méthode HTA est conceptuellement proche des méthodes classiques d'ingénierie système. À leur sens, elle apporte peu de nouveautés par rapport à ce que les ingénieurs font habituellement. Quelques participants mettent néanmoins en avant la nouveauté du formalisme portée par le HTA.

En ce qui concerne la seconde partie du questionnaire au sujet de la facilité d'utilisation perçue, plusieurs tendances se dessinent.

Les participants sont « extrêmement d'accord » pour les questions portant sur la difficulté d'apprentissage du HTA ($\bar{Q10}_{hta} = 6,4$, $\sigma_{hta} = 0,55$), sur la facilité d'utilisation du HTA en complément de l'ingénierie système $\bar{Q11}_{hta} = 6,2$, $\sigma_{hta} = 0,45$), sur la clarté et la compréhension de la méthode $\bar{Q12}_{hta} = 6,4$, $\sigma_{hta} = 0,90$) et sur la facilité de réutilisation de la méthode $\bar{Q14}_{hta} = 6,6$, $\sigma_{hta} = 0,55$). Les participants justifient ces réponses par la similarité de la méthode avec celles de l'ingénierie système. La mise en œuvre du HTA relèverait d'une certaine facilité pour les participants.

Les participants ont été « assez d'accord » pour la question portant sur la souplesse de la méthode $\bar{Q13}_{hta} = 5,6$, $\sigma_{hta} = 1,52$). Les participants HTA-P1 et HTA-P2 soulèvent par exemple le manque d'outils pour manipuler le modèle et maintenir une cohérence entre le modèle de tâche et le modèle du système au cours de la vie du projet.

> HTA-P1, concernant la question 13 : *« Ça dépend en fait, tant que ce n'est pas outillé ce n'est pas forcément souple, parce que toutes les analyses graphiques comme ça, on va rajouter quelque chose au milieu. On casse tout de son arbre. Tant que ce n'est pas outillé, c'est pas facile. Quand on a le résultat ça paraît simple »*

> HTA-P2, concernant la question 13 : *« Je pense que chaque fois on peut l'adapter au niveau du détail. Si on le fait au niveau de la conception, s'il y a un changement, je me demande si c'est assez souple car il faut aussi le modifier et le maintenir. Je dirais assez »*

Le ressenti de l'effort pour acquérir de l'habilité à utiliser la méthode HTA recueille en moyenne un avis neutre, mais partagé $\bar{Q16}_{hta} = 4,2$, $\sigma_{hta} = 1,79$). Les participants HTA-P3 et HTA-P5 (score de 3 et 2 respectivement) déclarent que la méthode ne demande pas d'efforts pour être utilisée. Pour les autres participants, davantage de pratique semble nécessaire.

Les deux dernières questions (Q9 et Q15) portent sur l'effort mental et la lourdeur ressentie face à l'utilisation de la méthode. Les participants ont en moyenne répondu « pas du tout » qui s'explique encore une fois par l'analogie entre les méthodes d'ingénierie et le HTA.

Groupe WDA

Les résultats suivants (Figure 1.11) présentent les scores obtenus au test TAM pour l'utilisation du WDA.

La première partie du test TAM traitant des ressentis liés à l'utilité perçue montre plusieurs tendances.

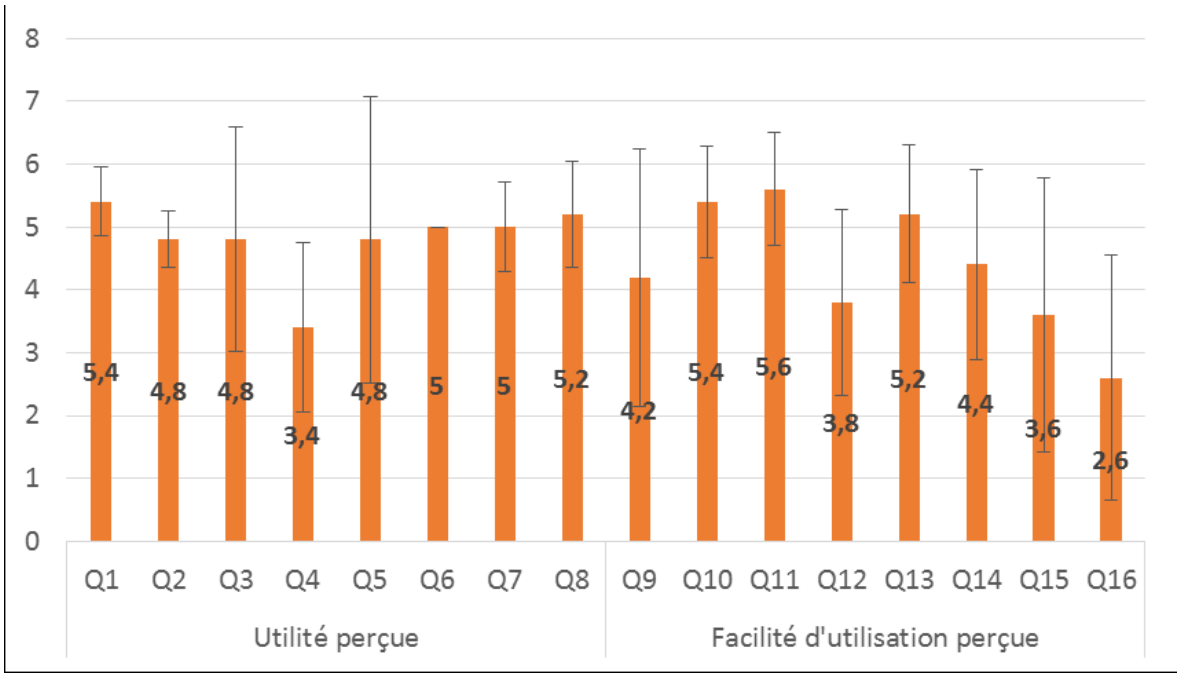


FIGURE 1.11 – Résultat du groupe WDA pour le test TAM

Les participants sont « assez d'accord » concernant l'amélioration de la qualité de la conception ($\bar{Q}1 = 5,4$; $\sigma = 0,54$) et de l'utilité de la méthode ($\bar{Q}8 = 5,2$; $\sigma = 0,83$). Ils pensent que la méthode est pratique et utile, avec laquelle on peut se référer, et qui ajoute une vue supplémentaire pour les méthodes MBSE. Ils trouvent cette méthode plus visuelle avec une meilleure représentation des problématiques de l'aspect physique et opérationnel du système. Ils considèrent que la méthode constitue un modèle de traçabilité.

> WDA-P1, concernant la question 1 : « *Je pense légèrement d'accord parce que ça permet d'apporter une autre vue, en IS on a déjà un certain nombre de vue, là cela rajoute une vue supplémentaire qui va certainement bien compléter ce qu'on a déjà. Après j'ai mis légèrement, car les concepts, même s'ils ont des noms différents on les retrouve à peu près, comme ça a été dit dans la formation, donc je ne suis pas sûr comme ça qu'il y ait beaucoup de choses en plus.* »

> WDA-P2, concernant la question 8 : « *Ça peut m'être utile, oui. En termes de temps, ça donne rapidement un aspect visuel au système. Ça facilite pour voir les mots-clés. Un peu comme les systèmes d'ontologie en MBSE, c'est un peu similaire, ça permet d'avoir plusieurs vues d'un système, une combinaison de vues. Du coup, légèrement d'accord.* »

Dans le même esprit, les participants sont tous « légèrement d'accord ($\bar{Q}2 = 4,80$; $\sigma = 0,44$) avec l'idée que le WDA améliore la qualité des livrables. Le participant suggère l'idée que le WDA apporte un nouveau point de vue qui a le potentiel de compléter les vues existantes en ingénierie système.

La question 3 (amélioration de la productivité) est assez approuvée par quatre participants ($\bar{Q}3 = 4,8$; $\sigma = 1,78$). Seul le participant WDA-P4 est en désaccord avec cette idée ($Q3_{\text{WDA-P4}} = 2$). Il situe l'apport du WDA dans la qualité, et non dans la productivité. Pour la question relative à l'efficacité de la méthode, les participants sont unanimement « assez d'accord » pour qualifier la méthode comme telle.($\bar{x} = 6$; $\sigma = 0$).

Les participants ont répondu unanimement « légèrement d'accord » avec le fait que le WDA faciliterait les tâches de conception ($\bar{Q}7$ = 5 ; écart-type = 0,70 ; $v_{min} = 4$ et $v_{max} = 6$). Deux aspects sont soulevés par les participants. Tout d'abord, les participants rencontrent des difficultés à juger cet aspect n'ayant que peu d'expérience avec cette méthode, mais ils sont généralement d'accord sur son potentiel. Ensuite, le formalisme sous forme d'arbre hiérarchique apporte un confort visuel pour certains participants. Ils trouvent rapidement l'information nécessaire en parcourant l'arbre.

Les participants sont en moyenne « légèrement d'accord » avec la question 5 traitant de la prise en charge d'aspects rencontrés inhabituellement, mais avec une forte variabilité dans le groupe ($\bar{x} = 4,8$; $\sigma = 2,28$). Malheureusement, les participants ont peu justifié leurs réponses.

La question 4 porte sur la couverture des aspects essentiels des tâches de conception. Les résultats montrent que la méthode est jugée comme neutre en moyenne ($\bar{x} = 3,4$; $\sigma = 1,34$). Avec un score de 2, les participants WDA-P3 et WDA-P4 sont « assez en désaccord » avec cet aspect. Ils trouvent la méthode insuffisamment « *factuelle* » et souligne le fait qu'elle complète plus qu'elle ne remplace les méthodes habituelles d'ingénierie système. Les autres participants partagent le sentiment que la méthode couvre l'analyse au niveau fonctionnel, mais ne permet pas d'étudier les aspects non-fonctionnels.

La seconde partie du questionnaire porte sur la facilité d'utilisation de la méthode.

Les participants sont « légèrement d'accord » avec à la question 10 liée à la facilité d'apprentissage, avec une faible variabilité ($\bar{Q}10 = 5,4$; $\sigma = 0,89$). Malgré quelques difficultés, les participants aboutissent aux exercices. De la même manière, la question 13 concernant la souplesse de la méthode obtient une légère faveur des participants ($\bar{Q}13 = 5,2$; $\sigma = 1.09$).

> WDA-P1, concernant la question 10 : *« Non ce n'est pas facile au début à appréhender, on voit les rapports avec l'ingénierie système, on comprend comment ça fonctionne, c'est assez simple. Après je pense qu'il y a certaines notions qui sont vraiment différentes de l'ingénierie système même si on peut raccorder. Il y a toujours des parallélismes, c'est quand même quelque chose qu'il faut apprendre à maîtriser. »*

WDA-P2, concernant la question 10 : *« Oui et non. J'ai principalement utilisé pour les scénarios fonctionnels, les 3ème et 5ème lignes. Après, c'est utile pour tout ce qui concerne l'humain, les contraintes etc. L'utilisation est quand même assez facile. Ça dépend certainement du système. Après, ça s'apprend assez vite. »*

D'après les participants, la méthode WDA semble complémentaire aux méthodes d'ingénierie système. En moyenne, ils sont « légèrement d'accord » avec une faible variabilité ($\bar{Q11} = 5,6$; $\sigma = 0,89$). Comme le montre la verbalisation précédente, cette méthode permet de mieux mettre en lumière les aspects humains et les contraintes. Elle montre également des avantages pour la traçabilité du modèle.

L'utilisation de la méthode a été qualifiée de lourde pour quatre participants, contre un avis contraire ($\bar{Q9} = 4,2$; $\sigma = 2,04$). Pour ces quatre participants, la moyenne est établie à 5, c'est-à-dire qu'ils sont « légèrement d'accord » pour dire que la méthode est lourde. Une crainte est exprimée face à l'accroissement de la lourdeur de la méthode face à la complexité des systèmes. Le participant jugeant la méthode très peu lourde à utiliser n'a pas apporté de justifications particulières.

WDA-P2, concernant la question 9 : *« C'est pas super bien détaillé mais après, si on commence à détailler, il peut y avoir énormément de flèches, c'est pas le cas ici mais peut-être que pour les systèmes plus complexes, ça peut devenir très lourd, style plat de spaghettis. Du coup, ça fait neutre, au milieu. Ça dépend vraiment du système en question plus que de l'analyse du domaine. »*

Globalement neutre, les résultats indiquent que les participants sont moyennement convaincus de la clarté et de la compréhension de la méthode ($\bar{Q12} = 3,8$; $\sigma = 1,48$). Outre la mauvaise évaluation du participant WDA-P4 donnée en raison du temps de formation estimée faible, les autres participants expriment le fait de ne pas avoir compris l'ensemble des niveaux de la hiérarchie d'abstraction, particulièrement le quatrième niveau (« Fonction Physique »). Comme expliqué précédemment, les participants auraient souhaité davantage de temps de formation à la méthode.

Interprétation du test TAM

Le graphique suivant (Figure 1.12) compare les résultats obtenus pour le test TAM pour les deux groupes. Le test de Mann-Whitney, de nouveau été utilisé pour étudier la distribution des deux groupes, montre que la distribution des données est la même dans les deux groupes.

Il y a peu d'écart en moyenne entre les réponses des deux formations. Le groupe HTA est légèrement mieux côté par les participants, cette tendance est

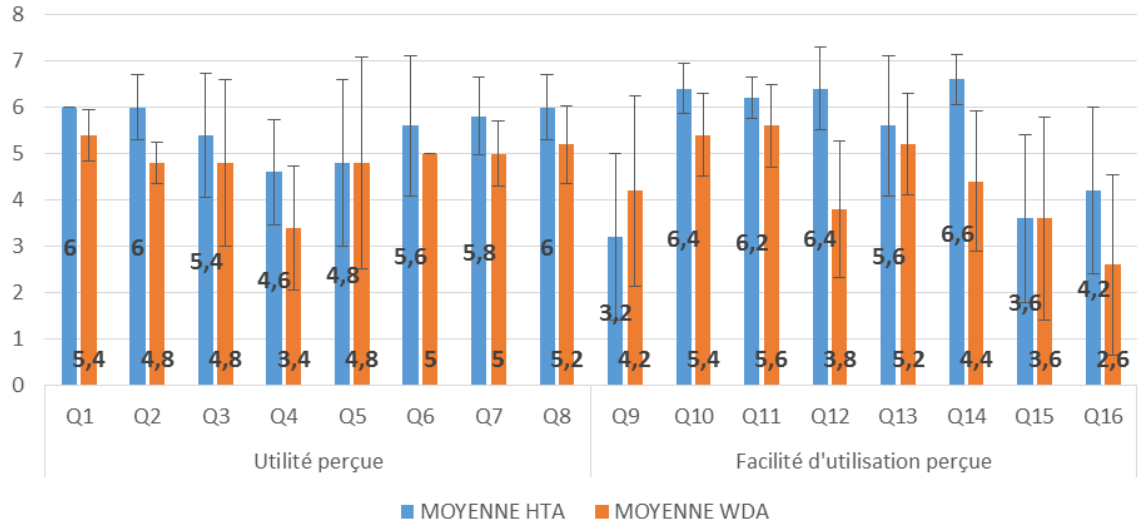


FIGURE 1.12 – Comparaisons des résultats pour le test TAM

inversée seulement à la question 9 qui portait sur l'utilisation lourde ou non des méthodes, il en ressort que l'analyse du domaine est perçue comme moins lourd à utiliser, mais le niveau d'accord général est tout de même plus bas que la moyenne aux autres réponses.

On peut voir aussi une importante différence entre les deux formations pour la question 12 (claire et compréhensible), l'analyse de la tâche paraîtrait beaucoup plus claire, dans le sens où les participants savaient déjà à peu près l'utiliser contrairement au WDA qui était nouveau.

La dernière question ayant une importante différence au niveau des moyennes (Q16) portait sur l'effort nécessaire pour acquérir de l'habileté à la méthode. On peut constater ici que les participants sont assez peu d'accord avec le fait de devoir faire un important effort mental pour devenir habile à l'utilisation du HTA, pour eux, tout le monde peut y arriver sans forcément avoir fait de formation à l'ingénierie système. L'analyse du domaine nécessiterait un peu plus d'effort quant à elle.

Le diagramme suivant (Figure 1.13) met en corrélation les réponses obtenues pour chacune des deux parties du questionnaire avec le niveau d'expérience des participants. Cette analyse se concentre sur la sixième hypothèse relative au niveau de l'influence du niveau d'expérience des ingénieurs. Pour rappel, un ingénieur est qualifié d'expert dès cinq ans d'expérience. Les deux groupes comptent trois experts.

Les résultats montrent que les ingénieurs juniors perçoivent une très bonne utilité et facilité pour l'utilisation du HTA, contrairement aux experts. Pour le

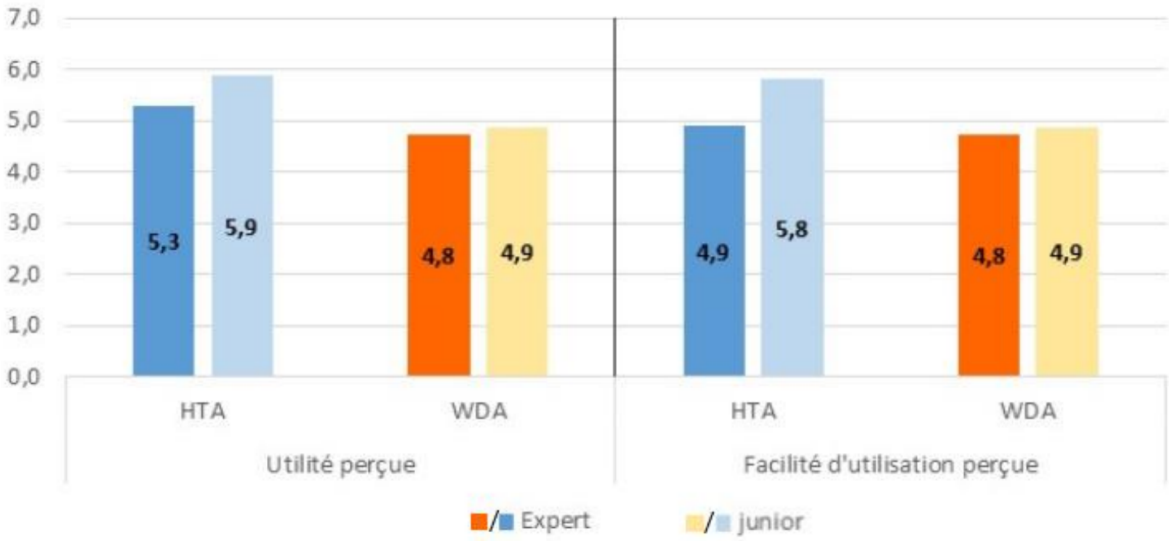


FIGURE 1.13 – Résultats en fonction des niveaux d'expérience

groupe WDA, les réponses sont quasiment identiques pour les juniors et les experts.

1.2.7 SUS

Le questionnaire SUS est utilisé pour évaluer l'utilisabilité de systèmes ou de méthodes. Le choix de ce test a été fait par sa complémentarité au test TAM. La corrélation de ces deux questionnaires permettra d'affiner la réponse à apporter aux hypothèses de travail émises.

Le schéma suivant (Figure 1.14) présente l'échelle d'interprétation des résultats d'un score SUS [12]. Le « pire score imaginable » est situé à 25, « acceptable » à 52 et « bon » à partir de 73.

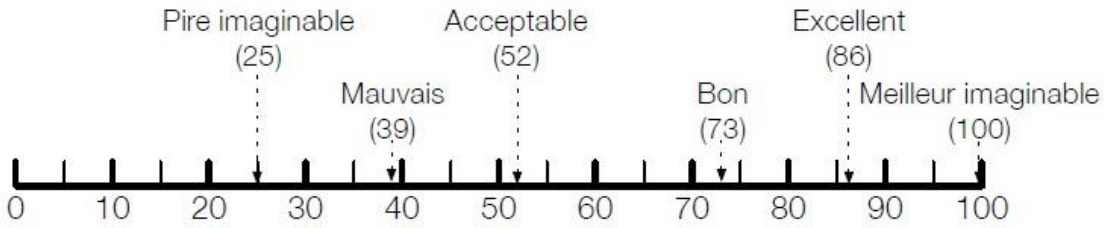


FIGURE 1.14 – Échelle de lecture des scores du test SUS [12]

Groupe HTA

Les résultats obtenus pour le questionnaire SUS du groupe HTA sont présentés ci-dessous (Figure 1.15).

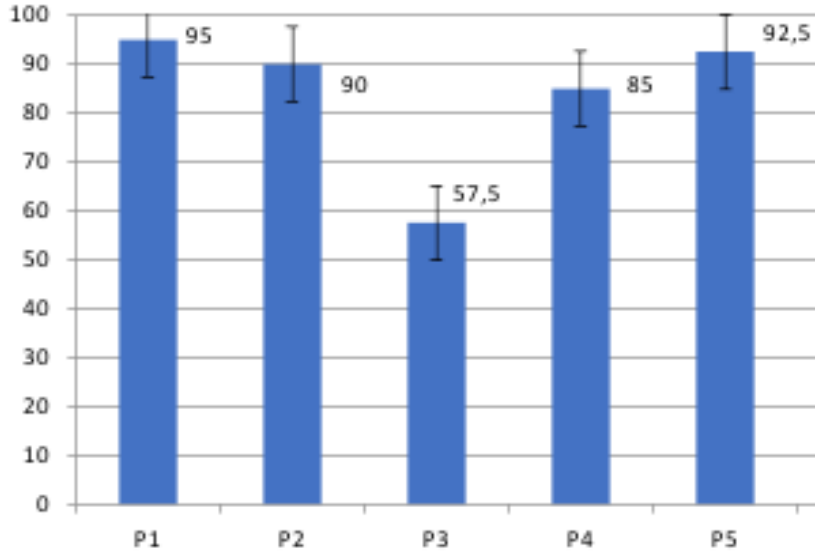


FIGURE 1.15 – Score du test SUS pour le groupe HTA

Sur les cinq scores obtenus, quatre sont jugés « excellents » (entre 85 et 95). Le participant restant l'a jugé entre « acceptable » et « bonne »(score moyen de 57,5).

L'excellent score obtenu par la méthode HTA peut s'expliquer par la facilité que les participants ont ressentie lorsqu'ils ont dû l'utiliser. En effet, la plupart d'entre eux verbalisent et expliquent que cette méthode se rapproche de ce qu'ils sont habitués à voir ou à faire dans leurs missions quotidiennes.

La méthode est jugée cohérente et complémentaire de l'ingénierie système par l'ensemble des participants. Ils trouvent la méthode simple, voire même simpliste pour certains, qui se doutent que la méthode peut englober un plus large panel de scénarios.

Tous les participants ont jugé l'utilisabilité de la méthode excellente, à l'exception du participant HTA-P3, dont les réponses aux questionnaires SUS ont obtenus le score de 57,5 (utilisabilité « acceptable » à « bonne »). Nous suggérons que ce score assez faible, résulte de la « déception »du participant quant au travail qu'il a réalisé. En effet, lors de la réalisation du questionnaire, il n'a pas souhaité réellement donner un score significatif car il n'a pas eu le temps de réaliser l'ensemble des travaux demandés (HTA-P3 : « *Je ne peux pas répondre oui, parce que je ne suis pas allé au bout* »).

Groupe WDA

Les résultats obtenus pour le questionnaire SUS du groupe WDA sont présentés ci-dessous (Figure 1.16).

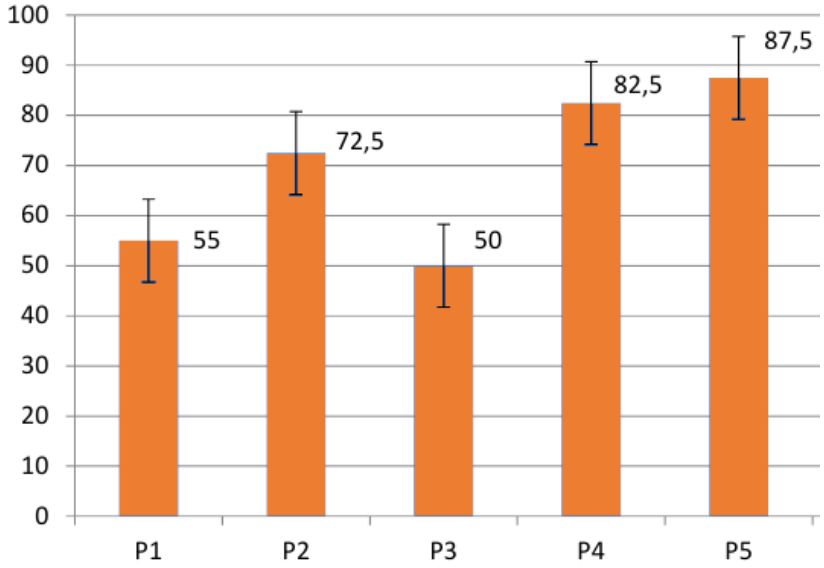


FIGURE 1.16 – Score du test SUS pour le groupe WDA

À la différence du groupe HTA, les résultats du groupe WDA montrent une grande variabilité générale. Les scores sont compris dans un intervalle de 50 à 87,7 pour une moyenne de 69,5 qui traduit une utilisabilité de « acceptable » à « bonne ».

Les scores obtenus sont très variables d'un participant à un autre, et cette variabilité se confirme lorsqu'on se penche sur les ressentis verbalisés. Sur de nombreux points, les participants ne sont pas du tout d'accord. Certains se montrent plutôt réticents à la méthode, tandis que d'autres sont plutôt enthousiastes.

Par exemple, la question 6 qui demande de noter l'affirmation « *Je pense qu'il y a des incohérences lors de l'utilisation de l'analyse du domaine* », les participants donnent des réponses variées.

> WDA-P3, concernant la question 6 : « *Nous on utilise pas le mot fonction si on n'a pas un verbe. Ces termes ne me parlent pas tellement. On ne fait pas des packages comme ça de fonctions physiques en fait, c'est spécial, c'est propre à cette méthode-là. C'est vrai que ça complexifie, on n'est pas sur une architecture fonctionnelle basique. Je mettrai directement du coup les items physiques à la suite, donc c'est vrai que ça fait un peu lourd en fait de remettre au-dessus de la couche physique cette couche-là. Je trouve que c'est un petit peu complexe.* »

> WDA-P5, concernant la question 6 : « *Mais non ! Quelle incohérence il pourrait y avoir ? !* »

La diversité des verbalisations nous montre bien que sur le point cohérence de la méthode, les participants ne voient vraiment pas les choses de la même façon.

Nous suggérons que cette variabilité de réponses, et donc de scores, s'explique par la nouveauté de la méthode. En effet, contrairement à l'HTA, qui est une méthode proche des méthodes d'ingénierie système, le WDA est une méthode qu'ils ne connaissent pas, et chacun des participants a accueilli la nouvelle méthode avec sa propre perception face à l'introduction d'un nouvel outil. Les réactions sont très différentes.

> WDA-P1 : « *Je ne l'utiliserai pas forcément parce que j'ai besoin de preuves.* »

> WDA-P2 : « *Oui je pourrais l'utiliser, ça pourrait m'aider, en aide visuelle.* »

> WDA-P3 : « *Je ne pense pas l'utiliser, parce que je connais d'autre méthodes, comme par exemple la MBSE, où je trouve ça plus factuel, plus carré, plus cartésien, et du coup je considère que tout l'environnement autour du système est balayé. Là, en tout cas je n'ai pas l'impression. Donc je considère que, pas tous les jours, mais c'est possible que ça puisse apporter en tout cas, d'autres fonctions auxquelles on n'aurait pas pensé, d'autres scénarios dégradés, peut-être des composants physiques aussi, auxquels on n'aurait pas pensé.* »

> WDA-P5 : « *Oui, si je pouvais je l'utiliserais plutôt fréquemment, pour sa facilité de lecture, j'y vois un réel intérêt dans la traçabilité.* »

Deux participants ne souhaitent pas utiliser la méthode mais ne sont pas fermés et pourraient changer d'avis s'ils en apprenaient plus. Deux participants sont d'accord pour utiliser la méthode, dans laquelle ils voient des intérêts (facilité de lecture, traçabilité). Quant au participant WDA-P4, il est réellement fermé à la méthode. Il considère que l'analyse du domaine ne lui apporterait rien de plus que les méthodes qu'il connait déjà. Ce refus d'utiliser une nouvelle méthode peut s'expliquer, comme il le dit lui-même, par l'habitude qu'il a d'utiliser ses propres méthodes, et la confiance qu'il leur accorde.

> WDA-P4 : « *Après il y a quand même un lourd passif derrière, ça fait quand même plusieurs années voire plus d'une décennie que je fais des choses comme ça, avec cette méthode-là et ce formalisme-là [méthode IS].* »

Interprétation du test SUS

Le graphique ci-dessous (Figure 1.17) compare les résultats du test SUS pour les deux groupes. Le test de Mann-Whitney montre que la distribution des résultats est identique pour les deux groupes (Annexe V.1.20).

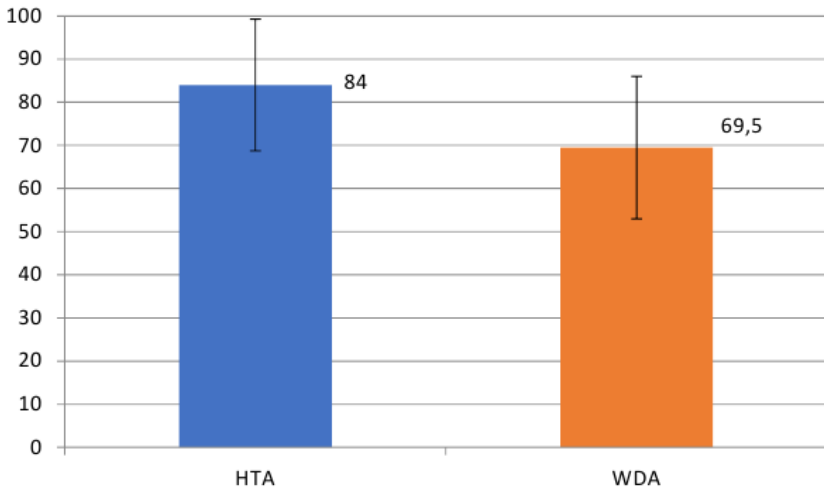


FIGURE 1.17 – Comparaison des résultats du test SUS

Le score obtenu par la méthode HTA est très bon, voire excellent. En effet, la méthode obtient, auprès de nos cinq participants, le score de 84. Sur l'échelle, le score de 86 définit le système comme « excellent » en termes d'utilisabilité [12].

Le score obtenu par la méthode WDA est bon. En effet, la méthode obtient auprès de nos cinq participants, le score de 69,5. Sur l'échelle, le score de 73 définit le système comme « bon » et le score de 52 d'« acceptable » en termes d'utilisabilité.

L'excellent score obtenu par la méthode HTA s'explique, comme vu précédemment, par la facilité et la complémentarité de la méthode ressentie par les utilisateurs. En effet, cette méthode leur est plutôt familière (ou du moins ressemble à ce qu'ils connaissent). Le score plus moyen obtenu par le WDA s'explique, comme vu précédemment, par la difficulté, plus ou moins grande en fonction des individus, d'intégrer une méthode nouvelle. Certains l'accueillent avec méfiance et souhaitent en apprendre davantage avant de se prononcer, tandis que d'autres lui accordent d'ores et déjà certains points positifs.

La facilité d'utilisation a été étudiée grâce aux tests TAM et au SUS. Le test de Spearman a permis de montrer que les résultats obtenus à ces questionnaires sont corrélés (voir Annexe V.1.21). La facilité d'utilisation ressentie est donc cohérente pour les deux groupes sur les deux questionnaires.

1.3 Synthèse

Les résultats des exercices de modélisation et des questionnaires subjectifs permettent de répondre aux hypothèses posées en introduction de ce chapitre.

Hypothèses sur les performances

Hypothèse #1 : Performance temporelle

La première hypothèse de travail s'intéressait au temps de réalisation des exercices de modélisation. Elle suppose que le groupe WDA mettrait plus de temps que le groupe HTA à modéliser le système.

Les temps de réalisation mesurés ne montrent pas une différence notable entre les deux groupes. Il est difficile d'établir un constat à cause de l'absence de données pour les deux derniers exercices d'un participant du groupe HTA même si le test de Mann-Whitney vérifie l'hypothèse d'une distribution identique entre les deux groupes. Il est difficile dans cette situation de valider ou de réfuter l'hypothèse.

Hypothèse #2 : Qualité des productions

La deuxième hypothèse suppose que la qualité des productions est meilleure pour le groupe WDA que le groupe HTA.

L'évaluation des résultats valident cette hypothèse. En effet, les résultats quantitatifs et qualitatifs sont *a minima* similaires entre les deux groupes, et meilleurs notamment pour les cas d'utilisation.

Hypothèses sur les ressentis

Hypothèse #3 : Effort cognitif

Selon la troisième hypothèse, l'utilisation de la méthode WDA demande davantage d'efforts cognitifs que de la méthode HTA.

Les efforts cognitifs ont été mesurés grâce au questionnaire NASA-TLX, notamment avec la dimension « exigences mentales ». La charge mentale a été observée globalement plus importante lorsque les participants utilisaient la méthode WDA. L'hypothèse est donc validée, l'utilisation de la méthode WDA demande des efforts cognitifs plus importants que le HTA.

Hypothèse #4 : Acceptation des méthodes

La quatrième hypothèse émet l'idée que la méthode WDA est moins acceptée que la méthode HTA. Cette hypothèse est analysée selon l'acceptation et l'utilité perçues par les participants.

L'acceptation des méthodes a été mesurée par le test SUS et la seconde partie du test TAM. Les résultats, dont les réponses ont été corrélées par les deux questionnaires, montrent que la méthode WDA est effectivement jugée plus difficile à utiliser.

Le questionnaire TAM a permis de mesurer l'utilité perçue des méthodes par les participants. Les résultats du groupe HTA sont légèrement supérieurs à ceux du groupe WDA pour l'ensemble des questions. L'hypothèse est donc validée, la méthode HTA est jugée plus utile que la WDA. Ces résultats peuvent s'interpréter par l'analogie de la méthode avec celles de l'ingénierie système.

Les scores d'utilisabilité du test SUS évaluent le HTA comme excellent, alors que le WDA est jugé comme acceptable/bon.

Ces dimensions valident l'hypothèse. La méthode WDA est moins acceptée et elle est jugée moins utile que la méthode HTA. Les verbalisations montrent que ces résultats s'expliquent par la nouveauté de la méthode et le manque de retour d'expérience de son utilisation. Les participants expriment tout de même une curiosité et pressentent des apports de la méthode WDA. Ils souhaiteraient davantage mettre en œuvre la méthode pour consolider leur avis.

Hypothèse #5 : Difficulté et sensation d'échec/succès

Cette cinquième hypothèse suggère que la difficulté et la sensation d'échec seront plus prononcées pour le groupe WDA que le groupe HTA. Les résultats montrent que la sensation de réussite est très forte pour les deux groupes. L'utilisation de l'analyse du domaine n'augmente pas la sensation d'échec du groupe. L'hypothèse est donc réfutée.

Hypothèse #6 : Influence du niveau d'expérience des ingénieurs système

Les ingénieurs systèmes confirmés auraient plus de difficultés à utiliser l'analyse du domaine que l'analyse de la tâche. D'après les réponses obtenues et les verbalisations des participants lors du TAM, il n'y a pas de valeurs significatives montrant que les experts trouvent l'analyse du domaine moins utile que l'analyse de la tâche.
Pourtant au moins deux des participants du groupe WDA ont verbalisé le fait de n'avoir utilisé qu'une petite partie voire aucune du modèle proposé, au profit de leurs connaissances sur le MBSE : l'hypothèse 6 est donc réfutée, il faudrait un plus grand nombre de participants afin d'avoir des résultats plus représentatifs.

À la lumière des résultats, il apparait que l'utilisation de l'analyse du domaine permet des choix pertinents de modélisation. Les ressentis recueillis montrent sans surprises que l'analyse du domaine est moins acceptée et nécessite un effort cognitif plus important. Les verbalisations montrent que ces sentiments résultent de la difficulté à appréhender une méthode différente de leurs habitudes de travail.

Certes, le nombre de participants est faible, une étude de plus grande échelle permettrait d'affiner et de consolider les résultats. Une formation plus longue devrait permettre aux ingénieurs de mieux mettre en œuvre la méthode. Certains ingénieurs systèmes sont tout de même enthousiastes quant à l'utilisation de l'analyse du domaine, alors que d'autres sont plutôt sur la réserve, mais pensent tout de même que cette approche peut être intéressante, surtout avec davantage de pratique.

L'expérimentation valide l'idée d'intégrer l'analyse du domaine dans les activités de l'ingénierie système.

Troisième partie

Proposition de la méthode IS+WDA

Chapitre 1

Intégration de l'analyse du domaine dans le MBSE

L'ingénierie système s'appuie sur des normes, des méthodes, des langages et des outils qui représentent des référentiels formalisés pour mener ses activités de conception et de réalisation de systèmes. À la vue des caractéristiques présentées dans l'état de l'art (Chapitre I – *État de l'art*), l'analyse du domaine issue des facteurs humains constitue une perspective originale, unique et complémentaire pour l'ingénierie système. Cette dernière manque toutefois d'intégration dans la démarche d'ingénierie système.

Dans ce chapitre, nous justifions l'apport de l'analyse du domaine dans les processus d'ingénierie système, en montrant qu'elle aide lors des phases d'analyse des exigences, d'analyse fonctionnelle et d'architecture physique. Dans un second temps, nous proposons une méthode générale qui concilie l'analyse du domaine et les activités de l'ingénierie système pour la conception de système. Le déploiement d'une telle démarche a pour objectif d'améliorer la compréhension des besoins des parties prenantes et la conception de systèmes qui y répondent mieux.

Les processus d'ingénierie système sont définis par des normes (Chapitre 1.2 – *Les normes de l'ingénierie système*). Elles déterminent les activités qui dressent d'une part le domaine du problème (*quoi faire ?*), et d'autre part le domaine de la solution (*comment ?*). L'enchaînement itératif des processus menant à la définition d'un système est la « boucle d'ingénierie » (Chapitre 1.2.5 – *Liens entre les normes et le cycle de vie d'un système*).

Le choix du cycle de vie itératif s'impose par sa capacité à faire vérifier et à faire valider, auprès des parties prenantes, la définition et la spécification des exigences puis les architectures fonctionnelles et physiques du système, au fur et à mesure du gain de maturité du système. L'objectif principal est d'assurer au mieux l'adéquation entre les attentes et la réponse apportée tout en maîtrisant les risques d'erreurs de conception, des coûts et des délais.

L'analyse du domaine constitue une méthode qui permet de répondre à une majorité des problématiques auxquelles doit répondre l'analyse des exigences et l'architecture fonctionnelle et physique. Une méthode alliant l'analyse du domaine et l'ingénierie système doit s'intégrer dans une démarche de conception centrée-utilisateur pour une prise en compte optimale des utilisateurs et ainsi garantir une démarche HSI. La suite de ce chapitre montre que l'analyse du domaine est compatible et complémentaire avec les processus de la boucle d'ingénierie, particulièrement lors de ses premières itérations.

1.1 Processus de définition des exigences

Le processus de définition des exigences est composé de deux sous-processus d'analyse des exigences des parties prenantes et de spécification des exigences (Chapitre 1.2.5 – *Processus de définition des exigences*). Nous montrons ici que l'analyse du domaine concourt à ce processus capital pour la réussite du projet. À noter que l'analyse du domaine n'a pas vocation à traiter des aspects de gestion du projet (planification, budget etc.). Comme le montre le modèle Homme-Système (Chapitre 2.2 – *Une vision par processus de l'approche HSI*), il faut veiller à intégrer les parties prenantes participant à l'analyse du domaine dans les plans de gestion pour leur garantir l'accès aux moyens et aux ressources pour mener à bien leurs activités.

1.1.1 Analyse des exigences des parties prenantes

Recueil de données L'analyse des exigences nécessite en premier lieu de recueillir des informations auprès des parties prenantes utilisatrices dans une démarche de conception centrée utilisateur et de conception participative (Chapitre 2.3 – *La conception centrée utilisateur*). Le recueil des données permet de faire émerger les exigences initiales. C'est à partir des données recueillies qu'est initiée l'analyse du domaine. Naikar et al. [75] ont dressé une taxonomie des sources d'information possibles pour chaque niveau de la hiérarchie d'abstraction (Table 3.8 du chapitre 3.3.1 – *Méthode de construction*). La nature des informations à recueillir est guidée par la caractérisation du domaine de travail sur le continuum causal-intentionnel (Chapitre 3.2.1 – *Contraintes intentionnelles-causales*). Pour rappel, un système causal est régi par des lois physiques environnementales tandis qu'un domaine intentionnel trouve ses origines dans les relations organisationnelles et les motivations des opérateurs.

L'étude des données recueillies met en lumière les activités réalisées et les dispositifs physiques utilisés dans le domaine de travail. En s'appuyant sur les étapes 6,7 et 8 de la méthode de Naikar et al. [75] (voir Chapitre 3.3.1 – *Méthode de construction*), les analystes sont en mesure de construire la hiérarchie d'abstraction, en la faisant évidemment valider par les parties prenantes adéquates. Les exigences n'apparaissent que progressivement au cours du processus de l'analyse et de la spécification des contraintes. L'analyse du domaine doit

être intégrée dans le cycle de vie itératif de la boucle d'ingénierie pour être en accord avec la globalité des processus d'ingénierie système. Une telle démarche est présentée ultérieurement (Chapitre 1.3 – *Proposition de la méthode IS+WDA*).

Finalité du système et concepts d'opération La décision du développement d'un système naît d'une insatisfaction exprimée par un individu ou une organisation. Le système répond donc à une finalité. Celle-ci est généralement pérenne puisqu'elle varie peu durant la vie du système. La finalité est par la suite décomposée en concepts opérationnels (*Operational Concept* – OpsCon) qui décrit ce que le système doit être en capacité d'accomplir du point de vue de l'opérateur [57] .

L'analyse du domaine apporte une vue adaptée à l'idée de finalité puisqu'elle est, par définition, indépendante des situations et des acteurs. Ainsi, elle propose une vue globale et stable du système, en termes de services rendus et de dispositifs physiques. La finalité du système est modélisée dans la hiérarchie d'abstraction par le niveau d'abstraction « Objectif Fonctionnel » qui expose les raisons-d'être du domaine de travail. Naikar et al. [75] suggèrent une série de questions à poser aux parties prenantes utilisatrices pour faire émerger la finalité du système (voir Table 3.3 – Chapitre 3.3). Les moyens d'obtention des objectifs fonctionnels sont par la suite identifiés au niveau « Fonction Abstraite » de la hiérarchie d'abstraction.

Le niveau d'abstraction « Fonction abstraite » identifie les critères permettant de mesurer l'atteinte des objectifs du modèle modélisés au niveau « Objectif fonctionnel ». Ce niveau peut comprendre des typologies d'éléments de natures très variées. Pour un système causal, les critères peuvent s'exprimer par les lois physiques qui régissent les relations entre les éléments du système. Pour un système intentionnel, il peut s'agir du respect des règles organisationnelles, d'aspects liés aux facteurs humains ou à l'ergonomie, à l'accessibilité etc. Par exemple, la Figure 1.1 montre la transposition des contraintes identifiées du système vers des fonctions abstraites. Ici, les contraintes sont relatives au domaine ferroviaire et sont exprimées par les parties prenantes utilisatrices du système (coût, fiabilité, sûreté, confort des usagers, accessibilité etc.). Les contraintes peuvent également être exprimées par les parties prenantes conceptrices, elles font alors l'objet d'une analyse lors de la spécification des exigences.

Quant aux concepts d'opération, l'analyse du domaine modélise les moyens d'action fonctionnels des opérateurs. Dans les premiers temps du projet, il est généralement difficile d'aller au-delà de l'identification des fonctions principales du système. Elles sont alors vues comme des *boîtes noires* qui remplissent une attente d'un point de vue extérieur. L'analyse du domaine se situe à cette granularité d'analyse. Chaque niveau d'abstraction porte des informations de natures différentes pour les exigences initiales. Ainsi, les niveaux « Fonction Généralisée » et « Fonction Physique » exposent les fonctions et les processus nécessaires aux opérateurs pour qu'ils atteignent leurs buts dans le domaine de travail.

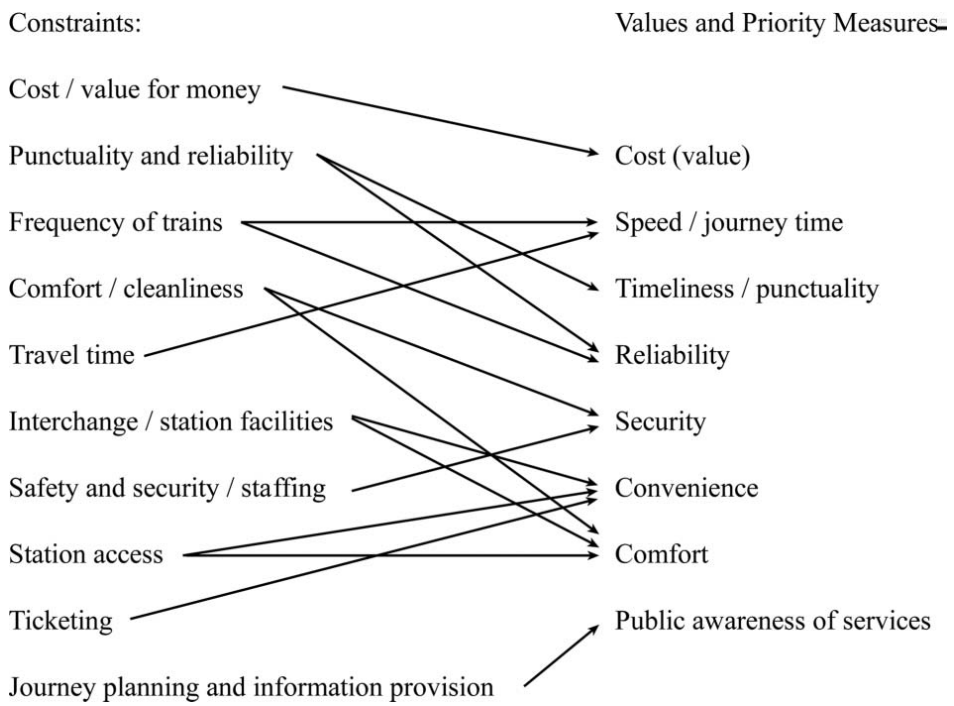


FIGURE 1.1 – Transposition des contraintes vers des fonctions abstraites [78]

De la même manière, les ressources physiques identifiées au niveau d'abstraction *Forme Physique* identifient les objets d'action des opérateurs. Ces éléments constituent au final des exigences initiales en justifiant leurs présences dans le domaine de travail par les relations moyens-fins.

Scénarios opérationnels L'analyse des exigences doit modéliser les scénarios qui définissent les situations rencontrées par le système. Ils sont habituellement décrits selon les approches normatives et descriptives qui font émerger les interactions entre acteurs et les éléments du système impliqués pour une situation donnée.

L'analyse du domaine est indépendante des situations et des opérateurs. Elle ne semble donc pas a priori pertinente pour définir des scénarios opérationnels. Elle ne permet pas d'identifier les acteurs impliqués, ni de les contextualiser dans une situation particulière. Les conditions de déclenchement et les flux échangés sont également absents.

Néanmoins, l'analyse du domaine est utile pour la définition des scénarios opérationnels. En représentant une cartographie des contraintes fonctionnelles et physiques, la hiérarchie d'abstraction expose les potentialités du domaine de travail. Elle représente alors un espace de raisonnement pour les concepteurs du système.

L'analyse du domaine et l'analyse des tâches sont complémentaires et leur mise en œuvre conjointe permet d'améliorer l'identification et la définition des

scénarios opérationnels (voir Chapitre 3.5.3 – *Liens entre les approches de l'ingénierie cognitive*). D'autre part, il est possible d'évaluer l'impact d'une défaillance fonctionnelle ou physique sur l'ensemble du domaine en parcourant la hiérarchie d'abstraction selon les liens moyens-fins. Cet aspect est intéressant pour la modélisation des scénarios opérationnels dégradés.

La multiplicité des liens moyens-fins indiquent les alternatives pour résoudre une même situation. Le parcours suivant les liens moyens-fins de la hiérarchie d'abstraction fait émerger des alternatives pour la résolution de l'objectif attendu par la situation. Dès lors, chaque branche parcourue fait l'objet d'un scénario potentiel. Les concepteurs du système doivent étudier chaque alternative pour évaluer sa faisabilité ou sa performance.

Périmètre du système Il est nécessaire de délimiter le périmètre du système afin de distinguer les éléments du système de son environnement externe. L'établissement du périmètre du système est une tâche difficile, particulièrement pour les systèmes ouverts au sein desquels les interactions entre le système et l'environnement sont omniprésentes. L'analyse du domaine vise à identifier l'ensemble des contraintes, autrement dit les moyens d'action, qui délimitent le domaine de travail. Elle détermine les contraintes fonctionnelles et physiques qui encadrent l'espace de travail des opérateurs.

Deux aspects sont à considérer pour l'établissement du périmètre du domaine de travail [75]. D'une part, les ressources et les contraintes du projet impactent la portée de l'analyse. En effet, il est fréquent que le périmètre du domaine de travail se restreigne ou s'étende au fil des boucles d'ingénierie. D'autre part, le choix des éléments du système est une démarche pragmatique. L'analyse des données recueillies auprès des parties prenantes utilisatrices met en lumière le contexte opérationnel et les objets d'action des opérateurs dans des situations usuelles. Pour chaque élément inventorié, les relations *moyens-fins* promeuvent l'investigation des fonctions et de leur mise en œuvre.

1.1.2 Spécification des exigences

La spécification des exigences formalise les attentes des parties prenantes utilisatrices et détermine également les exigences des parties prenantes. Elles doivent être définies et modélisées de façon à être mesurées, vérifiées et validées [53].

L'analyse du domaine fournit des indications aux ingénieurs système pour la distinction entre les exigences fonctionnelles et non-fonctionnelles. Les trois derniers niveaux de la hiérarchie d'abstraction regroupent les exigences fonctionnelles car elles expriment les services et processus disponibles nécessaires ou les dispositifs physiques. Quant aux exigences non-fonctionnelles, elles peuvent être exprimées au niveau « Fonction Abstraite ».

L'analyse du domaine supporte la spécification des exigences par sa capacité à exposer les exigences fonctionnelles et non-fonctionnelles du système. Il revient aux ingénieurs d'intégrer les autres contraintes des parties prenantes conceptrices, de formaliser les exigences en associant les critères de mesure.

1.1.3 Validation des exigences

La boucle d'ingénierie définit un processus de validation appliqué aux exigences. Il a pour objectif d'identifier les divergences et les absences entre le référentiel d'exigences et les attentes des parties prenantes, les exigences du projet et les contraintes externes. Le cycle *analyse / validation* des exigences est réitéré tant que des lacunes perdurent. Une fois la validation satisfaite, le référentiel d'exigences constitue le document de travail pour l'analyse fonctionnelle.

La validation des exigences doit être appliquée à l'analyse du domaine. La méthode de Naikar [75] inclut des activités de validation. Chaque itération de l'analyse (étapes 6, 7 et 8) est conclue par une comparaison entre la hiérarchie d'abstraction et les données recueillies. Elle permet de s'assurer de l'absence de divergences et d'omissions dans l'analyse. La neuvième et dernière étape de la méthode concerne la validation finale. Elle repose sur le fait de ne pas réutiliser les informations exploitées pour la construction de la hiérarchie d'abstraction, mais de s'appuyer des experts du domaine de travail pour valider le contenu final du modèle. Il faut néanmoins souligner le coût important en termes de temps et de ressources à mobiliser.

La complétude et la traçabilité du référentiel des exigences peuvent être évaluées en confrontant la hiérarchie d'abstraction et le modèle des exigences. La matrice d'allocation est un outil idoine pour cette inspection. Les éléments de la hiérarchie d'abstraction sont alors alloués aux exigences de la couche opérationnelle. Si un élément est orphelin de liens d'allocation, alors le référentiel d'exigences ne peut pas être validé.

D'autre part, la complémentarité de l'analyse du domaine et des scénarios opérationnels permet aux analystes de les valider mutuellement. Elle aide les analystes à confirmer la complétude des modèles dans les premières itérations de la boucle d'ingénierie. Si un scénario n'est pas en mesure d'être déroulé sur la hiérarchie d'abstraction en suivant les liens de moyens-fins, cela montre potentiellement des erreurs d'analyses globales. Il peut effectivement s'agir d'un problème au niveau du scénario lui-même qui expose des éléments inadéquats ou inexistants, ou bien de la hiérarchie d'abstraction qui n'inclut pas les moyens d'action utilisés dans le scénario. Le parcours intégral de la hiérarchie d'abstraction permet également de comparer l'exhaustivité des scénario opérationnels.

1.2 Processus de conception

Le processus de conception de la boucle d'ingénierie est composé des sous-processus de conception de l'architecture logique et physique du système.

1.2.1 Processus logique

Le processus de conception logique étudie l'architecture fonctionnelle selon trois points de vue : la décomposition fonctionnelle, la représentation sous la forme de flux et la représentation comportementale dynamique [5].

L'analyse du domaine est indépendante des situations et des acteurs, elle est peu adaptée à ces deux derniers points de vue. Cependant, elle présente plusieurs intérêts pour la décomposition fonctionnelle d'un système. Elle permet d'identifier les différentes catégories de fonction (fonctions principales de service, fonctions complémentaires de service, fonctions contraintes, fonctions techniques. Chapitre 1.2.5 – *Processus de conception*). L'analyse du domaine est à même d'identifier ces types de fonction.

Le niveau « Fonction Abstraite » modélise les fonctions de contraintes. Le niveau d'abstraction « Fonction Généralisée » expose les services disponibles dans le domaine de travail aux opérateurs. Elles sont analogues aux fonctions principales de service. Enfin, le niveau d'abstraction « Fonction Physique » modélise les processus et les fonctions rendus par les formes physiques, qui sont utilisés par les fonctions généralisées. En ce sens, les fonctions physiques peuvent être considérées comme des fonctions techniques.

Les ingénieurs système modélisent fréquemment plusieurs architectures fonctionnelles qui satisfont un même référentiel des exigences. Ces options diffèrent par exemple par leur complexité, leur performance ou leur coût. Les parties prenantes conceptrices doivent alors arbitrer la solution la plus adéquate parmi ces alternatives, en les confrontant aux critères de performance et aux contraintes de projet établis lors de la spécification des exigences. Pour justifier leur décision, des simulations ou des prototypes peuvent être mis en œuvre pour étudier et comparer les différentes architectures fonctionnelles. Dans une démarche de conception centrée utilisateur, il est fortement recommandé d'impliquer les utilisateurs finaux dans l'évaluation des prototypes face aux problématiques HSI.

Dans cette idée de production d'alternatives de solutions de conception, l'analyse du domaine constitue une aide aux concepteurs du système. En effet, l'analyse du domaine représente un espace de raisonnement pour les concepteurs. Elle leur permet de faire émerger des solutions, d'un point de vue des opérateurs, pour réaliser une même activité. Par exemple, pour une même « fonction physique », plusieurs « formes physiques » peuvent être envisagées tant qu'elles s'intègrent convenablement dans le modèle global, c'est-à-dire en respectant les

liens de moyens-fins. Les analyses peuvent évaluer à un haut niveau d'abstraction l'impact global des solutions de conception sur la hiérarchie d'abstraction.

L'analyse du domaine présente un troisième apport pour l'analyse fonctionnelle. Étant indépendante des acteurs, l'analyse du domaine permet d'identifier les fonctions du système en ne tenant pas compte de l'entité réalisatrice. En effet, une fonction peut être mise en œuvre par un opérateur humain, par un mécanisme d'automatisation ou par une collaboration entre ces deux derniers. L'analyse du domaine offre alors un espace de raisonnement qui s'affranchit de cette problématique qui sera traitée ultérieurement. De plus, l'analyse du domaine constitue un référentiel intéressant pour disposer d'une vue complète du système au sein d'une même représentation où les fonctions sont justifiées face aux critères de mesure des « fonctions abstraites ».

Enfin, l'analyse du domaine modélise le couplage des éléments fonctionnels au sein de l'ensemble du domaine de travail. En effet, la multiplicité des liens moyens-fins au niveau des fonctions généralisées et des fonctions physiques montrent le niveau de dépendance de ces fonctions auprès des autres éléments du domaine de travail. Ainsi, plus un élément possède de liens moyens-fins, plus son indisponibilité a un impact négatif sur l'ensemble des éléments liés. Les ingénieurs doivent prendre cette problématique en considération, par exemple en garantissant un haut niveau de disponibilité de ces fonctions, ou en proposant une autre architecture fonctionnelle qui permet de diminuer ce degré de couplage.

Au terme de l'analyse fonctionnelle, l'architecture fonctionnelle du système est définie. Elle doit tout de même être vérifiée pour garantir son exhaustivité et sa conformité face aux exigences, aux critères de performance et aux contraintes.

1.2.2 Vérification fonctionnelle

La boucle d'ingénierie met en place un sous-processus de vérification d'analyse fonctionnelle. Il a pour objectif de garantir que l'architecture fonctionnelle couvre l'ensemble du référentiel des exigences. Il doit particulièrement assurer le fait que l'architecture fonctionnelle soit exhaustive du point de vue des fonctions, des critères de performance et des contraintes. Ce processus doit également veiller à l'absence de conflits entre les fonctions.

La vérification fonctionnelle peut être menée en s'appuyant sur la hiérarchie d'abstraction. Ce modèle constitue une représentation globale du système. Il devient alors possible aux analystes de s'appuyer sur lui pour vérifier la complétude de l'architecture fonctionnelle en comparant les deux modèles. Cette approche permet de vérifier que l'architecture fonctionnelle prend effectivement en compte les « fonctions abstraites », les « fonctions généralisées » et les « fonctions physiques ». La matrice d'allocation est un outil pertinent de la même manière que pour la validation du référentiel d'exigences.

À la fin de processus, l'architecture fonctionnelle est vérifiée et constitue le point d'entrée pour le processus de conception de l'architecture physique du système.

1.2.3 Conception physique

Une fois l'architecture fonctionnelle construite et justifiée, les concepteurs doivent déterminer la structure organique du système, et allouer la réalisation des fonctions aux constituants physiques. L'architecture physique du système est modélisée sous la forme d'une décomposition structurelle, d'une représentation des flux et dynamique.

L'analyse du domaine est peu capable d'aider les ingénieurs pour ces deux dernières représentations à cause de ses propriétés d'indépendance des situations et des acteurs. Cependant, l'analyse du domaine intègre la décomposition structurelle dans sa méthode. Le niveau d'abstraction « Forme Physique » inventorie les constituants physiques et leurs liens avec les services du système (les fonctions généralisées). Les constituants physiques sont vus comme des *boîtes noires*, leur architecture interne n'est pas spécifiée, ni les interfaces. L'analyse du domaine permet d'établir une première architecture physique, liée par les moyens-fins aux services du système.

Le processus de conception physique doit allouer les fonctions de l'architecture fonctionnelle aux composants physiques. L'analyse du domaine est capable de guider les ingénieurs système pour l'activité d'allocation, particulièrement lors des premières itérations de la boucle d'ingénierie. Les relations moyens-fins de la hiérarchie d'abstraction indiquent aux ingénieurs système les liens entre les éléments fonctionnels et physiques dans les derniers niveaux d'abstraction.

L'allocation des fonctions aux composants physiques met en lumière le degré de couplage des éléments du système. L'analyse du domaine aide les ingénieurs à analyser ce couplage en suivant les liens de moyens-fins. D'une manière analogue à l'analyse fonctionnelle, la multiplicité des liens moyens-fins pour une forme physique indique aux concepteurs son couplage avec les fonctions physiques. Plus une forme physique possède de liens moyens-fins, plus elle requiert de fonctions, ce qui implique la mise en place davantage d'interfaces. Une forme physique très sollicitée, qui possède donc de nombreux liens moyens-fins, montrera que le système est très dépendant de cet élément physique.

1.2.4 Vérification de l'architecture physique

Le processus de vérification de l'architecture physique peut s'appuyer sur l'analyse du domaine pour vérifier la complétude et la traçabilité des éléments de l'architecture de conception. Cette approche repose sur l'utilisation d'une matrice d'allocation permettant de comparer la complétude des deux modèles.

1.3 Proposition de la méthode IS+WDA

La démarche proposée dans cette section met en œuvre une méthode qui intègre l'analyse du domaine dans l'ingénierie système. Une telle méthode vise à améliorer la collaboration entre l'ingénierie système et l'ingénierie cognitive en leur permettant d'exploiter les apports de chaque discipline pour mener une approche HSI globale.

La méthode s'intègre dans un processus itératif pour prendre en compte les retours des parties prenantes au fur et à mesure du cycle de vie du projet. La méthode IS+WDA proposée est composée de neuf étapes successives qui s'inscrivent conceptuellement dans la boucle d'ingénierie : récolte des données, analyse et spécification des exigences, conception logique et physique. Des étapes de validation et de vérification sont présentes pour garantir la qualité du modèle.

La figure suivante présente notre méthode globale (Figure1.2).

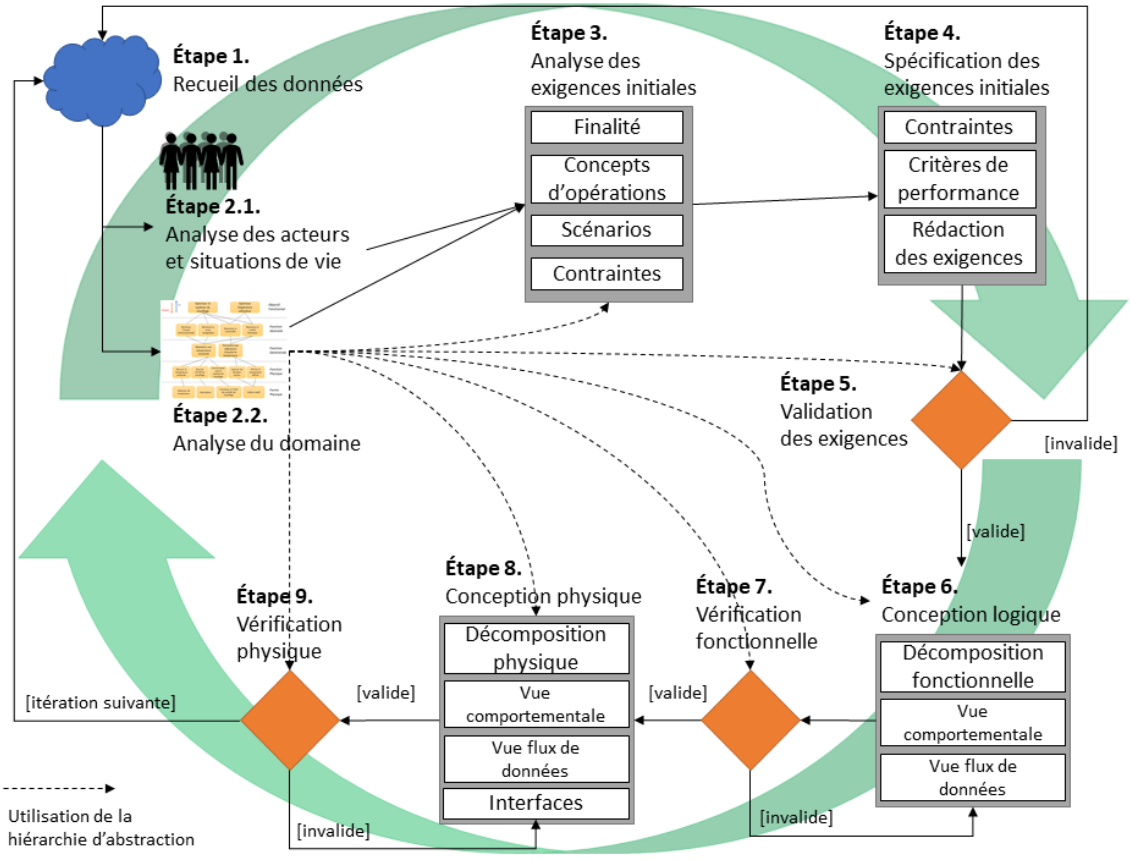


FIGURE 1.2 – Méthode IS+WDA

Les sections suivantes présentent en détails chacune des étapes de la méthode, en mettant en lumières les données en entrées, en sorties et les méthodes à utiliser.

Étape 1 – Recueil des données

La méthode débute par le recueil des données auprès des parties prenantes utilisatrices. Les méthodes présentées précédemment (Chapitre 2.3 – *La conception centrée utilisateur*), telles que les entrevues, les focus group ou les observations, sont utilisées pour ce faire. Une telle démarche promeut l'adoption d'une conception centrée utilisateur en encourageant l'implication des parties prenantes utilisatrices. Le recueil de données directement auprès des opérateurs permet d'avoir une compréhension explicite de leurs attentes, de leurs besoins et de leurs contraintes.

Entrées : Clients et utilisateurs finaux

Sorties : Verbatim, procédures de travail, documentation, rapports d'activité ...

Méthodes : Entretiens, focus group, observations, questionnaire exploratoire ...

Étape 2 – Analyse dynamique et statique du système

Suite au recueil des données, la méthode IS+WDA propose de déterminer les acteurs opérationnels et les situations de vie rencontrées par le système d'une part, et de représenter le domaine de travail grâce à la hiérarchie d'abstraction d'autre part. Ainsi, le système est représenté respectivement de manière dynamique et statique. Ces deux sous-étapes sont menés parallèlement, il n'y a pas d'ordre séquentiel à respecter.

Étape 2.1 – Acteurs et situations de vie

L'analyse du domaine est indépendante des situations et des acteurs. Elle ne permet pas de modéliser les acteurs, ni les situations de vie du système. Ces informations doivent être identifiées et caractérisées pour exprimer les aspects dynamiques du système. Cette étape requiert donc d'identifier les acteurs, les situations de vie et l'environnement externe du domaine de travail, à partir des informations récoltées lors de la première étape. Ces informations seront utilisées pour affiner le périmètre du système, modéliser les scénarios opérationnels et les aspects dynamiques de l'analyse fonctionnelle et de l'architecture physique.

Entrées : Résultats de l'étape 1

Sorties : Acteurs du système et situations de vie identifiés

Méthodes : Analyse des données issues de l'étape 1

Étape 2.2 – Analyse du domaine

Le développement de l'analyse du domaine se fonde sur la méthode proposée par Naikar [75] qui s'articule autour des étapes d'identification et de caractérisation des contraintes issues des données récoltées à l'étape 2, puis des trois étapes de construction de la hiérarchie d'abstraction elle-même (voir Chapitre 3.3.1 – *Méthode de construction*).

Le MBSE encourage l'utilisation systématique de modèles comme artéfacts de conception. La hiérarchie d'abstraction doit donc être intégrée dans le modèle global du système dans le but d'être traçable, maintenue et partagée avec les autres parties prenantes [52, 86].

Dans cette perspective, la hiérarchie d'abstraction doit être modélisée dans le modèle global du système, plus précisément au niveau de la couche opérationnelle. Il est possible de la représenter grâce au langage de modélisation SysML en utilisant le diagramme de définition de blocs (*Block Definition Diagram* – BDD). Chaque élément est modélisé par un *Block* dont le stéréotype reflète le niveau d'abstraction auquel il appartient. Le diagramme BDD représente la brique élémentaire de modélisation de la structure d'un système [97]. La répartition spatiale des blocs respecte l'organisation en niveaux de la hiérarchie d'abstraction et le sens de lecture *top-down* ou *bottom-up*. Les deux cas d'étude présentés ultérieurement illustreront cette démarche (Chapitre IV.1 et Chapitre IV.2).

La modélisation de la hiérarchie d'abstraction permet de lier ses éléments avec les autres éléments du système global. Cette caractéristique est intéressante lors des étapes de validation et de vérification pour garantir ou non la complétude des éléments du système.

Entrées : Résultats de l'étape 1, documents de travail etc. (voir Tableau 3.8)

Sorties : Hiérarchie d'abstraction

Méthodes : Méthode de construction de Naikar (voir Chapitre 3.3.1)

Étape 3 – Analyse des exigences initiales

La boucle d'ingénierie est amorcée par le processus d'analyse des exigences initiales suite aux besoins initiaux récoltés lors des étapes 2.1 et 2.2. Cette étape est initiée suite aux résultats obtenus aux étapes précédentes.

Comme expliqué précédemment (Chapitre 1.1.1 – *Analyse des exigences des parties prenantes*), l'analyse du domaine vient en aide à la modélisation de la finalité, des concepts d'opération et du contexte physique du domaine de travail. Les contraintes et les critères d'atteinte des objectifs sont également présents dans l'analyse du domaine. Le contenu de la hiérarchie d'abstraction nourrit donc directement l'analyse des exigences initiales.

Cette troisième étape est l'occasion de contribuer au modèle global du système en modélisant les exigences, les cas d'utilisation et les scénarios opérationnels du système, respectivement grâce au diagramme d'exigences, au diagramme de cas d'utilisation et des diagrammes d'activité et/ou de séquence.

L'analyse des exigences initiales détermine les capacités fonctionnelles et non-fonctionnelles du système ainsi que les contraintes du système. Elles émergent en partie de l'analyse du domaine. En effet, les fonctions généralisées et les fonctions physiques exposent les services du système à mettre en œuvre. Les fonctions abstraites déterminent les critères de mesure d'obtention des objectifs du domaine de travail. De ce fait, les contraintes identifiées dans la hiérarchie d'abstraction forment des exigences du système.

Les cas d'utilisation exposent les services disponibles dans le domaine de travail aux acteurs qui leur permettent d'accomplir leurs tâches. L'analyse du domaine identifie les moyens fonctionnels et physiques pour y parvenir. Les fonctions généralisées constituent conceptuellement les fonctions de services du système tandis que les fonctions physiques forment les services techniques. Les formes physiques constituent quant à elles des acteurs secondaires qui fournissent les fonctions techniques. Néanmoins, l'analyse du domaine ne permet pas d'identifier les acteurs qui réalisent les cas d'utilisation de par son indépendance vis-à-vis des acteurs. Il faut alors se référer aux éléments produits lors de l'étape 2.1.

Les scénarios opérationnels prescrivent le comportement du domaine de travail avec ses acteurs. Il s'agit donc de modéliser les interactions entre les acteurs et le système dans une situation de vie du domaine, en explicitant les liens temporels (itération, parallélisme, alternative etc.). Il a été montré que l'analyse du domaine et l'analyse de la tâche sont complémentaires pour modéliser les scénarios opérationnels du système (Chapitre 3.5.3 – *Liens entre les approches de l'ingénierie cognitive*).

De même, l'approche HSI s'inscrit complètement dans la conception centrée utilisateur [19]. Il est par conséquent essentiel de décrire les utilisateurs selon leurs caractéristiques individuelles et/ou collectives. Le concept de *persona* permet par exemple de caractériser des utilisateurs au travers de ses dimensions physiologiques, sociales, économiques, de personnalités, de compétences etc. [20]. Ils peuvent être utilisés pour l'établissement des scénarios opérationnels dont les informations proviennent de l'étape 2.2 (le cas d'étude NECTAR au chapitre suivant illustre cette idée).

Au terme de l'étape d'analyse des exigences initiales, un cahier des charges est établi et constitue une base de travail pour les autres étapes de la méthode. L'analyse du domaine contribue fortement à la modélisation de la couche opérationnelle du modèle MBSE du système.

Entrées : Résultats des étapes 1, 2.1 et 2.2.

Sorties : Exigences initiales, cas d'utilisation, scénarios opérationnels

Méthodes : Analyse du domaine de travail, analyse de l'existant et des concepts d'opération, modélisation de scénarios, analyse de faisabilité etc.

Étape 4 – Spécification des exigences

La spécification des exigences formalise les exigences initiales et intègre les contraintes des parties prenantes conceptrices. L'analyse du domaine est peu en mesure d'aider les ingénieurs système pour rédiger et modéliser les exigences spécifiées (Chapitre 1.1.2 – *Spécification des exigences*). Les ingénieurs système doivent donc suivre les méthodes et les conventions de la discipline pour spécifier les exigences.

Entrées : Résultats des étapes précédentes et exigences des parties prenantes conceptrices

Sorties : Exigences spécifiées

Méthodes : Analyses des exigences initiales et des exigences techniques et modélisation conformément aux conventions de l'ingénierie système

Étape 5 – Validation des exigences

Les étapes précédentes ont jusqu'ici produit les artéfacts correspondant aux exigences, aux cas d'utilisation, aux scénarios opérationnels, à la description des acteurs et des contraintes. Ces éléments doivent être validés pour s'assurer de la qualité de la réponse attendue des parties prenantes utilisatrices. La validation des exigences a pour objectif de garantir l'adéquation entre les attentes exprimées par les parties prenantes et la réponse donnée par les concepteurs du système.

En procédant à des revues conjointes, l'ensemble des parties prenantes examine la réponse proposée par les concepteurs du système aux attentes exprimées. Si des divergences sont constatées, des compromis peuvent être trouvés, une nouvelle itération du processus global d'analyse des exigences doit être menée le cas échéant. Dans ce dernier cas, les productions doivent être examinées à nouveau, en incluant une revue de l'analyse du domaine. Plus une erreur est détectée tôt, moins son impact est sévère sur le déroulement du projet en termes de coût et de délais [53].

La hiérarchie d'abstraction est utile pour les exercices de traçabilité. En effet, celle-ci est modélisée dans le modèle global du système lors de l'étape 2.2, il est possible de tracer les éléments de ce modèle avec ceux du diagramme des exigences. Si des disparités émergent, par exemple si un élément est présent dans l'un des modèles et absent de l'autre, il est alors nécessaire de corriger le modèle global en réitérant les étapes précédentes de la méthode.

Toutefois, une revue complète et indépendante doit être effectuée à cette étape pour garantir que les exigences modélisées répondent bien aux besoins exprimés. Elle doit utiliser les données brutes recueillies et obtenir l'approbation de l'ensemble des parties prenantes du projet.

Le référentiel des exigences est défini dès lors que les exigences spécifiées sont validées. Il sera utilisé comme base de travail pour le processus de conception logique.

Entrées : Exigences spécifiées

Sorties : Exigences spécifiées et validées

Méthodes : Traçabilité des éléments de la hiérarchie d'abstraction et du modèle des exigences, revue indépendante

Étape 6 – Conception Logique

L'étape « Conception Logique » vise à traduire les exigences spécifiées en une architecture fonctionnelle. L'architecture fonctionnelle est modélisée selon plusieurs vues : la décomposition fonctionnelle, la représentation sous forme de flux et la représentation comportementale dynamique [5].

Les ingénieurs système peuvent fonder l'analyse de la décomposition fonctionnelle en s'aidant de la hiérarchie d'abstraction (Chapitre 1.2.1 – *Processus logique*). Les niveaux d'abstraction « Fonction généralisée » et « Fonction physique » modélisent les fonctions de service et les fonctions techniques du domaine de travail. N'étant représentée qu'à un bas niveau de détails, la hiérarchie d'abstraction expose seulement les premiers rangs de la décomposition fonctionnelle. Les itérations ultérieures de la boucle d'ingénierie améliorent la décomposition fonctionnelle en modélisant les sous-fonctions.

La décomposition fonctionnelle est modélisée avec les méthodes MBSE par la « structure de décomposition fonctionnelle » (*Functional Breakdown Structure* – FBS). Il s'agit d'un diagramme de définition de blocs dont les blocs représentent les fonctions et les sous-fonctions. La décomposition fonctionnelle n'est pas liée à une implémentation architecturale particulière, elle inventorie seulement les fonctions et leurs sous-fonctions. L'allocation des fonctions aux composants physiques est obtenue lors de l'Étape 8 - Conception physique.

Pour les mêmes raisons d'indépendance vis-à-vis des situations, l'analyse du domaine ne constitue pas un outil adapté pour la représentation comportementale des fonctions. Elle n'exprime pas la temporalité dans l'activation des fonctions. De la même manière, la hiérarchie d'abstraction ne modélise pas les flux de données entre les fonctions, mais seulement les liens moyens-fins. Il revient donc aux ingénieurs système d'identifier et de modéliser ces deux représentations de l'architecture fonctionnelle du système à partir des scénarios opérationnels par exemple.

De manière générale, l'analyse du domaine constitue un espace de raisonnement intéressant pour l'analyse fonctionnelle. Parce qu'elle est indépendante des acteurs, la définition des fonctions peut s'affranchir de spécifier l'entité réalisatrice d'une fonction (humain, automatisme et/ou les deux) si le besoin s'en

ressent. En effet, cette problématique n'est pas nécessairement résolue dans les premiers temps de l'analyse fonctionnelle tandis que les résultats attendus de la fonction le sont.

Le processus d'analyse fonctionnelle amène fréquemment les ingénieurs à proposer plusieurs solutions d'architecture fonctionnelle. L'analyse du domaine permet d'évaluer l'impact global d'une fonction sur l'ensemble du domaine de travail. Par exemple, une fonction modélisée au niveau des fonctions généralisées doit être analysée par rapport à son respect des fonctions abstraites, et voir si les fonctions physiques existantes proposent les moyens pour réaliser cette fonction. Dans le cas contraire, l'ensemble des parties prenantes (facteurs humains et ingénieurs) doit juger la nécessité d'inclure davantage de fonctions abstraites ou de fonctions physiques, puis d'analyser l'impact global sur le domaine de travail.

Entrées : Hiérarchie d'abstraction, modèle des exigences

Sorties : Structure de décomposition fonctionnelle

Méthodes : Extraction des fonctions généralisées et physiques

Étape 7 – Vérification fonctionnelle

L'architecture fonctionnelle doit être vérifiée pour garantir sa complétude vis-à-vis du référentiel des exigences. Comme pour la validation des exigences, la traçabilité des éléments de la hiérarchie d'abstraction avec ceux de l'architecture fonctionnelle permet de vérifier la complétude du modèle.

La vérification fonctionnelle nécessite en outre une intervention indépendante, c'est-à-dire une revue qui n'utilise pas les résultats obtenus jusque là. Il n'est pas viable de vérifier l'architecture fonctionnelle en s'appuyant sur un modèle qui a permis de l'obtenir, elle doit être effectuée de manière indépendante, par exemple en menant des revues extérieures.

Entrées : Hiérarchie d'abstraction, couche opérationnelle du modèle

Sorties : Architecture fonctionnelle vérifiée

Méthodes : Traçabilité des modèles et revue indépendante

Étape 8 – Conception Physique

Une fois l'architecture fonctionnelle vérifiée, l'architecture physique du système doit être modélisée. Cette étape a pour objectif de définir les composants physiques du domaine de travail, et d'allouer la réalisation des fonctions de l'architecture fonctionnelle à ces composants (Chapitre 1.2.3 – *Conception physique*).

Le processus de conception physique est conceptuellement analogue à celui de la conception logique. L'architecture physique est représentée sous la forme d'une décomposition physique, d'une modélisation des flux et du comportement dynamique. Pour les mêmes raisons évoquées précédemment concernant l'architecture fonctionnelle, la hiérarchie d'abstraction intervient majoritairement au niveau de la décomposition physique du domaine de travail en exposant les composants physiques de premier rang au niveau d'abstraction « Forme physique ». Elle permet également d'analyser l'impact de différentes alternatives sur le domaine de travail global.

Il revient aux ingénieurs système d'affiner la décomposition physique et de réaliser les diagrammes de flux et le comportement dynamique de l'architecture physique pour compléter le modèle du système.

Les relations moyens-fins qui lient les formes physiques aux fonctions physiques, et par transitivité aux fonctions généralisées, guident les ingénieurs pour l'allocation des fonctions aux composants physiques.

Entrées : Hiérarchie d'abstraction, couches précédentes du modèle

Sorties : Architecture physique

Méthodes : Extraction des éléments physiques issus des deux derniers niveaux de la hiérarchie d'abstraction, analyse et décomposition physique

Étape 9 – Vérification physique

L'architecture physique doit être également vérifiée pour garantir sa complétude et sa cohérence face aux précédentes analyses. La comparaison de l'architecture physique avec la hiérarchie d'abstraction aide l'identification des omissions ou des incohérences dans l'architecture physique et l'allocation des fonctions. Une revue indépendante doit également être effectuée de la manière que pour les étapes de validation et vérification précédentes.

Entrées : Hiérarchie d'abstraction, couche physique du modèle

Sorties : Architecture physique vérifiée

Méthodes : Traçabilité et revue indépendante

Itérations suivantes de la boucle d'ingénierie

L'analyse du domaine est principalement utile pour les premières itérations de la boucle d'ingénierie. Son degré de détails devient insuffisant au fur et à mesure du gain de maturité du système au fil des itérations. Elle n'est pas adaptée par exemple pour la définition des éléments internes des composants physiques ou des flux d'information entre les éléments du système car elle ne traite pas des aspects internes du système.

Cependant, notre méthode s'inscrit dans un schéma de conception itératif. Elle permet de considérer les demandes des parties prenantes qui sont exprimées au fur et à mesure du cycle de vie du projet. L'analyse du domaine et la hiérarchie d'abstraction sont d'une aide précieuse dans cette perspective.

En effet, la hiérarchie d'abstraction représente une vue générale des intérêts d'un système, de sa finalité à ses composants physiques. L'ajout, le retrait ou la modification d'un de ses éléments impacte globalement un système. Par exemple, l'ajout d'une fonction généralisée entraîne la modification de la hiérarchie d'abstraction par l'ajout de relations de moyens-fins liés aux niveaux contigus, eux-mêmes ajoutés ou déjà présents.

Ainsi, la hiérarchie d'abstraction est un outil attrayant pour les parties prenantes conceptrices. Elle constitue un espace de raisonnement pour étudier l'impact global de la modification des éléments constitutifs du système, tant au niveau de ses objectifs que de ses architectures fonctionnelles et physiques.

L'utilisation de la hiérarchie d'abstraction dans les itérations futures de la boucle d'ingénierie permet une analyse en largeur, plutôt qu'en profondeur. Elle permet d'étudier l'ajout, le retrait ou la modification d'éléments du système plutôt que le niveau de détails des éléments, qui est destiné à être étudié aux couches basses du modèle du système.

Cette utilisation de la hiérarchie d'abstraction est illustrée par l'ajout de fonctionnalités pour le cas du thermostat présenté précédemment (Figure 3.2 – Chapitre 3.3).

La hiérarchie d'abstraction suivante (Figure 1.3) a été mise à jour à partir de l'exemple 3.2. Elle inclut des services permettant de réduire la température de la chaudière lorsque les résidents dorment ou sont absents (respectivement modélisés par les fonctions généralisées *Réduire la température quand les résidents sont au lit* et *Réduire la température quand les résidents sont absents*). L'ajout de ces services ne modifie pas les fonctions abstraites, mais nécessite d'ajouter des fonctions physiques et leurs formes physiques adéquates.

1.4 Synthèse

Dans notre proposition, l'analyse du domaine intervient tôt dans le cycle de vie du système, dès le recueil de données. Elle s'intègre de manière pertinente dans les premières boucles d'ingénierie, primordiales dans la réussite ou l'échec d'un projet, et elle est utilisée dans la majorité de ses étapes, tant au niveau des exigences qu'aux niveaux fonctionnels et physiques.

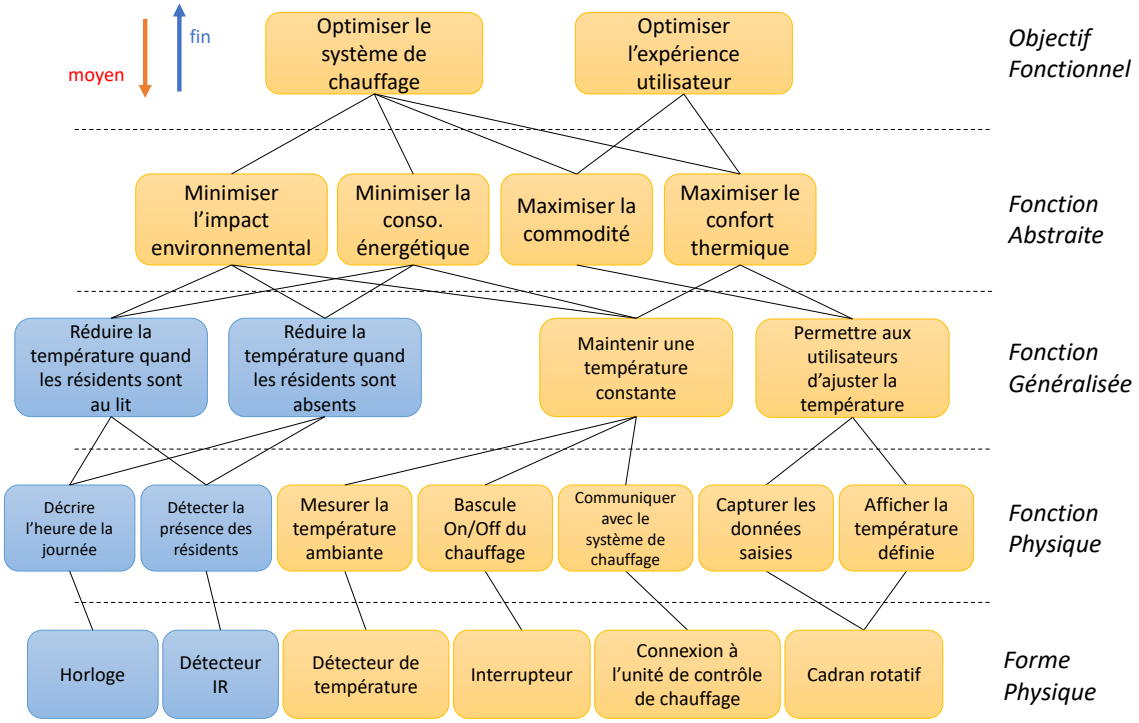


FIGURE 1.3 – Hiérarchie d'abstraction modifiée du thermostat [61]

La méthode IS+WDA permet une analyse globale du système dans les premiers stades de définition du système. L'intégration de l'analyse du domaine met en lumière les finalités, les critères d'obtention et les moyens d'action fonctionnelles et physiques du système. En promouvant l'adaptation des opérateurs, elle constitue un moyen intéressant pour analyser le comportement du système dans un grand ensemble de situations possibles. Enfin, elle s'intègre très bien dans une démarche itérative de conception centrée utilisateur, et en ce sens, elle améliore la prise en considération de l'approche HSI.

Par ses caractéristiques d'indépendance vis-à-vis des situations et des acteurs, l'analyse du domaine constitue une approche originale pour l'ingénierie système. Elle permet de construire une représentation globale du système, et procure un espace de raisonnement pour les concepteurs du système. De plus, le concept formatif est compatible avec l'analyse de la tâche classiquement utilisée.

Au travers de notre méthode, l'analyse du domaine contribue fortement à la modélisation des couches opérationnelles, logiques et physiques du modèle MBSE du système. Elle améliore de surcroît la validation et la vérification du modèle grâce aux mécanismes de traçabilité qui garantissent la complétude et la cohérence du modèle global du système.

L'analyse du domaine est principalement utile pour les premières itérations de la boucle d'ingénierie. Son degré de détails devient insuffisant au fur et à mesure

du gain de maturité du système au fil des itérations. Elle n'est pas adaptée par exemple pour la définition des éléments internes des composants physiques ou des flux d'information entre les éléments du système. Elle se concentre sur les premiers niveaux d'analyse des exigences et les architectures fonctionnelles et physiques et non pas sur leurs raffinements.

Toutefois, l'analyse du domaine reste précieuse pour ces futures itérations par sa capacité à décrire l'impact d'un ajout, d'une retrait ou d'une modification d'un élément du système sur l'ensemble des problématiques d'un domaine de travail, des objectifs jusqu'aux composants physiques.

La méthode proposée dans ce chapitre n'aborde pas les problématiques des processus de gestion du cycle de vie ou de répartition des activités selon les différentes parties prenantes. L'analyse du domaine n'est pas prévue à cet effet. Il faut toutefois rester attentif à ces aspects de gestion pour assurer l'intégration de cette analyse dans le cycle de vie du projet, et de veiller à ce qu'elle accompagne l'évolution du projet. Cela implique d'intégrer pleinement les ergonomes/facteurs humains au sein des équipes d'ingénieurs système et permettre de pallier les difficultés de collaboration entre ces disciplines [73].

Le chapitre I.4 – *Synthèse et proposition* a dressé le portrait de la méthode à concevoir pour améliorer la prise en compte des domaines HSI. La méthode IS+WDA y répond par sa mise en pratique précoce dans le cycle de vie du système suivant une démarche itérative et centrée utilisateur. Les deux cas d'étude présentés dans les chapitres suivants auront l'objectif de démontrer la généralisation de la méthode à des systèmes différents.

Quatrième partie

Cas d'application

Chapitre 1

Étude de cas NECTAR

Dans ce chapitre, nous déploierons la méthode IS+WDA sur un système permettant aux voyageurs de préparer leur vol. Ce système est caractérisé par les contraintes majoritairement intentionnelles de son domaine de travail.

1.1 Description du cas d'étude NECTAR

Le projet NECTAR est un projet financé par la DGAC (Direction Générale de l'Aviation Civile) et mené par Airbus SAS. Il ambitionne de rechercher de nouvelles configurations d'aéronefs qui allient coûts d'exploitation moindre avec de meilleures performances. Le développement d'un nouveau type d'aéronefs implique une étude d'impact sur l'ensemble du système de transport aérien comme les infrastructures, la sécurité, l'économie, l'environnement ou la gestion des voyageurs.

Le cas d'étude présent se positionne sur la gestion des passagers, en particulier sur les activités de préparation de vols. Dans ce cadre de projet NECTAR, il est nécessaire de modéliser l'ensemble du domaine mis à disposition aux voyageurs afin d'évaluer l'impact futur d'un nouveau type d'aéronef sur la gestion de l'achat de billet, de l'enregistrement ou de l'embarquement.

1.2 Application de la démarche pour NECTAR

Nous avons vu que l'analyse du domaine est une méthode pertinente pour l'ingénierie système. Cette section présente le déploiement de la méthode IS+WDA pour la modélisation du domaine de travail destiné à la préparation d'un vol pour un passager.

Les résultats de la méthode seront modélisés au travers d'une méthode MBSE générique (Figure 1.1). Celle-ci est structurée autour des couches opérationnelles, logiques et physiques. La matrice d'allocation attribue la réalisation des fonctions aux composants physiques. Enfin, les modèles de traçabilité décrivent

les liens entre les éléments de couches différentes. Le formalisme utilisé est le SysML [80].

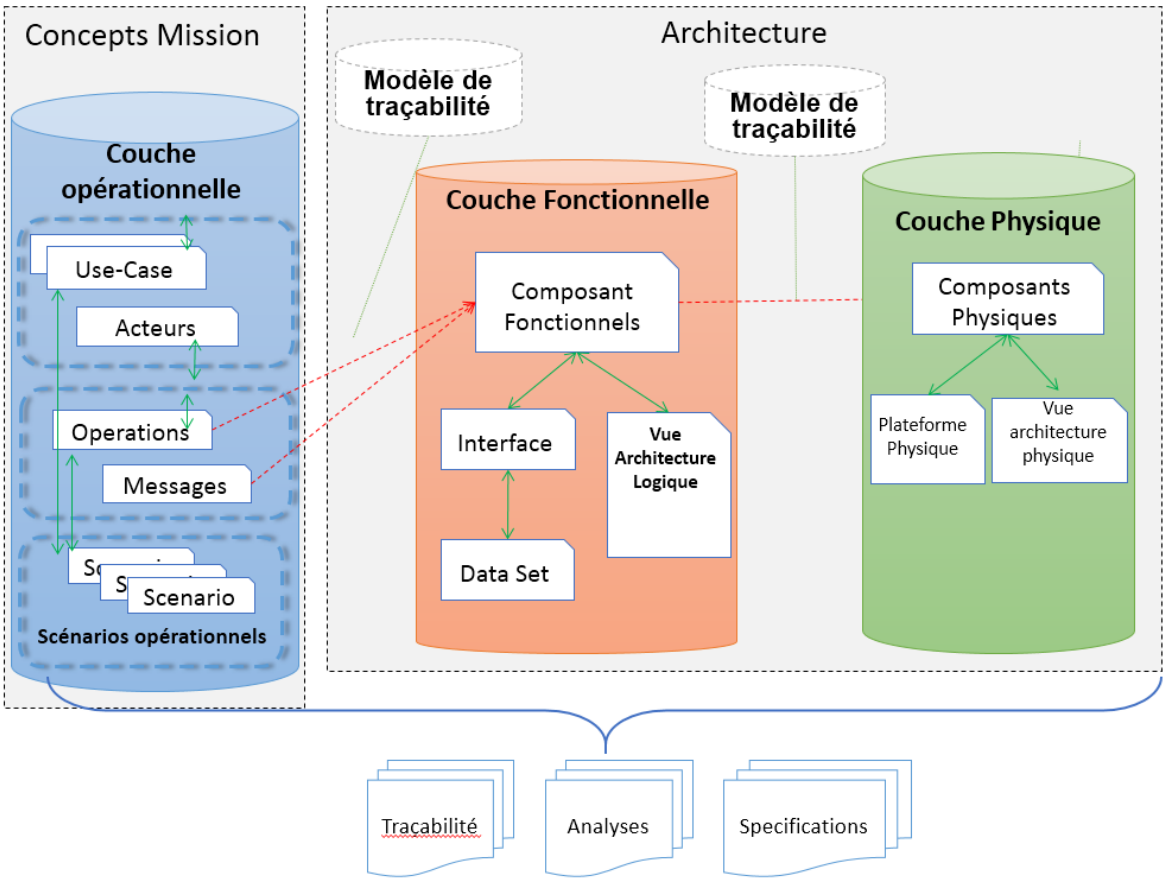


FIGURE 1.1 – Modèle MBSE générique utilisé pour NECTAR

Le but de cette étude de cas est de démontrer l'apport de l'analyse du domaine pour l'ingénierie au travers la méthode IS+WDA. Elle n'a pas vocation à modéliser l'intégralité du domaine de travail, ni d'appliquer *stricto sensu* les pratiques de l'ingénierie système, mais d'illustrer les apports de l'analyse du domaine pour l'ingénierie système. Par conséquent, les activités dédiées essentiellement aux ingénieurs système et non à l'analyse du domaine telles que la spécification des exigences ou les processus de vérification et de validation seront peu étudiées.

Étape 1 – Recueil des données

Plusieurs sources d'information ont alimenté les étapes de la méthode. Tout d'abord, les compagnies aériennes et les aéroports fournissent une importante documentation sur le fonctionnement de leurs services et de leurs infrastructures [37, 7, 30]. D'autre part, des entrevues avec des experts du domaine de l'École National de l'Aviation Civile (ENAC) ont été réalisées pour récolter des informations et pour valider les modèles produits.

Les données recueillies informent directement les étapes « Étape 2.1. – Acteurs et situations de vie » et « Étape 2.2. – Analyse du domaine » en faisant émerger les services disponibles et les acteurs présents dans le domaine de travail.

Étape 2.1. – Acteurs et situations de vie

Cette étape consiste à formaliser les acteurs et les situations de vie du domaine de travail. Elle est réalisée en parallèle de la construction de la hiérarchie d'abstraction afin que ces deux étapes s'informent mutuellement.

Un acteur contribue au domaine de travail en utilisant ou en fournissant des services qui doivent être modélisés dans la hiérarchie d'abstraction. Par exemple, les services de sûreté, d'orientation ou de contrôle de bagages sont modélisés comme formes physiques, ce qui constituent alors le point de départ d'une construction d'une branche de l'analyse du domaine. En effet, une forme physique délivre une capacité qui constitue alors une fonction physique liée par une relation moyen-fin.

La figure suivante illustre les acteurs identifiés lors du recueil des données (Figure 1.2).

Le voyageur rencontre plusieurs étapes dans son parcours. Il doit successivement être en possession d'un billet d'avion, d'une carte d'embarquement, déposer ses éventuels bagages, valider le contrôle de sécurité et se présenter à la porte d'embarquement. Il doit s'orienter dans l'aéroport pour se rendre aux services dédiés. Toutes ces étapes constituent autant de situations de vie du voyageur.

Les acteurs et les situations de vie identifiés sont les artéfacts principaux pour la modélisation des scénarios et du comportement dynamique du domaine de travail.

Étape 2.2. – Analyse du domaine

L'analyse des données récoltées montre que le domaine de travail est majoritairement soumis à des contraintes de type intentionnel (voir Chapitre 3.2.1 – *Contraintes intentionnelles-causales*). Les organisations et les règles de sécurité inhérentes aux aéroports limitent les activités des voyageurs. Ils doivent en effet se soumettre aux règlementations liées aux types de biens transportables, aux horaires de présentation à respecter ou aux justificatifs d'identité à présenter. Dans le même temps, les voyageurs ont une certaine liberté quant à l'organisation de leur vol. Ils peuvent employer différents moyens d'action selon leurs préférences, leurs situations ou selon la configuration du domaine de travail à un instant donné.

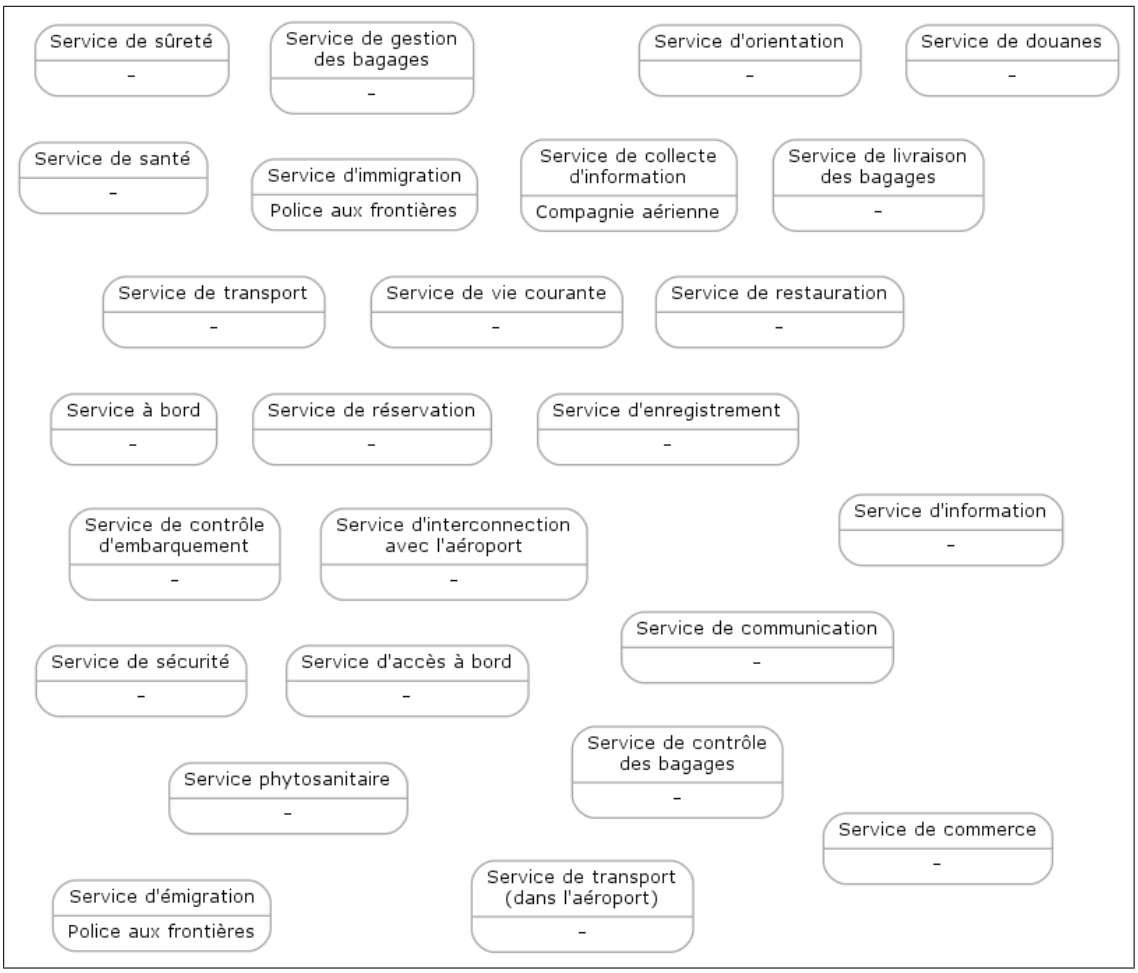


FIGURE 1.2 – Acteurs du domaine NECTAR

La hiérarchie d'abstraction du domaine de travail de la préparation d'un vol est présentée ci-dessous (Figure 1.3).

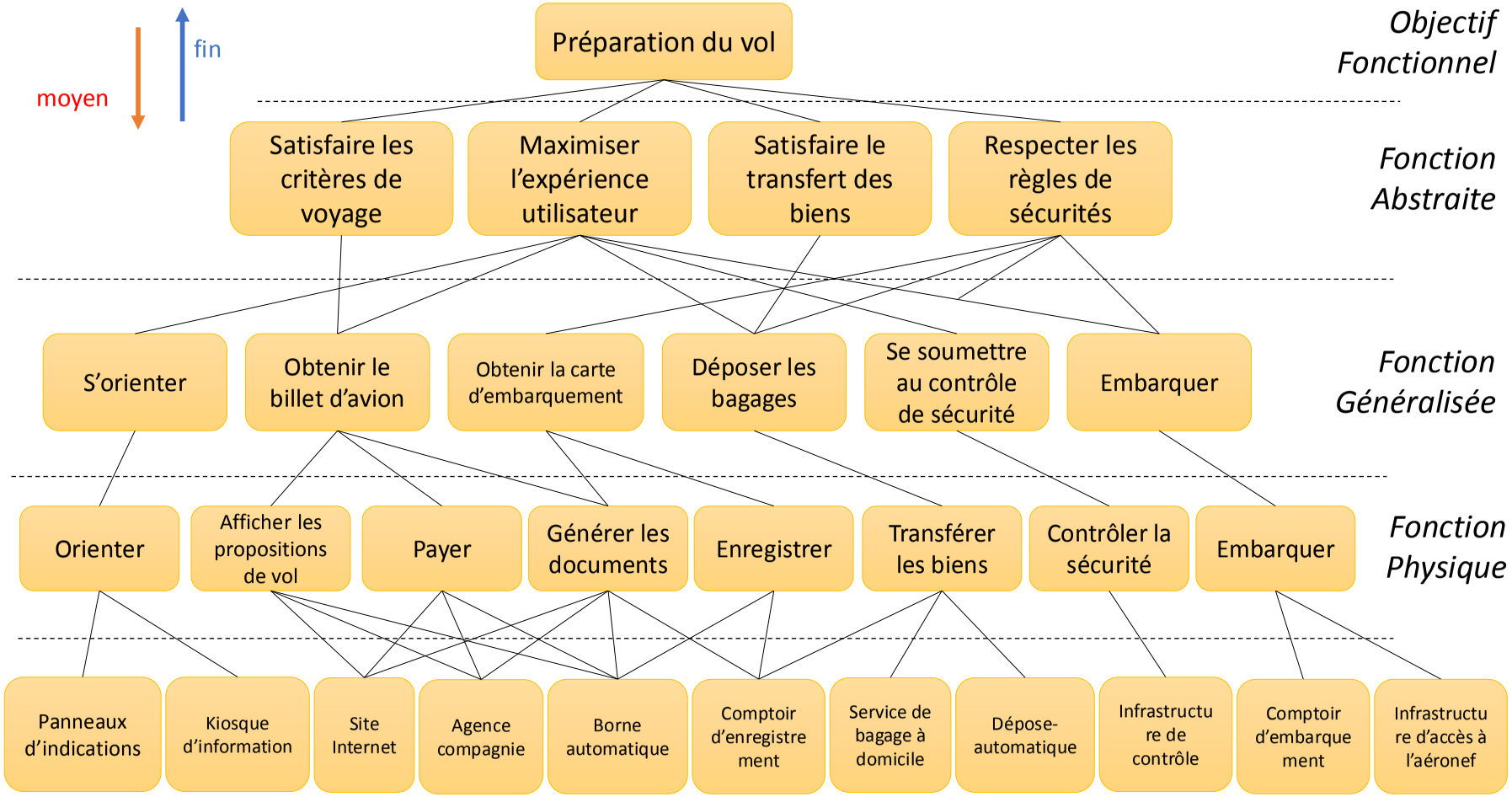


FIGURE 1.3 – Analyse du domaine pour la préparation d'un vol

Objectif Fonctionnel

Le niveau d'abstraction « Objectif Fonctionnel » identifie la finalité du système (Table 1.1). Il représente les raisons d'être du domaine de travail. Dans le cas d'étude NECTAR, la finalité du système est de fournir aux voyageurs les moyens de préparation de leur vol et de leur embarquement à bord de l'avion.

Objectif Fonctionnel		
#	**Label**	**Commentaires**
OF1	Préparation du vol	Un voyageur doit préparer son vol

TABLE 1.1 – Objectif fonctionnel du domaine de travail NECTAR

Fonction Abstraite

Le niveau d'abstraction « Fonction Abstraite » identifie les critères qui évaluent l'atteinte globale du domaine de travail envers ses objectifs (Table 1.2).

Fonction Abstraite		
#	**Label**	**Commentaires**
FA1	Satisfaire les critères de voyage	Coût, durée, compagnie, options etc.
FA2	Maximiser l'expérience utilisateur	Confort, satisfaction, durée d'attente, etc.
FA3	Satisfaire le transfert de biens	Bagages, objets volumineux etc.
FA4	Respecter des règles de sécurité	Présentation des documents d'identité, objets interdits etc.

TABLE 1.2 – Fonctions abstraites du domaine de travail NECTAR

Le système est en mesure d'atteindre les objectifs du domaine de travail seulement si les fonctions abstraites sont obtenues avec succès. Les critères qui influencent la préparation du vol pour le voyageur sont de natures différentes.

Les voyageurs choisissent un vol selon plusieurs critères comme le choix des dates, le coût, la durée du vol ou la compagnie aérienne préférentielle (*#FA1*). Ils peuvent également sélectionner des options de vol ou des assurances. Il est évident que la satisfaction de ces aspects constitue un pré-requis indispensable pour la préparation d'un vol. Les moyens disponibles pour la sélection de ces critères sont identifiés au niveau d'abstraction « Fonction Généralisée » suivant les liens moyens-fins.

Le domaine de travail doit assurer la satisfaction de l'expérience du voyageur dans un contexte qui peut s'avérer oppressant (#*FA2*). Les voyageurs sont soumis à une forte pression temporelle pour respecter les délais prescrits par les compagnies aériennes pour l'enregistrement, le dépôt de bagages ou l'heure de présentation au comptoir d'embarquement. Comme le montre le graphique ci-dessous (Figure 1.4), les taux de satisfaction diffèrent selon l'activité réalisée par les voyageurs. On constate que le passage au contrôle de sécurité recueille le plus bas niveau de satisfaction [105]. Les concepteurs du système doivent au mieux respecter l'expérience du voyageur tout en assurant le niveau de service et de sécurité du domaine.

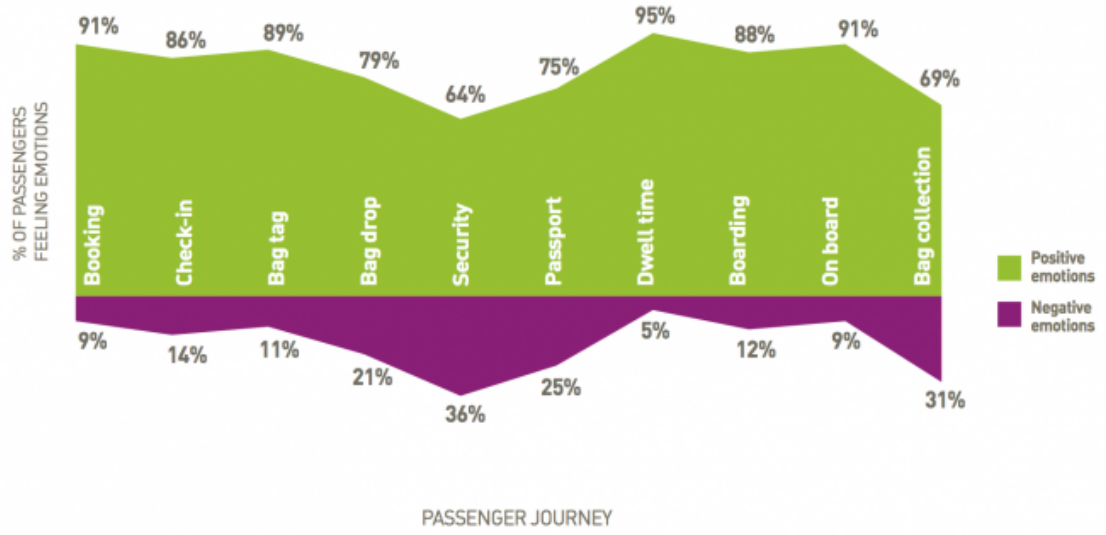


FIGURE 1.4 – Niveau de satisfaction selon les activités des voyageurs [105]

La grande majorité des voyageurs transportent des effets personnels. Le domaine de travail doit être apte à garantir le transfert de ces biens personnels dans l'ensemble des cas, lesquels peuvent être de diverses formes : bagages, objets volumineux ou même animaux (#*FA3*).

Le transport aérien est soumis à une forte règlementation du point de vue de la sécurité (#*FA4*). Le domaine de travail doit garantir le fait que les conditions de sécurité soient respectées pour autoriser les voyageurs à embarquer. La fonction abstraite induite et les relations moyens-fins montrent que les conditions de sécurité sont présentes dans la majorité des services du domaine de travail identifiés au niveau d'abstraction « Fonction Généralisée ». Il s'agit essentiellement de contrôler les passagers auprès des services d'enregistrement, de dépôt de bagages et d'embarquement et de contrôler la conformité des biens des voyageurs.

L'analyse du domaine intervient dans les premières itérations de la boucle d'ingénierie. La définition des contraintes n'est pas encore assez mature pour être détaillée finement. Pour cette raison, les contraintes du domaine sont regroupées en fonction abstraite de haut niveau d'abstraction. Le schéma suivant (Figure 1.5) illustre la traduction des contraintes en fonctions abstraites.

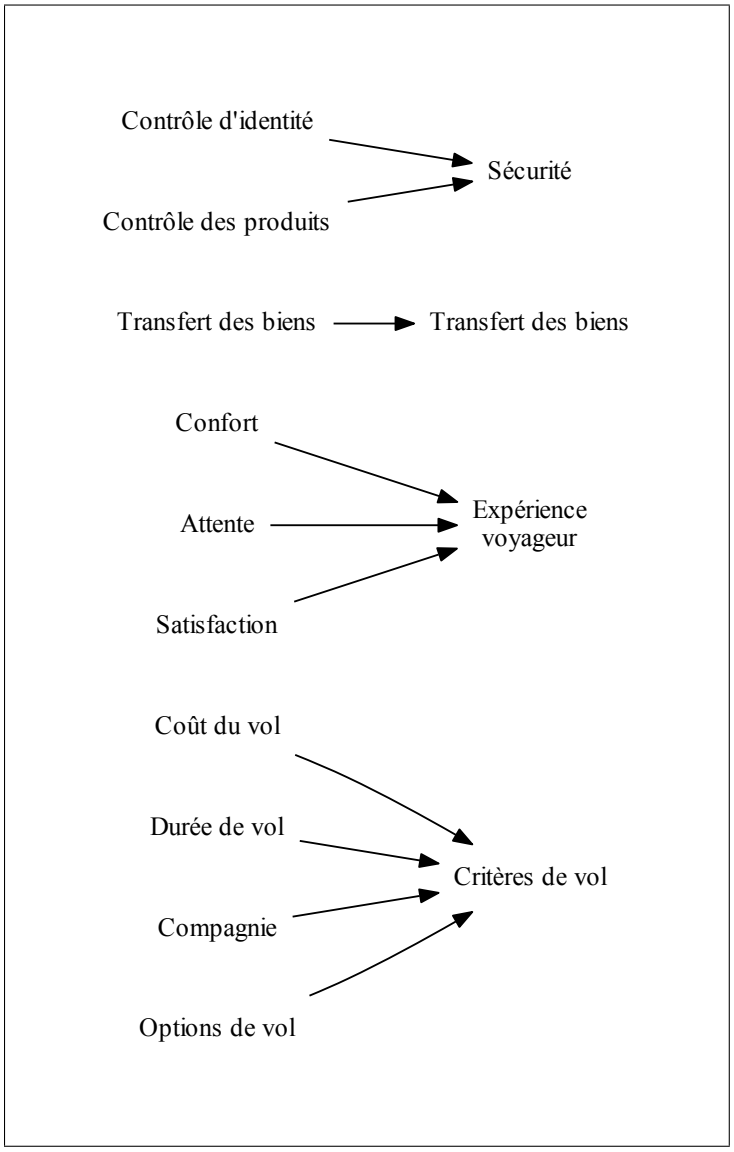


FIGURE 1.5 – Traduction des contraintes en fonctions abstraites

Fonction Généralisée

Le niveau d'abstraction « Fonction Généralisée » identifie les moyens d'action fonctionnels disponibles aux voyageurs pour préparer leur vol dans le domaine de travail (Table 1.3). À ce niveau d'abstraction, les fonctions sont identifiées indépendamment des dispositifs physiques utilisés. Les voyageurs gèrent et coordonnent l'utilisation de ces fonctions selon la situation courante et les ressources disponibles dans le domaine de travail.

Fonction Généralisée		
#	**Label**	**Commentaires**
FG1	S'orienter	Guider les voyageurs au sein de l'aéroport
FG2	Obtenir le billet d'avion	-
FG3	Obtenir la carte d'embarquement	-
FG4	Déposer les bagages	-
FG5	Se soumettre au contrôle de sécurité	-
FG6	Embarquer	-

TABLE 1.3 – Fonctions généralisées du domaine de travail NECTAR

Un voyageur est considéré comme tel dès qu'il dispose d'un billet d'avion, qu'il est enregistré, qu'il dépose ses éventuels bagages, qu'il se soumet avec succès aux conditions de sécurité et qu'il se présente à l'embarquement. Les fonctions généralisées modélisées permettent aux voyageurs de successivement passer d'un de ces états à un autre : « *Obtenir le billet d'avion* », « *Obtenir la carte d'embarquement* », « *Déposer les bagages* », « *Se soumettre au contrôle de sécurité* » et « *Embarquer* ». Les fonctions généralisées sont perçues comme des *boîtes noires*, le fonctionnement interne et les flux d'information ne sont pas précisés. À noter que la temporalité des étapes pour le voyageur n'est pas exposée dans la hiérarchie d'abstraction. Elle sera décrite lors de la modélisation des scénarios opérationnels.

Le système doit garantir la satisfaction de l'expérience des voyageurs dans le domaine de travail comme spécifié par la fonction abstraite *Maximiser l'expérience du voyageur* (*FA2*). L'analyse des informations recueillies montre que plusieurs leviers existent. Il convient tout d'abord d'aider les voyageurs à s'orienter au sein de l'aéroport pour éviter qu'ils ne se perdent et ainsi réduire les retards et les sensations de frustration ou de stress. De la même manière, il est important que le domaine de travail mette à disposition les informations relatives aux vols (horaires, porte, retard etc.). Ces indications doivent être accessibles pour l'ensemble des voyageurs, quelle que soit leur expérience dans la préparation de voyages ou de leurs conditions physiques.

Fonction Physique

Le niveau d'abstraction « Fonction Physique » expose les capacités des composants physiques inventoriés au niveau « Forme Physique », et qui sont utilisés par les fonctions généralisées pour mener à bien leurs services (Table 1.4).

Fonction Physique		
#	**Label**	**Commentaires**
FP1	Orienter	Capacité fonctionnelle pour guider les voyageurs
FP2	Afficher des propositions de vols	-
FP3	Payer	-
FP4	Générer les documents	Générer les billets, les cartes d'embarquement etc.
FP5	Enregistrer	-
FP6	Transférer les biens	-
FP7	Contrôler la sécurité	-
FP8	Embarquer	-

TABLE 1.4 – Fonctions physiques du domaine de travail NECTAR

Pour obtenir la fonction généralisée « Obtenir le billet d'avion » (*FG2*), les trois fonctions physiques « Afficher des propositions de vols » (*FP2*), « Payer » (*FP3*) et « Générer les documents » (*FP4*) ont été modélisées. En effet, elles mettent en lumière les services principaux nécessaires pour acheter un billet. Le degré d'abstraction de ces fonctions est élevé ; ces fonctions sont généralisées pour être obtenues par les formes physiques liées par les relations moyens-fins.

Deux processus principaux sont nécessaires pour délivrer la carte d'embarquement au voyageur. Il s'agit du processus d'enregistrement « Enregistrer » (#*FP5*) qui permet de confirmer la présence du voyageur et de lui assigner une place à bord. Ensuite, un document électronique ou sur papier doit être remis au voyageur pour attester de son enregistrement (fonction physique #*FP4* « Générer les documents »).

Forme Physique

Le niveau d'abstraction « Forme Physique » identifie les composants physiques disponibles aux opérateurs pour interagir avec le domaine de travail (Table 1.5).

La multiplicité des liens moyens-fins exposent les alternatives de réalisation d'une même fonction physique, et par transitivité, une même fonction généralisée. Ainsi, l'achat d'un billet peut s'effectuer soit de manière asynchrone en utilisant un site Internet, soit directement au sein de l'aéroport en utilisant les bornes automatiques ou en se présentant à une agence d'une compagnie aérienne. Étant indépendante des situations, la hiérarchie d'abstraction ne prescrit pas le moyen préférablement utilisé. La responsabilité est donnée aux voya-

Forme Physique		
#	**Label**	**Commentaires**
PFo1	Panneaux d'indication	Cartes, panneaux, guide etc.
PFo2	Kiosque d'information	-
PFo3	Site Internet	-
PFo4	Agence de compagnie	-
PFo5	Borne automatique	-
PFo6	Comptoir d'enregistrement	-
PFo7	Service de bagage à domicile	Service de récupération/livraison des bagages à domicile
PFo8	Dépose-automatique	-
PFo9	Infrastructure de contrôle de sécurité	- Tapis roulant, détecteur etc.
PFo10	Comptoir d'embarquement	-
PFo11	Infrastructure d'accès à l'aéronef	Porte, tunnel, etc.

TABLE 1.5 – Formes physiques du domaine de travail NECTAR

geurs d'utiliser un certain dispositif selon les circonstances ou les préférences de chacun. Cette idée est développée lors de la modélisation des scénarios opérationnels (voir Chapitre 1.2).

Les dispositifs physiques délivrent les fonctions physiques consommées par les fonctions généralisées. Il s'agit ici de proposer des vols (fonction physique *Proposer les vols*) qui correspondent aux critères du voyageur (fonction abstraite *Satisfaire les critères de vol*). Les dispositifs physiques proposent une fonction de paiement et de génération de document.

D'une manière analogue, l'enregistrement d'un voyageur est aujourd'hui proposé de diverses manières, soit en utilisant un service à distance (site Internet) ou un des services sur place (borne automatique, comptoir d'enregistrement).

La fonction physique « Transfert de biens » est réalisée par trois composants physique. Des dispositifs automatiques pour de dépôt de bagage sont mis à disposition pour réceptionner les bagages des voyageurs. Le comptoir d'enregistrement dispose de la fonction de dépôt de bagage. Enfin, certaines compagnies proposent à leurs clients un service de récupération de bagages à domicile.

Le contrôle des voyageurs est assuré par une infrastructure dédiée (*Infrastructure de contrôle*). Il est précoce à ce stade de l'analyse d'identifier précisément les constituants internes de cette infrastructure. Cette idée est similaire pour l'analyse du dispositif d'accueil des voyageurs pour leur embarquement (*Infrastructure d'accès à l'avion*).

Enfin, Les panneaux et les écrans d'affichage sont en charge d'informer et de guider les voyageurs dans l'enceinte de l'aéroport.

Modélisation de la hiérarchie d'abstraction

Les méthodes MBSE promeuvent l'utilisation de modèles comme support de conception. La hiérarchie d'abstraction doit donc être modélisée dans le modèle global du système dans le but d'être traçable, maintenue et partagée avec les autres parties prenantes.

Le diagramme de définition de blocs (*Block Definition Diagram* – BDD) ci-dessous illustre la modélisation de la hiérarchie d'abstraction dans le modèle global (Figure 1.6). Le stéréotype de chaque bloque indique le niveau d'abstraction auquel l'élément appartient.

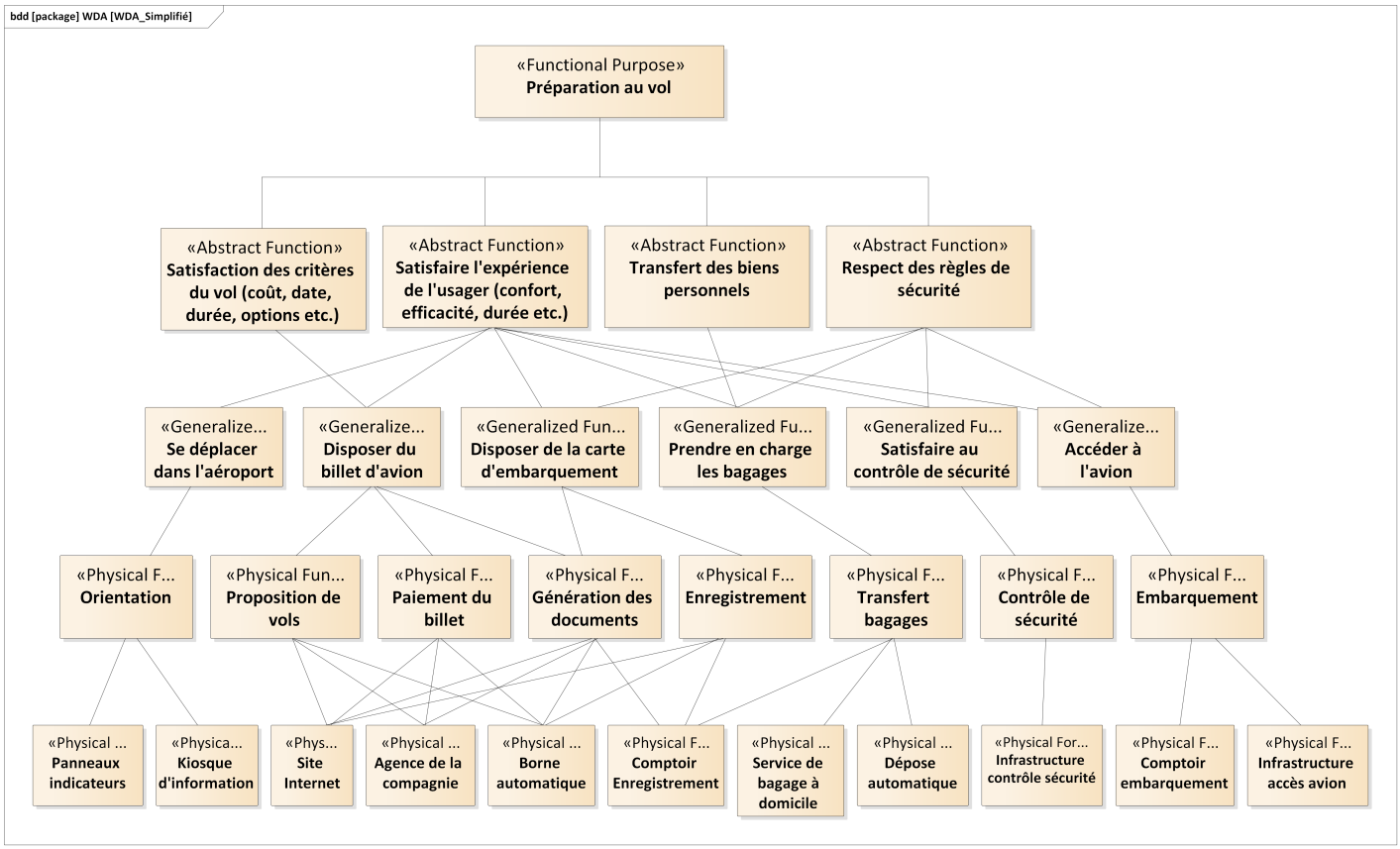


FIGURE 1.6 – Modélisation en SysML de la hiérarchie d'abstraction

Étape 3 – Analyse des exigences initiales

L'analyse des exigences initiales identifie les capacités fonctionnelles et non-fonctionnelles du système ainsi que les contraintes des parties prenantes utilisatrices. Comme expliqué dans la méthode IS+WDA, l'analyse du domaine se concentre sur l'identification des services disponibles aux opérateurs ainsi qu'aux critères de mesure pour l'obtention des objectifs du domaine.

Le diagramme d'exigences (Figure 1.7) modélise les besoins initiaux du domaine de travail de NECTAR. Les exigences produites à ce niveau d'analyse permettent d'établir un base contractuelle préliminaire avec les différentes parties prenantes du projet.

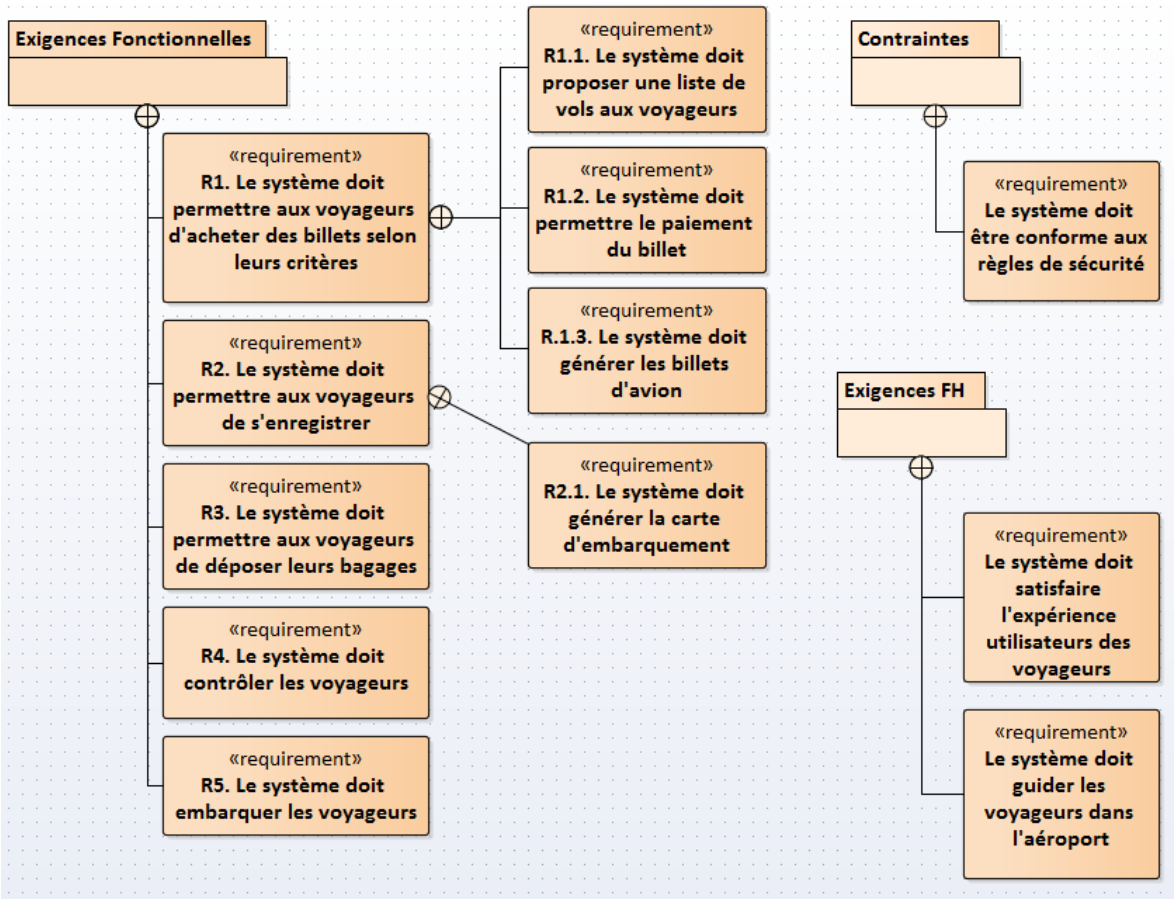


FIGURE 1.7 – Modélisation des exigences

Les exigences sont généralement catégorisées pour améliorer la visibilité du système et pour allouer leur mise en œuvre aux parties prenantes adéquates. Les exigences sont d'une part regroupées en exigences fonctionnelles et non-fonctionnelles, mais elles peuvent être groupées de manière plus précise. Par exemple, la gestion des exigences liées à la satisfaction de l'expérience utilisateur est sous la responsabilité des ergonomes, des praticiens des facteurs humains ou aux concepteurs IHM (Interactions Homme-Machine). Pour NECTAR,

les exigences sont groupées selon les catégories « Exigences Fonctionnelles », « Facteurs Humains » et « Contraintes ».

D'autre part, les ingénieurs système doivent traduire les éléments les fonctions généralisées en exigences, en s'appuyant sur les conventions de rédaction (voir Chapitre 1.2.5 – *Liens entre les normes et le cycle de vie d'un système*).

La méthode IS+WDA montre que la hiérarchie d'abstraction représente une source d'informations pour l'analyse des exigences. Les fonctions généralisées et les fonctions physiques identifient les services mis à dispositions aux opérateurs pour atteindre les objectifs du domaine de travail. Dans le cas de NECTAR, ces deux catégories de fonction exposent les services disponibles aux voyageurs pour préparer leur vol. Elles constituent en ce sens des exigences fonctionnelles pour l'ingénierie. Par exemple, la fonction généralisée « *Obtenir le billet d'avion* » (*#FG2*) est traduite par l'exigence « *R1. Le système doit permettre aux voyageurs d'acheter des billets d'avion selon leurs critères* ». Les liens moyens-fins montrent que la fonction généralisée s'obtient grâce aux trois fonctions physiques *Proposition de vols*, *Paiement du billet* et *Génération du document*. Ces trois fonctions physiques sont exprimées par les exigences R1.1, R1.2 et R1.3 avec un lien de décomposition vers l'exigence R1. Ainsi, les éléments de la hiérarchie d'abstraction sont traçables dans le modèle des exigences.

Le domaine de travail est composé majoritairement de contraintes intentionnelles (voir Chapitre 3.2.1 – *Contraintes intentionnelles-causales*). De ce fait, les fonctions abstraites traitent d'aspects liés aux aspects législatifs (« Respecter les règles de sécurité ») et aux aspects liés aux motivations des opérateurs (« Satisfaire les critères de vol », « Maximiser l'expérience du voyageur » etc). Elles sont considérées comme des exigences non-fonctionnelles organisées selon deux catégories dans le diagramme des exigences. La première catégorie « Facteurs humains » regroupe les exigences de satisfaction de l'expérience utilisateur du voyageur et d'aide à l'orientation. La prise en compte de ces exigences sera possiblement déléguée à des ergonomes. La seconde catégorie « *Contraintes* » modélise la nécessité de respect des règles de sécurité.

Les éléments de la hiérarchie d'abstraction ont été alloués à des catégories d'exigences différentes. Cela montre que l'allocation des exigences issues de la hiérarchie d'abstraction n'est pas systématique ; elle nécessite un arbitrage des parties prenantes conceptrices pour caractériser une exigence comme fonctionnelle ou non-fonctionnelle.

Cas d'utilisation

Les cas d'utilisation [58] décrivent les exigences comportementales entre un système et les acteurs externes (humains ou non). Ils exposent les services fournis par le système avec lesquels les acteurs interagissent pour atteindre leurs objectifs. La modélisation des cas d'utilisation est une activité essentielle durant

la phase d'analyse des besoins. Ils sont définis à un haut niveau d'abstraction en adoptant une vue *boîte noire* ; l'analyse du fonctionnement interne du système étant dévolue aux couches plus basses du modèle du système. Les cas d'utilisation sont modélisés par les diagrammes de cas d'utilisation en SysML [80].

Au regard des caractéristiques des cas d'utilisation, il apparaît des analogies entre eux et l'analyse du domaine. Les cas d'utilisation exposent les services disponibles dans le domaine de travail aux acteurs qui leur permettent d'atteindre leurs objectifs. L'analyse du domaine identifie les objectifs du système et les moyens fonctionnels et physiques pour y parvenir (autrement dit les contraintes). Néanmoins, l'analyse du domaine ne permet pas d'identifier les acteurs qui réalisent les cas d'utilisation de par son indépendance vis-à-vis des acteurs. Il faut alors se référer aux éléments produits lors de l'Étape 2.2. – Analyse du domaine. Ici, l'acteur principal est le *Voyageur*.

Le diagramme de cas d'utilisation (Figure 1.8) modélise les cas d'utilisation du domaine de travail de NECTAR.

Conceptuellement, les fonctions généralisées sont assimilées à des fonctions de service (en orange sur le diagramme) et les fonctions physiques sont comparables à des fonctions techniques (en bleu sur le diagramme). Pour rappel, les fonctions de services modélisent les services rendus aux utilisateurs, les fonctions techniques étant des fonctions en complément des fonctions de service. Les fonctions généralisées et physiques sont conceptuellement analogues à cette distinction.

Les relations qui lient les fonctions de service et les fonctions techniques sont ici des relations de spécialisation. Ils indiquent que les cas d'utilisation spécialisés héritent de la description par leur parent commun [97]. Par exemple, le cas d'utilisation « S'orienter » possède deux cas d'utilisation enfants *S'orienter avec les panneaux indicateurs* et *S'orienter avec le kiosque d'information*. Cela indique que le voyageur peut s'orienter selon ces deux alternatives.

Scénario opérationnel

L'analyse du domaine est complémentaire de la modélisation des scénarios opérationnels (Chapitre 3.5.3 – *Liens entre les approches de l'ingénierie cognitive*). La hiérarchie d'abstraction représente la cartographie des contraintes fonctionnelles et physiques du domaine de travail. Elle est utile comme espace de réflexion et de vérification pour la modélisation des scénarios opérationnels. En effet, selon une situation donnée, le parcours suivant les liens moyens-fins de la hiérarchie d'abstraction fait émerger des alternatives pour la résolution de l'objectif attendu par la situation.

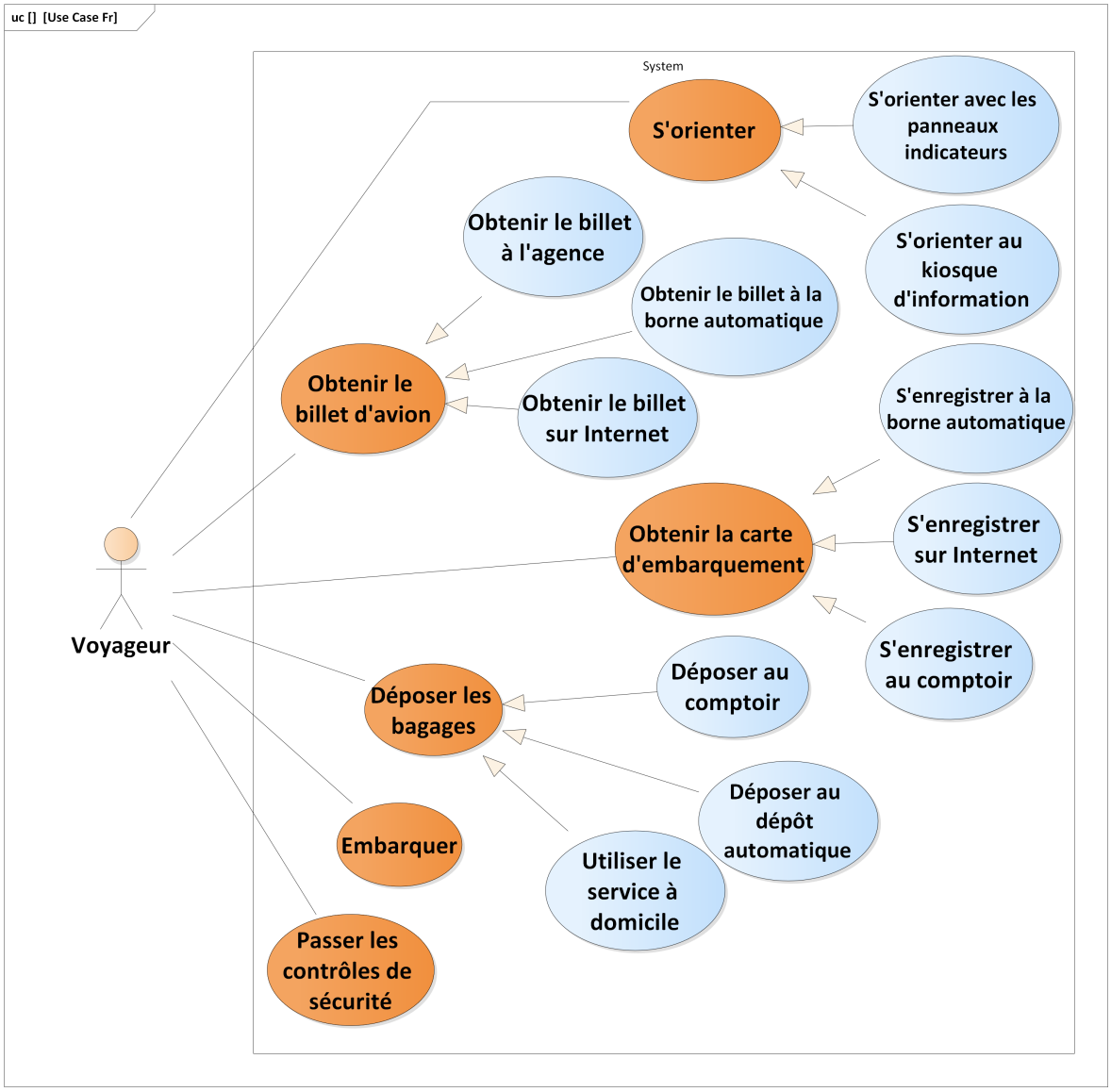


FIGURE 1.8 – Cas d'utilisation de NECTAR

Par exemple, l'illustration suivante (Figure 1.9) montre le parcours de la hiérarchie d'abstraction pour l'achat d'un billet. Les numéros indiquent l'ordre chronologique dans lequel la hiérarchie d'abstraction est parcouru. Elle se lit de la manière suivante :

1. Le voyageur prépare son vol ①
2. Il a défini à peu près les critères de son vol ②
3. Il s'oriente à l'aide des panneaux indicateurs ③ vers la borne automatique ④ qui fournit le service d'achat de billet ⑤
4. Il consulte les propositions de vol ⑥ et sélectionne l'une d'entre elle
5. Il paye ⑦ et retire son billet ⑧

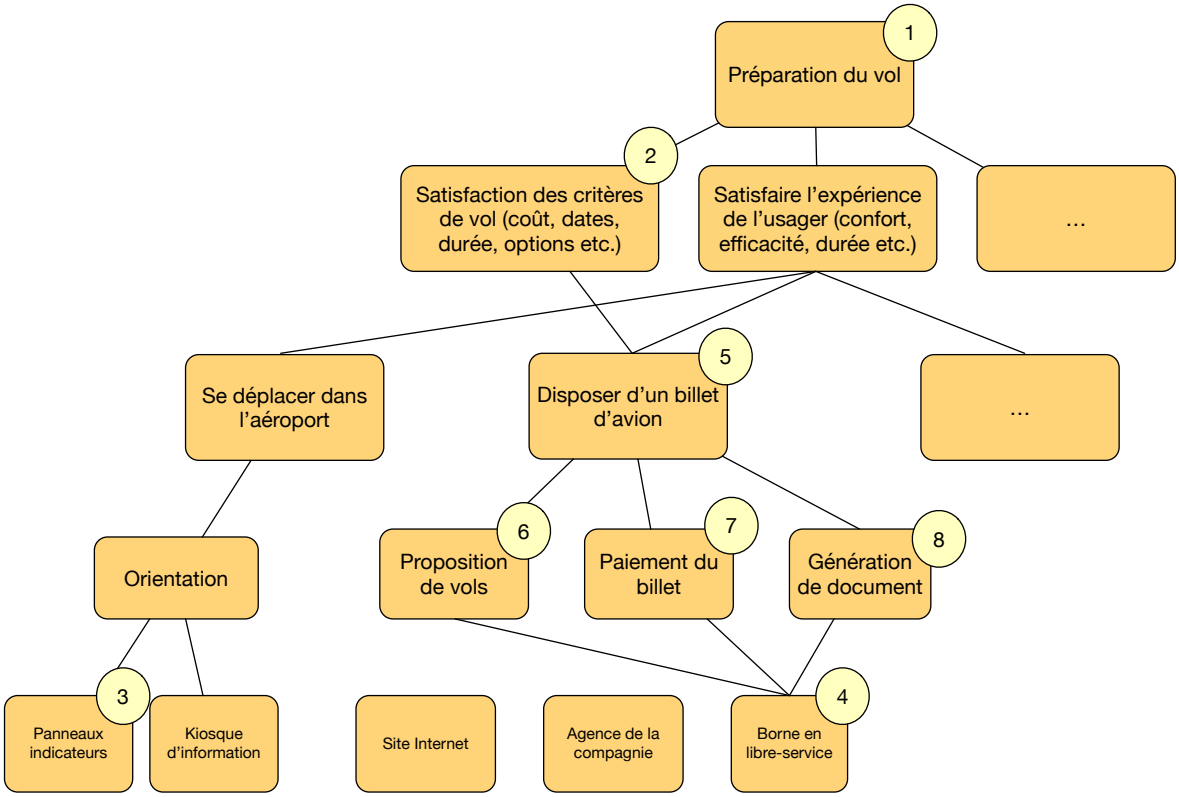


FIGURE 1.9 – Parcours de la hiérarchie d'abstraction

Le parcours de la hiérarchie d'abstraction a permis de faire émerger un des scénarios opérationnels possibles du domaine. Plusieurs alternatives sont modélisées dans la hiérarchie d'abstraction pour ce cas d'utilisation. En effet, en parcourant la hiérarchie d'abstraction à partir de la fonction généralisée « Disposer du billet d'avion », on constate que les trois fonctions physiques sont mobilisées pour obtenir ce résultat (« Proposition de vols », « Paiement du billet » et « Génération des documents »). Au niveau d'abstraction suivant, les formes physiques « Site Internet », « Agence de la compagnie » et « Borne automatique » fournissent ces fonctions physiques.

L'ensemble des scénarios opérationnels résultant du parcours de la hiérarchie d'abstraction sont alors modélisés en SysML par un diagramme d'activité (Figure 1.10). Le diagramme suivant modélise les divers moyens pour acheter un billet d'avion. En SysML, le rond noir représente le point de départ du scénario, les rectangles modélisent les actions réalisées, les losanges expriment un nœud décisionnel, le rond final exprime la fin du scénario. Le scénario opérationnel représente une instance du cas d'utilisation « Obtenir un billet d'avion ».

Outre les acteurs identifiés lors de l'Étape 2.1. – Acteurs et situations de vie, la modélisation des scénarios peut s'appuyer sur la méthode des *personas* pour modéliser plusieurs types de voyageurs (décrite au Chapitre 2.5 – *L'ingénierie cognitive pour l'analyse de l'activité humaine*). Ainsi, l'étude du cabinet SITA [105]

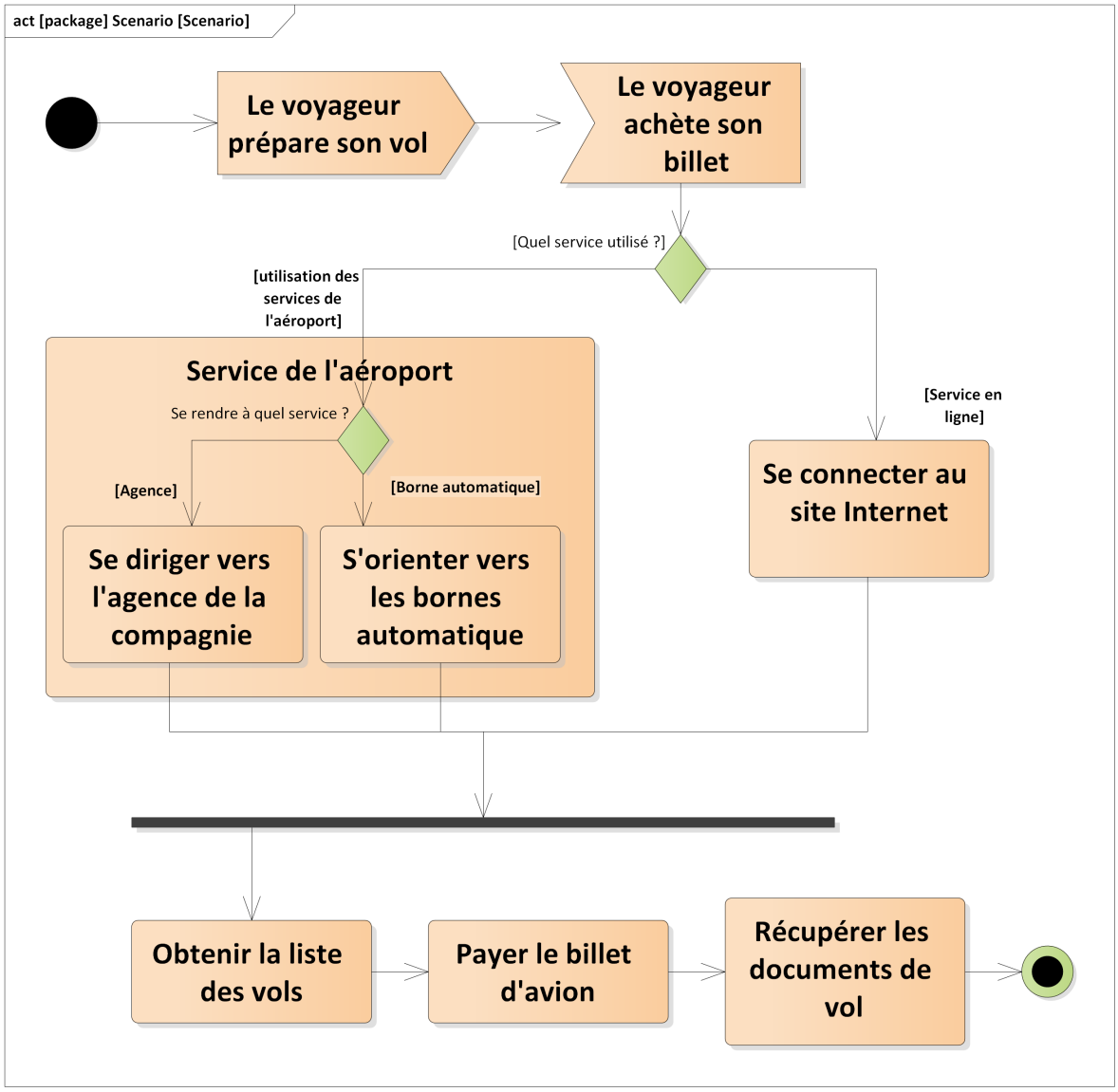


FIGURE 1.10 – Scénario opérationnel pour l'achat d'un billet d'avion

a distingué quatre *personas* parmi les voyageurs britanniques : le « planificateur prudent » (*Careful Planner*), « l'aventurier à l'esprit-ouvert » (*Open-minded adventurer*), « le voyageur choyé » (*Pampered*) et « le voyageur indépendant et hyper-connecté » (*Independent and hyper connected*). Leur profil est décrit dans la figure suivante (Figure 1.11).

Ces *personas* décrivent des catégories de voyageurs qui se distinguent par les moyens qu'ils entreprennent pour préparer leur voyage (en ligne, sur place), le niveau de confort espéré, le niveau d'enthousiasme ou d'anxiété ressenti lors de la préparation d'un vol. Il est alors intéressant pour les concepteurs du système de vérifier que les scénarios opérationnels modélisés sont conformes à la description des *personas*.

FIGURE 1.11 – Quatre personas de voyageurs [105]

L'utilisation des *personas* contextualise un scénario selon ses caractéristiques. Par exemple, le persona « Voyageur indépendant et hyper-connecté » aura probablement tendance à utiliser les services en ligne pour préparer son vol (branche de droite sur le modèle 1.10). Ce scénario est facilement traçable sur la hiérarchie d'abstraction (*Disposer d'un billet d'avion* => *Proposition de vols, Paiement, Génération des documents* => *Site Internet*).

Étape 4 – Spécification des exigences

L'analyse du domaine subvient peu aux besoins de la spécification des exigences (voir Chapitre 1.1.2 – *Spécification des exigences*). Les ingénieurs système sont responsables de la traduction des besoins initiaux en exigences spécifiées. Ce travail ne rentre pas dans le cadre de cette étude.

Étape 5 – Validation des exigences

L'étape de la validation des exigences a pour but de garantir le fait que la réponse apportée est en accord avec le problème posé. À ce niveau, la validation des exigences se fonde sur une revue conjointe entre les parties prenantes. Si des divergences existent, des compromis ou une nouvelle itération de la méthode peuvent être proposés.

Les matrices d'allocation permettent de garantir la complétude des modèles. Par exemple, la matrice d'allocation suivante (Figure 1.12) montre que les exigences modélisées sont bien complètes vis-à-vis de la hiérarchie d'abstraction.

	R1. Achat billet	R1.1. Proposer des vols	R1.2. Paiement	R1.3. Générer les billets	R2. S'enregistrer	R2.1. Générer la carte d'embarquement	R3. Déposer les bagages	R4. Contrôler les voyageurs	R5. Embarquer	R6. Respecter les règles de sécurité	R7. Satisfaire l'UX	R8. Guider les voyageurs
WDA::Satisfaction des critères de vol		x										
WDA::Satisfaire l'expérience utilisateurs											x	
WDA::Transfert des biens personnels							x					
WDA::Respect des règles de sécurité								x				
WDA::Se déplacer dans l'aéroport												x
WDA::Disposer du billet d'avion	x											
WDA::Proposition de vols		x										
WDA::Paiement			x									
WDA::Génération des documents				x		x						
WDA::Disposer de la carte d'embarquement					x	x						
WDA::Prendre en charge les bagages							x					
WDA::Satisfaire au contrôle de sécurité								x		x		
WDA::Accéder à l'avion									x			

FIGURE 1.12 – Matrice d'allocation de la hiérarchie d'abstraction et les exigences

Étape 6 – Conception Logique

L'étape de la conception logique a pour objectif de modéliser l'architecture fonctionnelle du système. L'architecture fonctionnelle est représentée selon les points de vue de la décomposition, des flux et du comportement dynamique. Comme expliqué précédemment (Chapitre 1.2.1 – *Processus logique*), l'analyse du domaine est à même de guider la décomposition fonctionnelle dans les premières itérations de la méthode. Elle reste néanmoins peu appropriée pour décrire les flux d'information et le comportement dynamique du système.

La décomposition fonctionnelle est modélisée par la « structure de décomposition fonctionnelle » (*Functional Breakdown Structure* – FBS). La sémantique

de décomposition est représentée par les losanges noirs du diagramme. Ainsi, la fonction « Service d'achat de billet » est décomposée en trois sous-fonctions « Proposition de vol », « Paiement » et « Génération de document » (Figure 1.13). La décomposition fonctionnelle n'est pas liée à une implémentation architecturale particulière, elle inventorie seulement les fonctions et leurs sous-fonctions. L'allocation des fonctions aux composants physiques est réalisée à l'étape 8 – Conception physique.

La fonction physique « Génération de documents » est utilisée par les deux fonctions généralisées « Disposer d'un billet d'avion » et « Disposer de la carte d'embarquement »(Figure 1.3). Cette particularité implique un choix de conception pour l'architecture fonctionnelle du système.

Une première solution est d'allouer une fonction de génération de documents au service des billets d'avion et une autre fonction de génération de documents au service d'enregistrement (Option A). La seconde option est de définir une fonction de génération de documents indépendante qui sera utilisée par les services d'achat des billets d'avion et d'enregistrement (Option B). La première solution a été retenue pour privilégier un couplage faible de la fonction de génération de documents. Ce choix peut être possiblement révisé dans les futures itérations de la méthode.

Le FBS développé ne modélise pas les fonctions physiques dont la multiplicité des liens moyens-fins est de *1..1* avec la fonction généralisée. Autrement dit, la fonction généralisée est décomposée en une unique fonction physique. Par exemple, la fonction physique « Transférer les biens (#FP6) » ne possède qu'un seul lien moyen-fin vers la fonction généralisée « Déposer les bagages (#FG4) ». En termes de modélisation, il n'est pas intéressant de décomposer cette fonction généralisée avec l'unique fonction physique liée.

L'analyse du domaine expose les fonctions du domaine aux niveaux « Fonction Généralisée » et « Fonction Physique ». Ces fonctions représentent des fonctions à un haut niveau d'abstraction, elles constituent donc en ce sens le premier rang de décomposition de l'architecture fonctionnelle. Les fonctions de haut niveau seront davantage affinées au fur et à mesure des futures itérations du processus de conception.

Étape 7 – Vérification de l'architecture fonctionnelle

L'architecture fonctionnelle doit être vérifiée pour attester de sa complétude face aux autres modèles du système. De la même manière que pour la validation des exigences, la comparaison entre l'analyse du domaine et l'architecture fonctionnelle permet d'identifier des insuffisances ou des contradictions (voir Chapitre 1.2.2 – *Vérification fonctionnelle*). La matrice d'allocation suivante montre que tous les éléments ont été modélisés (Figure 1.14).

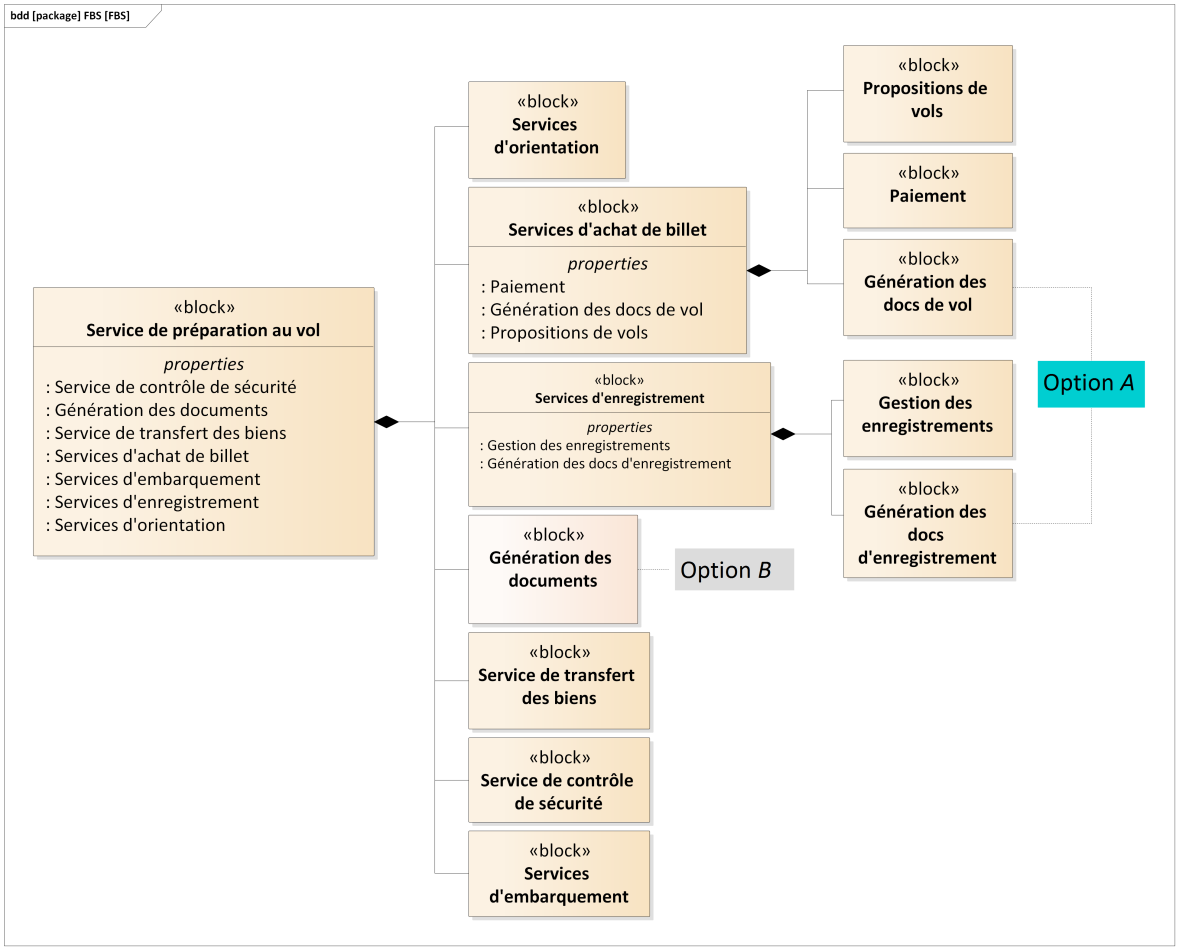
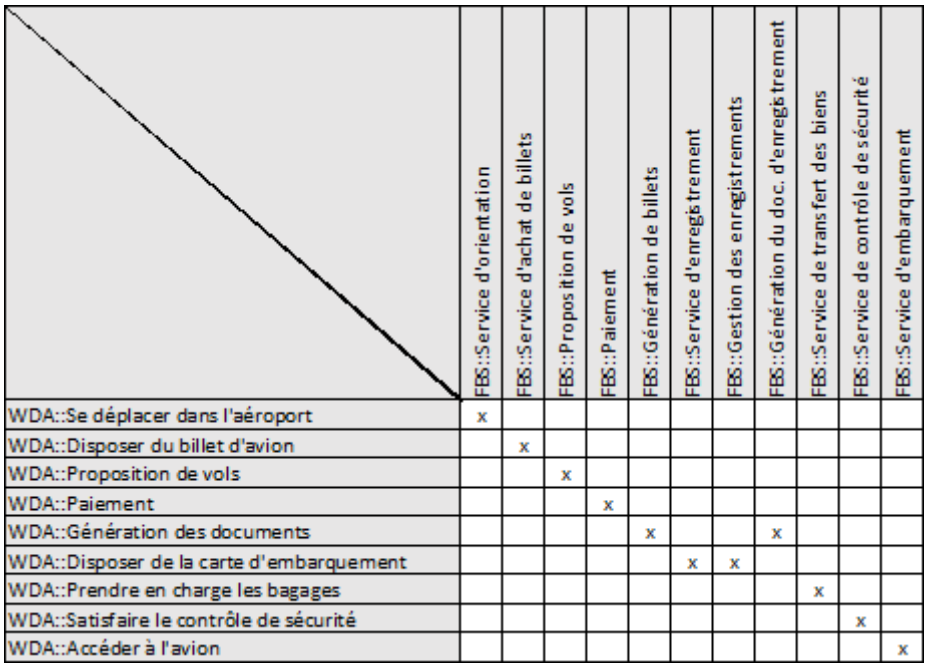


FIGURE 1.13 – Modèle FBS

Étape 8 - Conception physique

Les composants organiques du système sont modélisés dans la couche physique du modèle par la structure de décomposition physique (*Physical Breakdown Structure* – PBS). Ils sont ensuite successivement décomposés en sous-composants qui détaillent davantage l'architecture physique. Le PBS ne constitue cependant pas à proprement parler l'architecture physique complète du système, elle ne présente pas par exemple les interfaces et les relations avec les autres éléments du système. Cette activité est dédiée aux modèles de structure interne et aux définitions d'interface.

La hiérarchie d'abstraction expose les éléments physiques du domaine de travail au niveau d'abstraction « Forme Physique ». Ces éléments physiques sont décrits à un haut niveau d'abstraction, pour cette raison les formes physiques modélisées constituent les composants physiques de premier rang dans le modèle PBS. La décomposition de ces composants est complétée avec les futures itérations du processus.



	FBS::Service d'orientation	FBS::Service d'achat de billets	FBS::Proposition de vols	FBS::Paiement	FBS::Génération de billets	FBS::Service d'enregistrement	FBS::Gestion des enregistrements	FBS::Génération du doc. d'enregistrement	FBS::Service de transfert des biens	FBS::Service de contrôle de sécurité	FBS::Service d'embarquement
WDA::Se déplacer dans l'aéroport	x										
WDA::Disposer du billet d'avion		x									
WDA::Proposition de vols			x								
WDA::Paiement				x							
WDA::Génération des documents					x			x			
WDA::Disposer de la carte d'embarquement						x	x				
WDA::Prendre en charge les bagages									x		
WDA::Satisfaire le contrôle de sécurité										x	
WDA::Accéder à l'avion											x

FIGURE 1.14 – Matrice d'allocation entre la hiérarchie d'abstraction et le FBS

Le diagramme de définition de blocs suivant 1.15 présente une structure de décomposition physique issue de la hiérarchie d'abstraction.

Les modèles FBS et PBS listent hiérarchiquement les fonctions et les composants physiques du système, mais ils ne représentent pas leurs relations. Le processus de conception physique traite de cet aspect avec l'activité d'allocation des fonctions aux composants physiques. La matrice d'allocation ci-dessous (Figure 1.16) expose l'allocation des fonctions aux composants physiques.

La matrice d'allocation est modélisée à partir de la hiérarchie d'abstraction. Les liens moyens-fins expriment la mise en œuvre des fonctions physiques par les formes physiques. Cela se traduit en termes de modélisation système par l'allocation des fonctions identifiées dans le FBS aux composants physiques du PBS. Par exemple, les trois fonctions « FBS::Proposition de vols », « FBS::Paiement » et « FBS::Génération de documents » sont allouées au composant « PBS::Borne automatique ».

La matrice d'allocation permet d'analyser le couplage entre les fonctions et les composants physiques. Suivant l'exemple précédent, l'élément « PBS::Borne automatique » est couplé avec les trois fonctions. Ce résultat montre que la borne automatique est sollicitée pour la réalisation de trois fonctions. Une défaillance de la borne automatique impacte alors directement ces trois services.

Plusieurs solutions se présentent pour les concepteurs du système, qui ne s'excluent d'ailleurs pas mutuellement. Par exemple, les concepteurs doivent porter

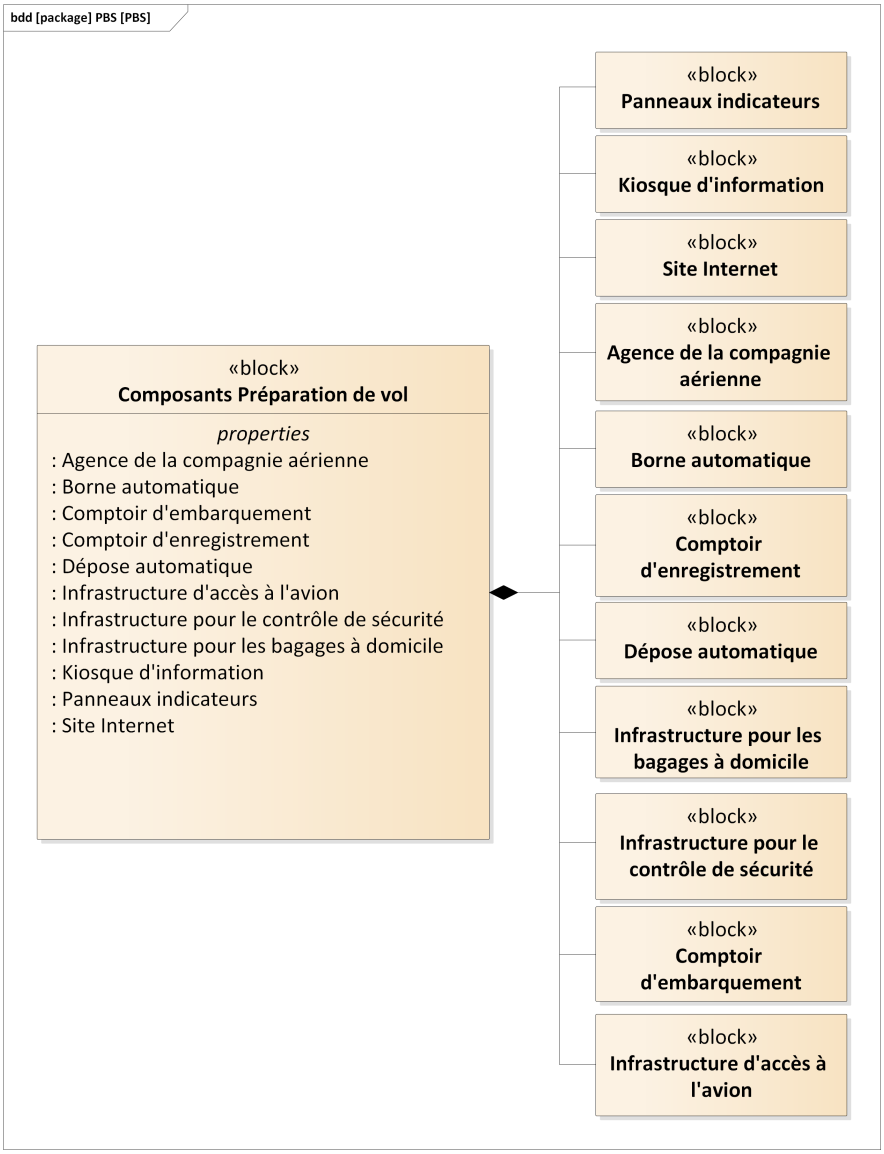


FIGURE 1.15 – Modèle de décomposition physique PBS

leurs efforts sur la réduction des pannes de ce composant en améliorant la solution technique ou en proposant une plus forte maintenance. Ils peuvent aussi s'appuyer sur la mise en avant des alternatives comme le montrent les scénarios opérationnels (voir Chapitre 1.2 – *Scénario opérationnel*), si la borne automatique est en panne, les voyageurs peuvent se rendre au comptoir de l'agence ou se connecter au site Internet. La hiérarchie d'abstraction est d'ailleurs idoine pour visualiser les alternatives proposées dans le domaine de travail.

D'une part, la hiérarchie d'abstraction indique directement l'allocation des fonctions aux composants physiques grâce aux relations moyens-fins. D'autre part, elle représente un outil de vérification pour garantir que l'allocation est correcte en comparant les éléments liés et la multiplicité des liens. Par exemple, l'élément « PBS::Borne automatique » possède trois liens moyens-fins qui doivent

	FBS::Service d'orientation	FBS::Service d'achat de billets	FBS::Proposition de vols	FBS::Paiement	FBS::Génération de billets	FBS::Service d'enregistrement	FBS::Gestion des enregistrements	FBS::Génération du doc. d'enregistrement	FBS::Service de transfert des biens	FBS::Service de contrôle de sécurité	FBS::Service d'embarquement
PBS::Panneaux indicateurs	x										
PBS::Kiosque d'information	x										
PBS::Site Internet		x	x	x	x	x	x	x			
PBS::Agence de la compagnie		x	x	x	x						
PBS::Borne automatique		x	x	x	x	x	x	x			
PBS::Comptoir d'enregistrement						x	x	x	x		
PBS::Dépose automatique									x		
PBS::Infrastructure pour les bagages à domicile									x		
PBS::Infrastructure pour le contrôle de sécurité										x	
PBS::Comptoir d'embarquement											x
PBS::Infrastructure d'accès à l'avion											x

FIGURE 1.16 – Matrice d'allocation FBS–PBS

se traduire par autant de liens dans la matrice d'allocation.

Étape 9 – Vérification de l'architecture physique

Le modèle de traçabilité représente l'architecture globale du système en liant les éléments des couches successives du modèle du système. Elle garantit la complétude de la solution de conception en modélisant successivement l'allocation des exigences aux cas d'utilisation, aux cas d'utilisation aux fonctions de l'architecture fonctionnelle puis aux composants de l'architecture physique.

L'extrait du modèle suivant (Figure 1.17) montre la traçabilité des éléments liés à l'achat de billet, de l'exigence aux composants physiques avec lesquels le voyageur interagit. La hiérarchie d'abstraction est conceptuellement proche par son parcours de la matrice de traçabilité : de la finalité, aux moyens fonctionnelles puis aux moyens physiques.

1.3 Itérations suivantes

La méthode IS+WDA est itérative. Elle permet de prendre en considération les demandes des parties prenantes qui s'expriment au fur et à mesure du cycle de vie du projet, et d'effectuer les corrections si nécessaire.

Dans cette perspective, considérons que les parties prenantes souhaitent inclure les services de restauration dans le domaine de travail. En effet, elles es-

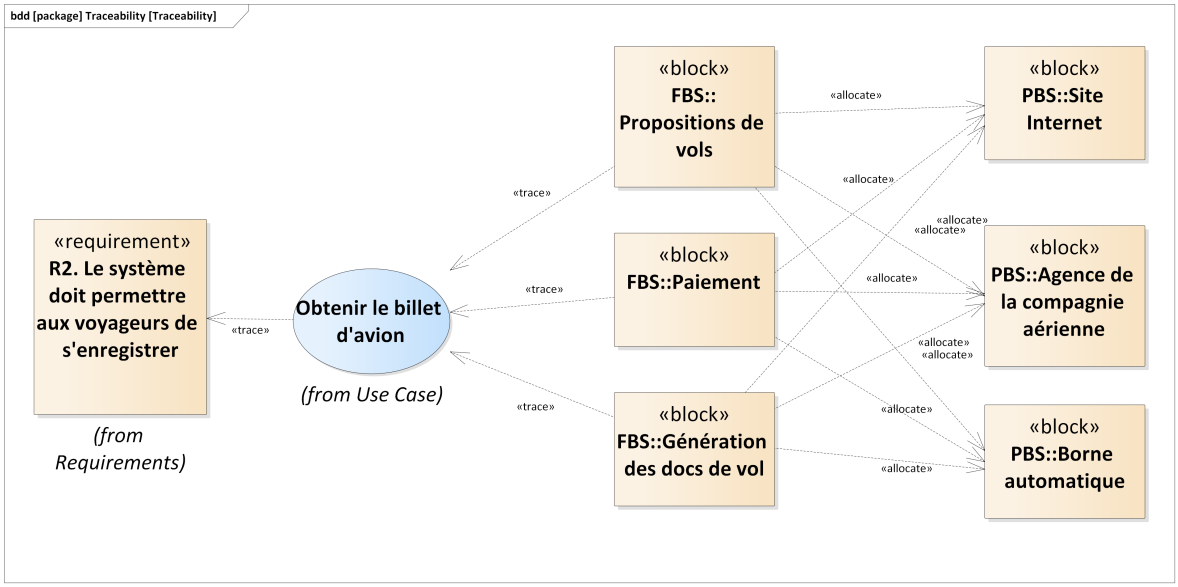


FIGURE 1.17 – Modèle de traçabilité pour l'exigence liée à l'achat de billet

timent que cet élément favorise la satisfaction de l'expérience du voyageur étanchant sa faim et sa soif, et en proposant un espace d'attente. Cet ajout nécessite de mener une nouvelle itération de la méthode IS+WDA pour intégrer les nouveaux éléments dans les différents modèles.

Une fois les nouvelles informations récoltées (Étape 1 – Recueil des données), la hiérarchie d'abstraction doit être mise à jour en modélisant les nouveaux éléments (Étape 2.2. – Analyse du domaine).

Le service de restaurant constitue un nouveau service dans le domaine de travail, il constitue donc une nouvelle fonction généralisée « Se restaurer ». Les parties prenantes ont exprimé le fait que ce nouveau service améliore la satisfaction de l'expérience de l'usager, il n'est pas soumis à des règles de sécurité particulière, et n'impacte pas les critères de vols ni le transfert des biens. En ce sens, la fonction généralisée « Se restaurer » est liée à la fonction abstraite « Satisfaire l'expérience de l'usager ». Le service de restaurant ne modifie pas la finalité du système, le niveau d'abstraction « Objectif Fonctionnel » n'est alors pas modifié.

Concernant les niveaux inférieurs, de nouvelles fonctions physiques et de nouvelles formes physiques doivent être modélisées. Ainsi, la fonction physique « Restauration » est ajoutée et liée à la fonction généralisée. Le recueil d'information montre que deux structures proposent le service de restauration, évidemment les restaurants, mais aussi les cafés et les distributeurs. Ces éléments instaurent la création d'autant de formes physiques.

L'extrait de la mise à jour de la hiérarchie d'abstraction intégrant le service de restauration est présenté ci-dessous (Figure 1.18).

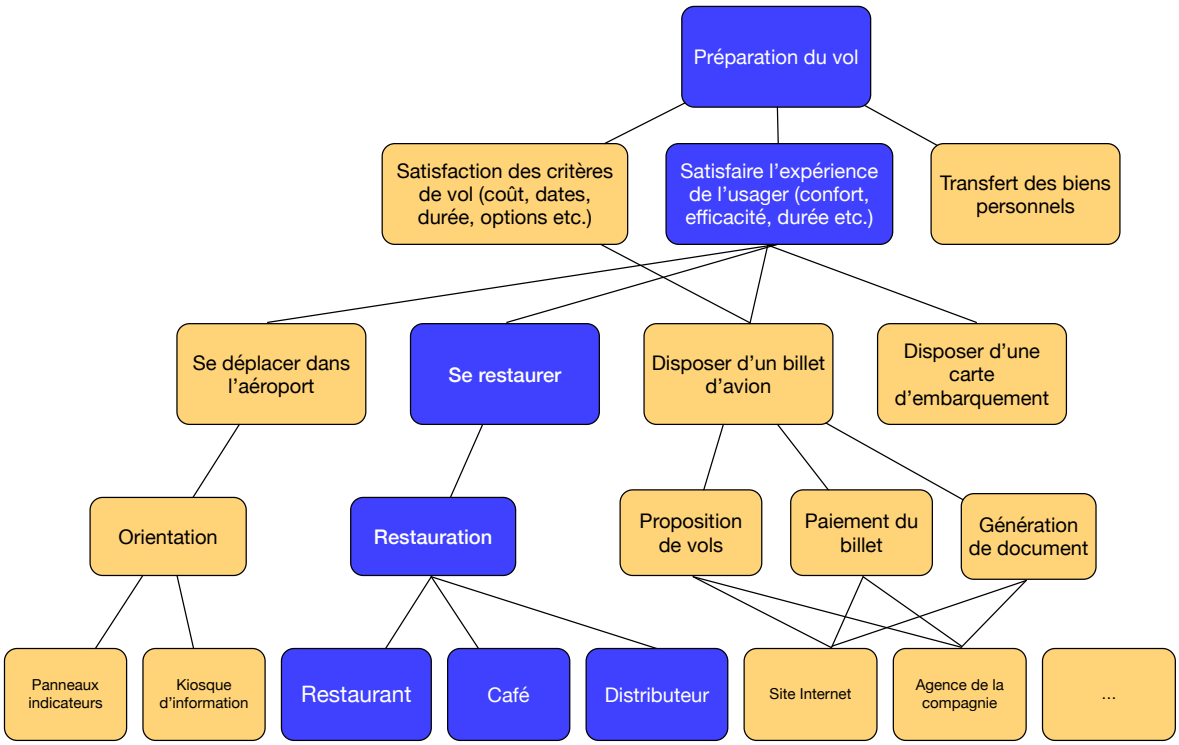


FIGURE 1.18 – Mise à jour de la hiérarchie d'abstraction

La méthode IS+WDA doit ensuite être déroulée pour garantir la modification des éléments pour les couches opérationnelles, logiques et physiques. Il s'agit donc d'identifier les nouveaux acteurs et situations de vie, les nouvelles exigences, les nouveaux cas d'utilisation et scénarios opérationnels. Les architectures fonctionnelles et physiques doivent également considérer les modifications.

Les itérations suivantes détaillent le modèle du système, notamment en poursuivant la décomposition de l'architecture logique et physique, et modélisant leurs structures internes, les aspects dynamiques et les échanges d'information.

Cet exemple illustre le fait que l'analyse du domaine est intéressante pour évaluer l'ajout, le retrait ou la modification d'un élément du l'ensemble du système (Chapitre 1.3 – *Itérations suivantes de la boucle d'ingénierie*).

1.4 Synthèse

Le cas d'étude NECTAR a montré que la méthode IS+WDA est applicable pour les premières étapes de la conception d'un système. Elle a permis, à partir des processus d'ingénierie, de l'analyse du domaine et d'une analyse de la tâche de modéliser les couches du modèle global du système. Les exigences, les cas d'utilisation et des scénarios opérationnels pour la couche opérationnelle, les

structures de décomposition des architectures fonctionnelles et physiques pour les couches logiques et physiques.

La méthode a été déployée en impliquant directement des utilisateurs finaux, dans une démarche de conception centrée utilisateur, comme recommandée par la démarche HSI. Ils sont intervenus pour décrire le contexte général d'utilisation et pour valider les modèles produits.

En ce qui concerne plus précisément l'analyse du domaine, elle a été utile pour formaliser les objectifs du système, les critères leurs obtentions (notamment les facteurs humains), les services et les dispositifs physique à fournir aux utilisateurs. Ces éléments ont été identifiés indépendamment d'une situation de vie particulière du système.

Le parcours des branches de la hiérarchie d'abstraction a permis de générer des scénarios opérationnels potentiels. Il a été montré que la hiérarchie d'abstraction était complémentaire de l'analyse de la tâche et de la méthode des *personas*.

Dans la vision MBSE, la hiérarchie d'abstraction a été modélisée en SysML et intégrée dans le modèle du système. De ce fait, les matrices d'allocation et le modèle de traçabilité ont permis de vérifier la complétude des modèles en comparant la couverture des éléments de la hiérarchie d'abstraction par les éléments de chaque couche du modèle.

Enfin, la méthode IS+WDA a montré sa souplesse pour intégrer dans le modèle de nouveaux services comme ceux de la restauration. En conditionnant l'ajout d'un élément à la possibilité de le lier aux niveaux d'abstraction contigus, la hiérarchie d'abstraction améliore la justification et la cohérence des éléments du système.

L'analyse du domaine est toutefois limitée pour identifier les acteurs du système, pour spécifier les exigences et pour formaliser les échanges d'information au sein du système. Ce travail est à accomplir et à affiner par les ingénieurs systèmes dans les itérations suivantes de la boucle d'ingénierie.

Le prochain chapitre se concentre sur la déploiement de la méthode sur un système, non pas intentionnel, mais majoritairement composé de contraintes causales.

Chapitre 2

Étude de cas DURESS II

Ce chapitre présente le déploiement de la méthode IS+WDA sur le cas d'étude DURESS. Ce système de contrôle d'une centrale hydraulique diffère de NECTAR par le fait que ses contraintes du domaine de travail sont de nature causale.

2.1 Description du système DURESS II

Le système DUal REservoir System Simulation (DURESS II) est système de contrôle d'une centrale thermohydraulique. Il permet de contrôler un flux d'alimentation d'eau pour le remplissage de deux réservoirs. L'objectif du système est de maintenir le niveau d'eau des réservoirs à une température prescrite comprise entre 20°C et 40°C. Pour satisfaire ces objectifs, les opérateurs contrôlent un ensemble de huit valves (VA, VA1, VA2, VO1, VB, VB1, VB2 et VO2), deux pompes (PA, PB), et deux chaudières (HTR1, HTR2). La Figure 2.1 représente une vue schématique de la centrale.

Le système DURESS II constitue le cas de référence pour le livre fondateur du CWA de Vicente publié en 1999 [113] où il y expose les cinq phases de la méthode CWA. Ce cas d'étude représente le cas d'école pour le CWA sur lequel plusieurs travaux ont été menés pour étendre et évaluer la méthode [40, 70, 23]

2.2 Application de la démarche pour DURESS II

Nous avons vu que l'analyse du domaine est une méthode pertinente pour l'ingénierie système. Cette section présente le déploiement de la méthode IS+WDA dont les résultats sont modélisés au travers de la méthode MBSE générique utilisée pour NECTAR (Figure 1.1). Le modèle global est constitué des couches opérationnelles, logiques et physiques. Les matrices d'allocation formalisent les liens de responsabilités dans les réalisations des éléments du modèle. Enfin, les modèles de traçabilité décrivent les liens entre les éléments du modèle global. Le formalisme utilisé est le SysML.

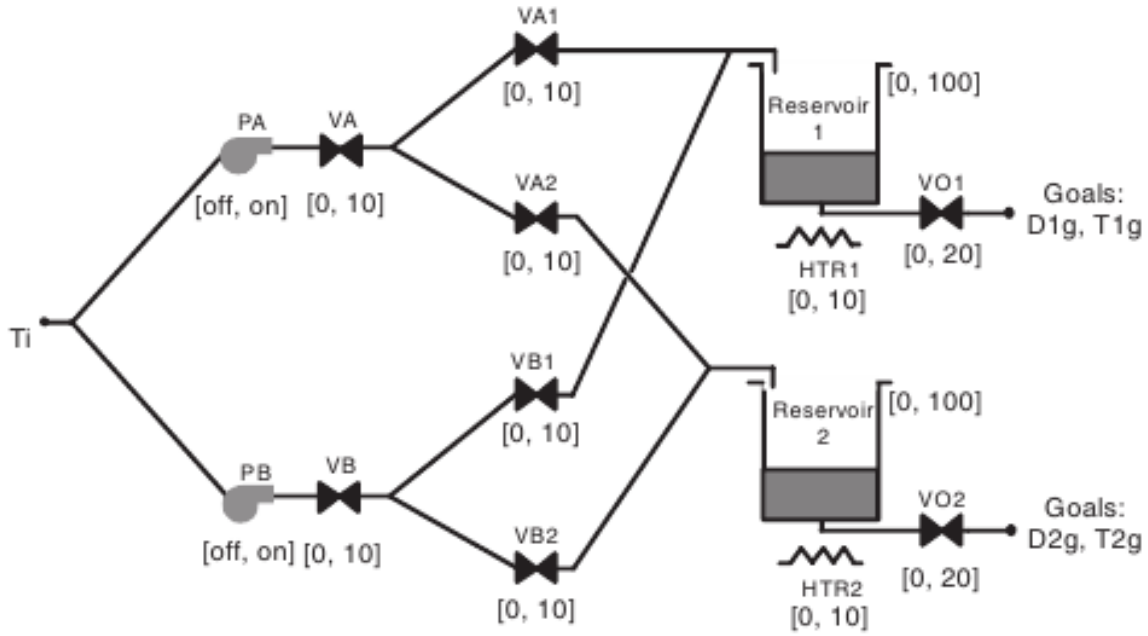


FIGURE 2.1 – Représentation schématique du système DURESS II [113]

De la même manière que pour NECTAR, le but de cette étude est de montrer l'apport de la méthode IS+WDA pour la conception de système. Les activités très spécifiques de l'ingénierie système ne seront pas traitées.

Le système DURESS tel que présenté a la particularité d'être constitué de contraintes causales (Chapitre 3.2.1 – *Contraintes intentionnelles-causales*). Il est régi par les relations physiques qui décrivent le comportement des volumes d'eau et de leur température. Les aspects liés aux motivations ou aux règlementations ne sont pas traités dans l'analyse du domaine du système. La seconde particularité est que ce système a été développé à la fin des années 1990, il n'y a aucun accès à des utilisateurs. Le recueil et l'analyse des informations s'orientent vers l'exploitation des travaux de recherche.

Étape 1 – Recueil des données

Les données n'ont pas été recueillies directement auprès d'utilisateurs ; elles sont extraites des différentes études réalisées sur ce système. Le livre de Vicente [113] fournit de nombreuses données sur le système, particulièrement au sujet des cinq phases de la méthode CWA. Le manuel du système [82] présente le fonctionnement opérationnel du système et l'utilisation des dispositifs physiques de la centrale. Les travaux [40, 59] détaille des scénarios d'utilisation en présentant des analyses de tâches par exemple (Figure 2.2).

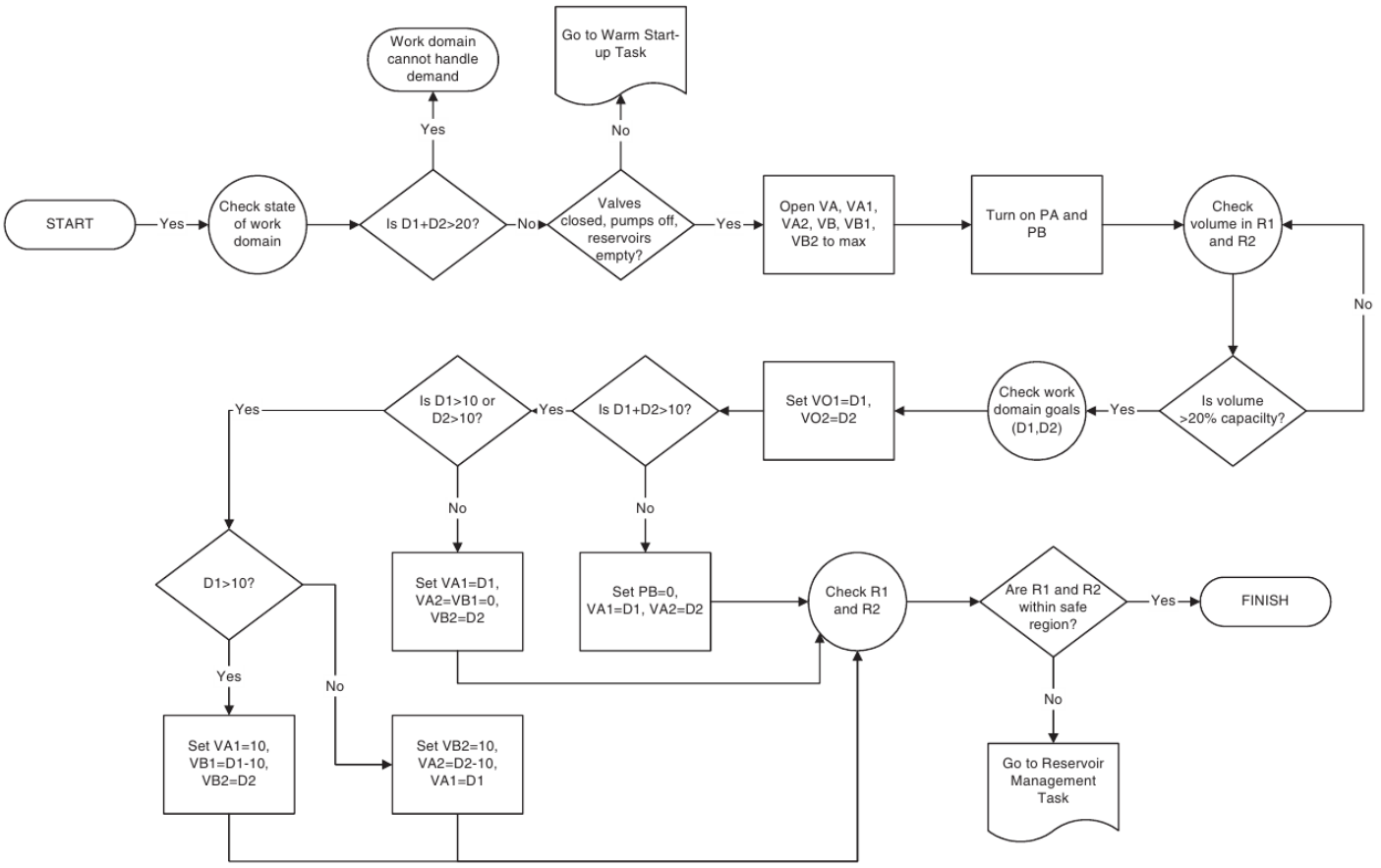


FIGURE 2.2 – Exemple d'analyse de la tâche [40]

Étape 2.1. – Acteurs et situation de vie

Les travaux sur le système DURESS II n'exposent qu'un acteur générique, l'acteur « Opérateur ». Le système est de nature causale, seul les composants physiques apparaissent dans l'analyse du système, il n'y a donc pas d'acteurs secondaires exposés.

Les informations recueillies à l'étape précédente révèlent que le système rencontre quatre situations de vie :

- *Mise en route* : initialisation du système d'alimentation selon une configuration préalablement établie
- *Opération normale* : maintien du niveau de sûreté de fonctionnement et réalisation des exigences imposées à l'opérateur. Cette situation décrit le fonctionnement nominal du système et ne traite pas des anomalies potentielles
- *Extinction* : mise en arrêt du système
- *Gestion de situations dégradée* : gestion du système lorsqu'il dévie de son fonctionnement normal

Étape 2.2. – Analyse du domaine

L'analyse du domaine de DURESS II est modélisée par la hiérarchie d'abstraction suivante (2.3). Les éléments constitutifs de l'analyse du domaine sont présentés ci-dessous.

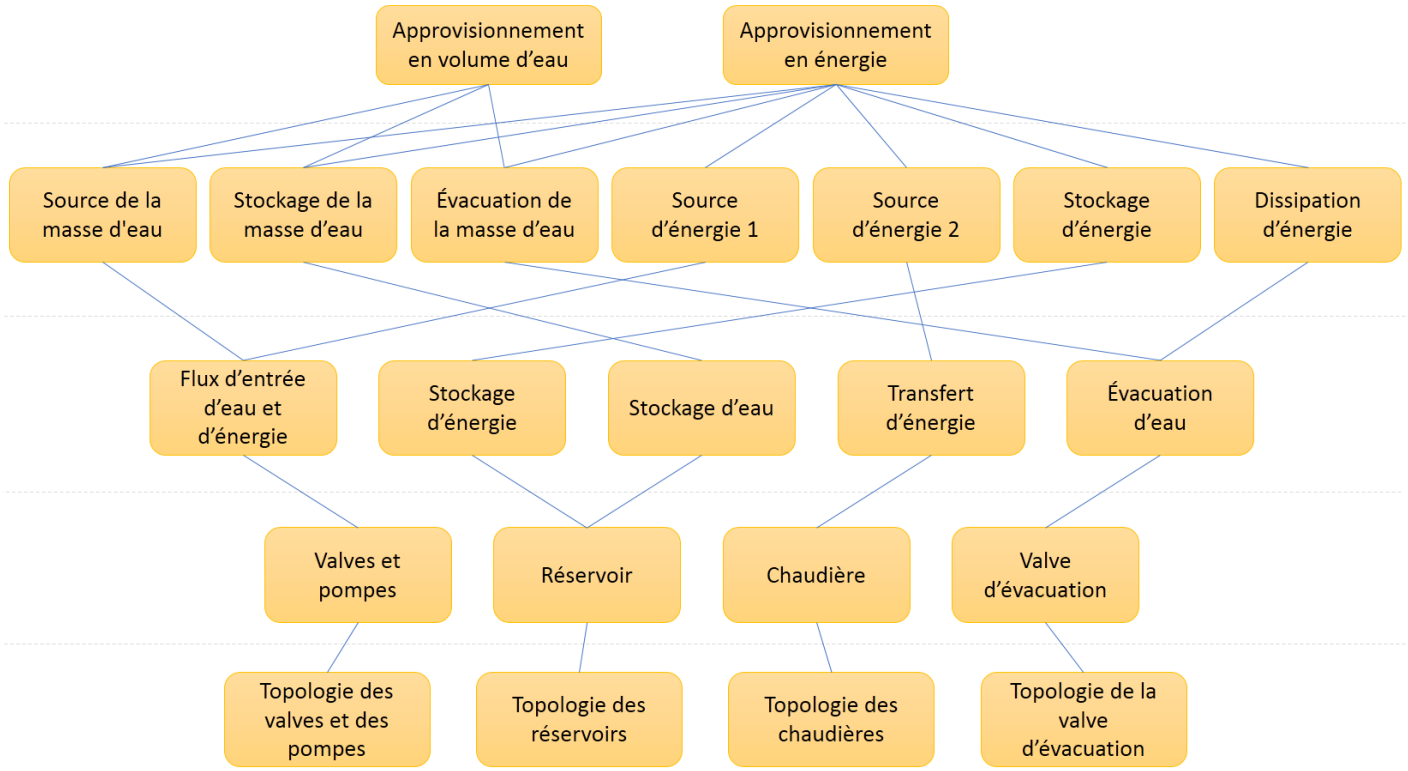


FIGURE 2.3 – Hiérarchie d'abstraction de DURESS II (traduit de [113])

Objectif Fonctionnel

Le niveau d'abstraction « Objectif Fonctionnel » identifie les objectifs primordiaux pour lesquels le système de travail est développé. L'analyse du domaine de travail de DURESS II identifie deux objectifs du système (Table 2.1).

Objectif Fonctionnel		
#	**Label**	**Commentaires**
OF1	Approvisionner en volume d'eau	Répondre à la demande du volume d'eau dans chacun des réservoirs
OF2	Approvisionner en énergie	Conserver l'eau de chaque réservoir à une température prescrite

TABLE 2.1 – Objectif fonctionnel du domaine de travail DURESS

Fonction Abstraite

Le niveau d'abstraction *Fonction Abstraite* explicite les moyens de mesure d'obtention des objectifs du système. Dans le cas du système DURESS II, l'obtention des objectifs est mesurée par les lois physiques qui régissent les relations entre les masses d'eau et les échanges d'énergie. Par exemple, la relation entre l'énergie, le volume d'eau et la température est exprimée par l'équation $E(t) = T(t)\,V(t)\,c_p\,\rho$ (E : énergie, T : température, V : volume d'eau, c_p : capacité thermique, ρ : densité de l'eau) [113].

Le domaine de travail compte sept fonctions abstraites. Le premier objectif fonctionnel « Approvisionnement en volume d'eau » est obtenu en régulant l'apport en eau (#FA1 –« Source de la masse d'eau »), son stockage (#FA2 – « Stockage de la masse d'eau ») et son évacuation (#FA3 – « Évacuation de masse d'eau »). Le second objectif fonctionnel « Approvisionnement en énergie » est obtenue grâce aux relations physiques existantes entre l'énergie apportée de deux sources (#FA4 – « Source d'énergie 1 » et #FA5 – « Source d'énergie 2 », son stockage (#FA6 – « Stockage d'énergie ») et sa dissipation (#FA7 – « Dissipation d'énergie »).

Fonction Abstraite		
#	**Label**	**Commentaires**
FA1	Source de la masse d'eau	Régulation de l'apport en eau.
FA2	Stockage de la masse d'eau	Régulation de l'eau stockée
FA3	Évacuation de masse d'eau	Évacuation de l'eau
FA4	Source d'énergie 1	Apport en énergie d'une 1ère source
FA5	Source d'énergie 2	Apport en énergie d'une 2nde source
FA6	Stockage d'énergie	Régulation de l'énergie
FA7	Dissipation d'énergie	-

TABLE 2.2 – Fonctions abstraites du domaine de travail DURESS

Fonction Généralisée

Le troisième niveau « Fonction Généralisée » expose les fonctions disponibles dans le domaine de travail. Pour DURESS II, cinq fonctions généralisées sont identifiées (Table 2.3). C'est en utilisant ces fonctions que les opérateurs régulent le volume d'eau et sa température des réservoirs.

Les fonctions généralisées du système DURESS gèrent l'alimentation en eau et en énergie du système (FG1), du stockage d'énergie (FG2) et d'eau (FG3). Le transfert d'énergie vers les réservoirs est géré par la fonction FG4 tandis que l'évacuation de l'eau des réservoirs est réalisée par la fonction FG5.

Fonction Abstraite		
#	**Label**	**Commentaires**
FG1	*Flux d'entrée d'eau et d'énergie*	Système de gestion du flux d'entrée d'eau et d'énergie
FG2	*Stockage d'énergie*	Système de stockage de chaleur
FG3	*Stockage d'eau*	Système de stockage d'eau
FG4	*Transfert d'énergie*	Système de transfert de chaleur
FG5	*Évacuation d'eau*	Système d'évacuation d'eau

TABLE 2.3 – Fonctions abstraites du domaine de travail DURESS II

Fonction Physique

Le quatrième niveau d'abstraction « Fonction Physique » décrit les processus fonctionnels résultants de l'utilisation des dispositifs physiques. Dans un système causal, ce niveau reflète les processus physiques, mécaniques, électriques présents dans le système. Pour DURESS II, il s'agit des processus physiques de transport, de chauffage et d'évacuation réalisés par les dispositifs physiques décrits au niveau *Forme Physique* (Table 2.4).

La hiérarchie d'abstraction de DURESS modélisée par Vicente exprime les fonctions physiques, non pas par le processus utilisé, mais par le composant physique qui en résulte. Naikar [75] explique ce constat par le fait que certains analystes préfèrent nommer les fonctions physiques par les composants qui les réalisent car leurs noms indiquent leur fonction. Pour cette raison, les fonctions physiques portent ici le nom de leur composant physique.

Fonction Physique		
#	**Label**	**Commentaires**
FP1	Valves et pompes	Distribution de l'eau
FP2	Réservoir	Stockage de l'eau
FP3	Chaudière	Régulation de la température de l'eau
FP4	Valve d'évacuation	Évacuation de l'eau en surplus

TABLE 2.4 – Fonctions physiques du domaine de travail DURESS II

Forme Physique

Le cinquième niveau d'abstraction « Forme Physique » détermine les objets physiques et les ressources utilisés pour réaliser les processus physiques définis au niveau précédent. Il s'agit pour DURESS II des dispositifs de pompes, de

valves, de réservoirs et de chaudière. Les formes physiques ne sont pas représentées dans la hiérarchie d'abstraction pour des raisons pratiques de mise en page car leur nombre est trop important.

Modélisation de la hiérarchie d'abstraction

Les méthodes MBSE promeuvent l'emploi systématique des modèles comme artéfacts de conception. La hiérarchie d'abstraction doit donc être intégrée en ce sens dans le modèle global du système dans le but d'être traçable, maintenue et partagée avec les autres parties prenantes [52, 86].

Le diagramme ci-dessous (Figure 2.4) illustre la modélisation de la hiérarchie d'abstraction dans le modèle global. Elle est modélisée au niveau de la couche opérationnelle par un diagramme de définition de blocs (*Block Definition Diagram* – BDD), chaque élément étant modélisé par un *Block* dont le stéréotype reflète le niveau d'abstraction auquel il se situe.

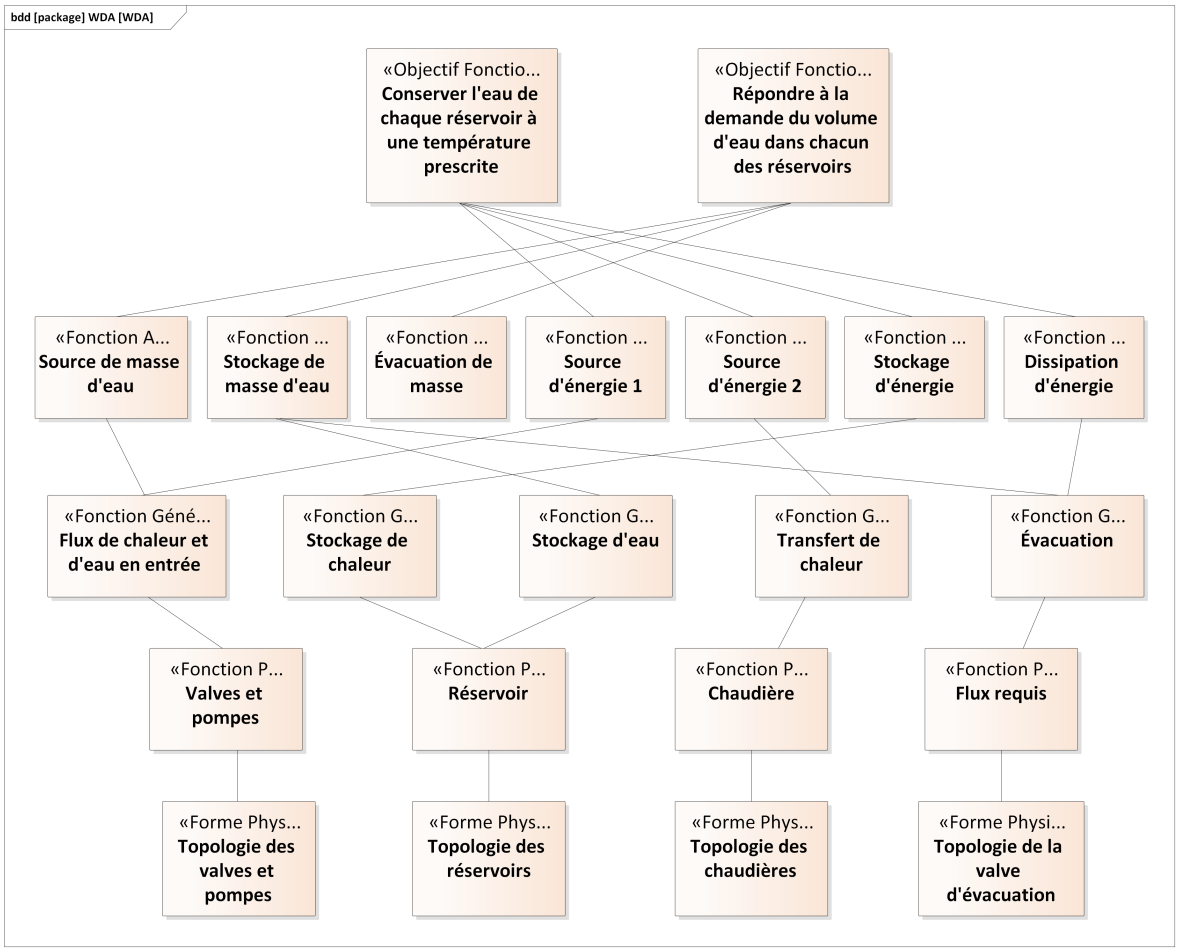


FIGURE 2.4 – Hiérarchie d'abstraction modélisée en SysML

Étape 3 – Analyse des exigences initiales

Une exigence sert à spécifier une capacité ou une contrainte qui doit être satisfaite par le système. La hiérarchie d'abstraction permet d'identifier les exigences fonctionnelles et non-fonctionnelles du système.

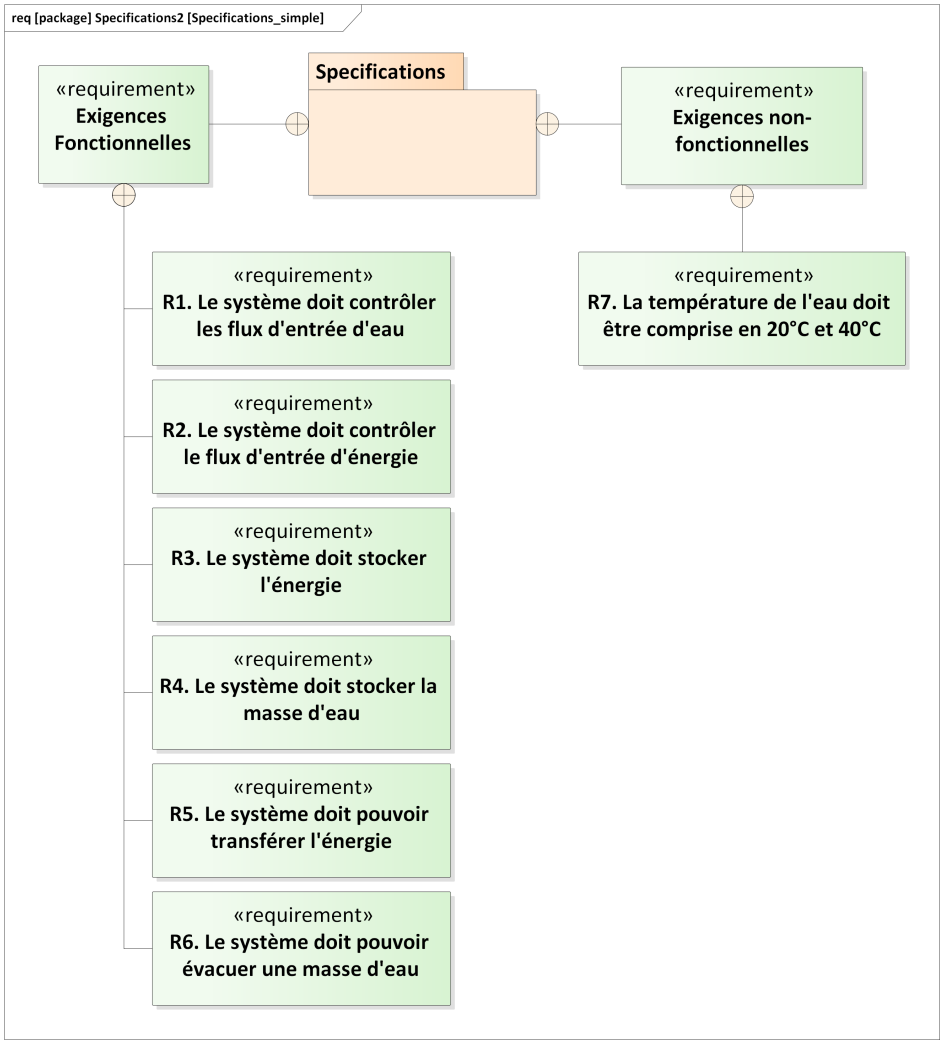


FIGURE 2.5 – Diagramme d'exigences du système DURESS II

Les fonctions abstraites sont utiles de deux manières pour l'analyse des exigences. Premièrement, elles doivent être spécifiées comme des exigences non-fonctionnelles de contrainte. Elles spécifient les critères physiques à respecter par le domaine de travail comme par exemple le respect des températures prescrites des réservoirs (20°C et 40°C).

Ensuite, les fonctions abstraites peuvent également être utilisées pour la modélisation des diagrammes paramétriques (Chapitre 1.4 – *Formalisme SysML*). Les diagrammes paramétriques modélisent les équations qui régissent le comportement du système. Ils sont utilisés comme interface entre le modèle global

du système et des outils de simulation tel que Matlab/Simulink. Ainsi, il est possible de procéder à des simulations réalistes et mesurables du système. Ils permettent par exemple d'évaluer différentes alternatives de conception pour faciliter le choix de la solution la plus adaptée face aux différentes problématiques. La modélisation des diagrammes paramétriques est possible grâce aux équations physiques exposées dans l'étude de cas de Vicente [113], mais il ne sera pas présenté dans notre étude de cas.

En théorie, la spécification des exigences ne traite généralement pas des décisions d'architecture et de solutions techniques. En effet, à cette étape, le choix de la solution technique est rarement établi. Pour un même besoin, les concepteurs évaluent plusieurs alternatives selon les critères imposés par les parties prenantes. Par exemple pour le système DURESS II, il est nécessaire de faire chauffer l'eau. Cette exigence peut être réalisée par un chauffage électrique, solaire ou d'autres manières. La résolution des solutions techniques est dévolue aux couches plus basses du modèle.

Cas d'utilisation

Les cas d'utilisation [58] décrivent les exigences comportementales entre un système et un acteur externe (humain ou non). Ils sont modélisés en SysML par les diagrammes de cas d'utilisation. L'identification des services rendus par le système intervient précocement dans le cycle de conception d'un système. Le modèle suivant 2.6 définit le diagramme de cas d'utilisation pour le système. Les fonctions de service sont modélisées par des cas d'utilisation en orange, les fonctions techniques en bleu.

Dans le cas de DURESS II, l'analyse du domaine identifie cinq fonctions généralisées. En se contraignant à utiliser ces cinq fonctions généralisées, les agents du système sont en mesure de répondre aux objectifs du système. Les cas d'utilisation identifiés depuis la hiérarchie d'abstraction représentent alors des fonctions de service qui doivent être obligatoirement utilisées dans le système. Les éléments du niveau d'abstraction « Fonction Physique » constituent des fonctions techniques liées aux fonctions de service par des relations d'inclusion (« *include* »), c'est-à-dire les cas d'utilisation qui doivent être réaliser par d'autres cas d'utilisation.

La modélisation des acteurs ne peut pas s'effectuer sur la base de l'analyse du domaine de travail ; il faut alors se référer aux méthodes habituelles d'identification (observation *in situ*, étude documentaire, entrevues etc.) ou à la quatrième phase *Social Organization and Cooperation Analysis* (SOCA) du CWA. La documentation actuelle sur DURESS II ne permet pas de modéliser des acteurs autres qu'un acteur principal générique *Opérateur*.

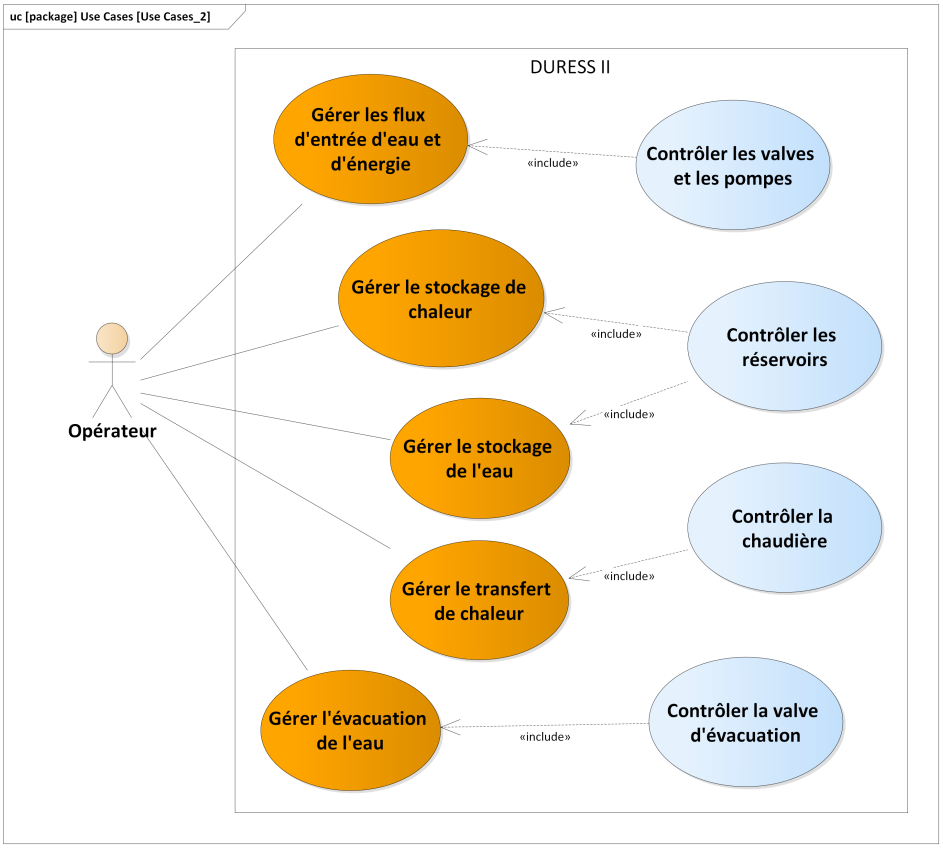


FIGURE 2.6 – Diagramme de cas d'utilisation pour le système DURESS II

Scénarios opérationnels

Les scénarios opérationnels modélisent les interactions entre les composants du système avec son environnement et ses utilisateurs dans un contexte dynamique.

L'étape 2.1 – « Acteurs et situations de vie » a permis d'identifier quatre situations de vie : (1) mise en route du système, (2) opération usuelle, (3) extinction du système et (4) gestion de situations dégradées. Le modèle HTA suivant (Figure 2.7) décrit l'ordonnancement des tâches à réaliser dans le système selon la situation rencontrée.

La situation de vie *opération usuelle* concerne notamment le remplissage des réservoirs d'eau. Trois stratégies de remplissage ont été décrits [40]. Elles représentent finalement autant de scénarios opérationnels à modéliser dans le modèle global du système.

Le mode « simple » (Figure 2.8a) utilise une seule pompe et les valves associées pour le remplissage des deux réservoirs. Le mode « découplé » (Figure 2.8b) utilise les deux pompes et les valves associées pour remplir les deux réservoirs. En mode « complet » (Figure 2.8c), les deux pompes et l'ensemble des valves sont

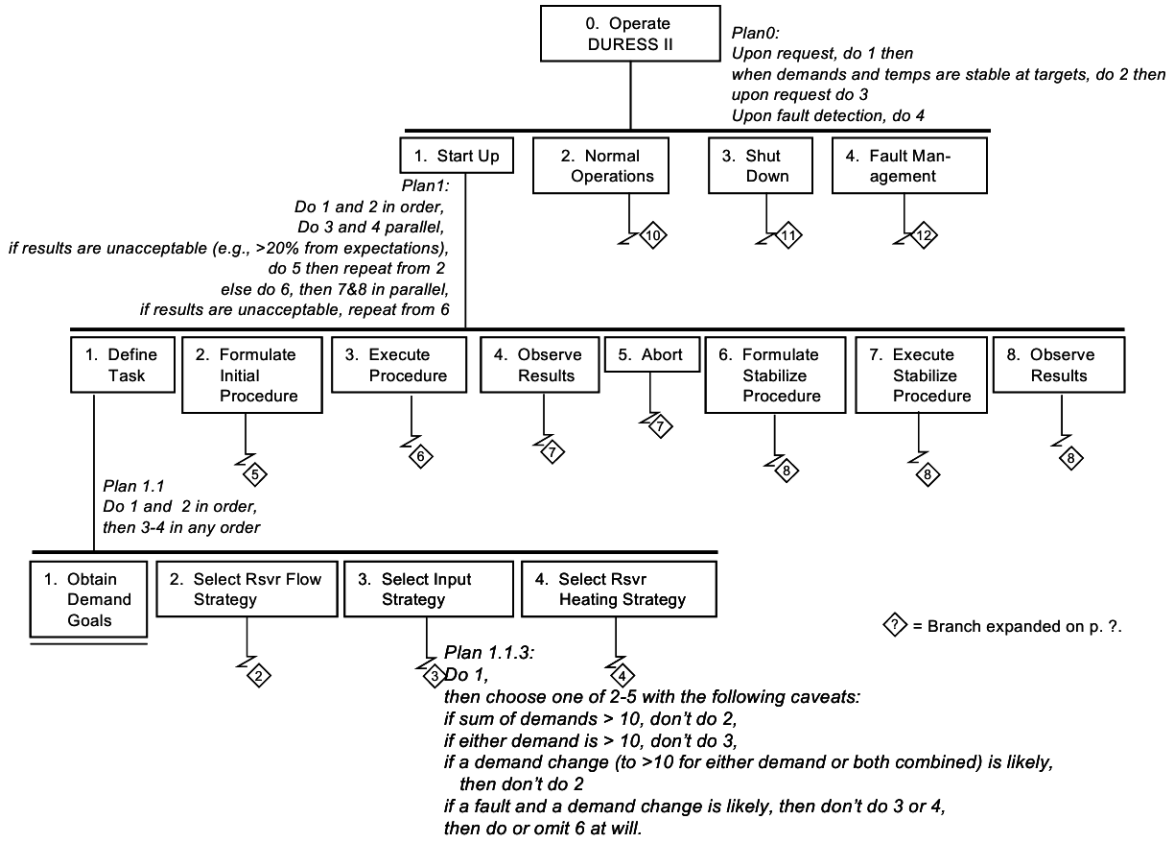


FIGURE 2.7 – Modèle HTA de DURESS II [40]

utilisées pour le remplissage des deux réservoirs. Les modes de remplissage diffèrent par le débit d'eau fourni pour le remplissage des réservoirs. L'agent responsable choisira la méthode adaptée face à la demande du volume d'eau requis par la situation courante.

La colonne *Description* de la figure 2.8 montre l'utilisation de la hiérarchie d'abstraction pour décrire ces stratégies [40]. Par exemple pour la première stratégie « simple », seul la pompe PA et les valves VA, VA1 et VA2 sont utilisées pour satisfaire les demandes en eau des deux réservoirs (Min1 et Min2). Le même raisonnement est appliqué pour les deux autres scénarios de remplissage. Cela montre l'utilité de la hiérarchie d'abstraction pour décrire l'ensemble des alternatives disponibles aux opérateurs pour réaliser leur activité.

Étape 4 – Spécification des exigences

Comme expliqué lors de la présentation de la méthode (Chapitre 1.3 – *Proposition de la méthode IS+WDA*), l'analyse du domaine n'apporte pas une grande aide pour la spécification des exigences. L'identification des exigences des parties prenantes conceptrices et la traduction exigences initiales sont sous la responsabilité des ingénieurs système. Cette étape est néanmoins cruciale pour la conception d'un système.

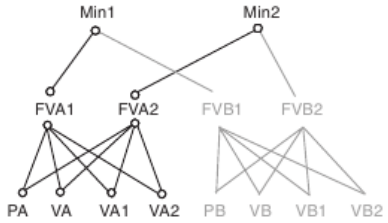
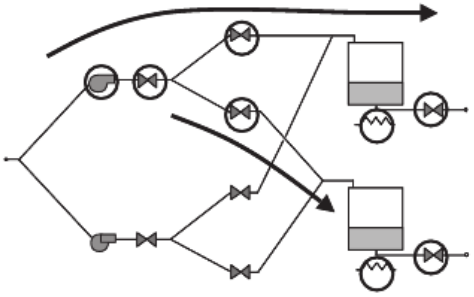
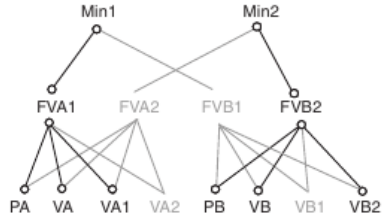
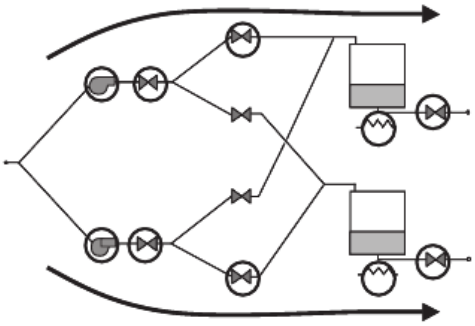
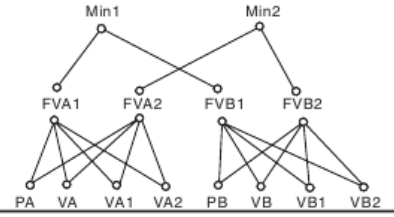
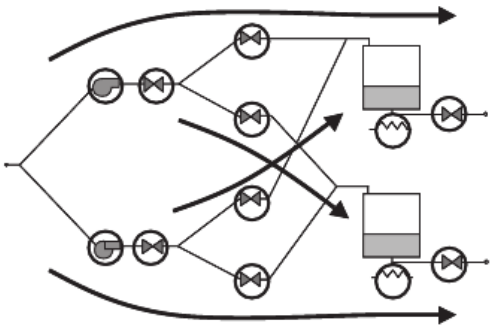
Feedwater Configuration Strategy	Description	Example
a) Single	One pump and its connected input valves are used to feed both reservoirs. Feasible when D1g+D2g≤10 	
b) Decoupled	Each pump and its connected input valves are used to feed different reservoirs. Feasible when D1g and D2g≤10 Necessary when D1g+D2g>10 	
c) Full	Both pumps and their connected valves are used to feed the reservoirs. At least one pump feeds both reservoirs. Feasible when D1g+D2g≤20 Necessary when D1g or D2g>10 	

FIGURE 2.8 – Stratégies de remplissage des réservoirs [40]

Étape 5 – Validation des exigences

L'étape de validation des exigences fait intervenir les matrices d'allocation pour garantir la complétude des éléments de la couche opérationnelle du modèle global. La matrice suivante (Figure 2.9) montre par exemple l'adéquation entre les éléments de la hiérarchie d'abstraction et du modèle des exigences du système.

La matrice d'allocation montre ici que l'ensemble des exigences identifiées depuis la hiérarchie d'abstraction ne sont pas toutes positionnées au niveau des

fonctions généralisées. En effet, l'exigence liée à la température prescrite des réservoirs se situe au niveau des objectifs fonctionnels. Cela montre que la traduction des contraintes de la hiérarchie d'abstraction en exigences n'est pas systématique et nécessite un arbitrage des parties prenantes conceptrices.

	R1. Contrôler les flux d'entrée d'eau	R2. Contrôler le flux d'entrée d'énergie	R3. Stockage d'énergie	R4. Stockage de la masse d'eau	R5. Transfert d'énergie	R6. Evacuation d'eau	R7. Température entre 20°C et 40°C
WDA::Flux de chaleur et d'eau en entrée	x	x					
WDA::Stockage de la chaleur			x				
WDA::Stockage d'eau				x			
WDA::Transfert de chaleur					x		
WDA::Evacuation						x	
WDA::Conserver l'eau à la T°C prescrite							x

FIGURE 2.9 – Matrice d'allocation des exigences

Étape 6 – Conception Logique

La couche logique de la méthode MBSE spécifie et décompose les fonctions du système, les regroupe en composant métier, définit les interfaces et les flux d'informations entre eux. La couche logique construit l'architecture fonctionnelle du système. Elle s'appuie sur la spécification des exigences, des cas d'utilisation et des scénarios opérationnels pour en extraire les fonctions nécessaires.

L'architecture fonctionnelle issue de la hiérarchie d'abstraction est modélisée à un haut niveau d'abstraction (Figure 2.10). Il revient aux concepteurs du système de poursuivre la conception de l'architecture fonctionnelle.

L'analyse du domaine identifie les cinq sous-systèmes du domaine de travail à un haut niveau d'abstraction. Ils sont positionnés au niveau *fonctions généralisées* de la hiérarchie d'abstraction. Les cinq sous-systèmes identifiés sont :

- Sous-système gérant le flux d'alimentation en entrée de l'eau et de l'énergie
- Sous-système de stockage thermique
- Sous-système de stockage d'eau
- Sous-système de transfert thermique
- Sous-système d'évacuation

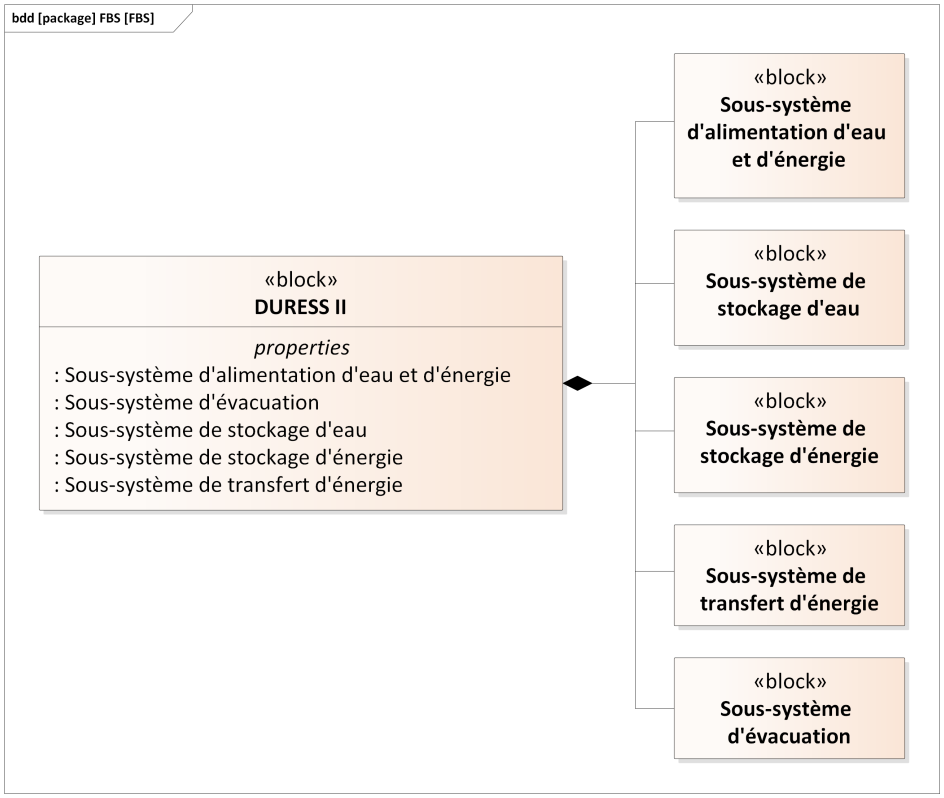


FIGURE 2.10 – Le FBS du système DURESS II

Étape 7 – Vérification de l'architecture fonctionnelle

La matrice d'allocation suivante (Figure 2.11) montre que les fonctions généralisées de la hiérarchie d'abstraction et les sous-systèmes de l'architecture fonctionnelle sont complets.

	FBS::Alimentation d'eau et d'énergie	FBS::Stockage d'eau	FBS::Stockage d'énergie	FBS::Transfert d'énergie	FBS::Evacuation
WDA::Flux de chaleur et d'eau en entrée	x				
WDA::Stockage de la chaleur			x		
WDA::Stockage d'eau		x			
WDA::Transfert de chaleur				x	
WDA::Evacuation					x

FIGURE 2.11 – Matrice d'allocation du FBS et de la hiérarchie d'abstraction

Étape 8 - Conception physique

La couche physique identifie les composants physiques du système et ses relations dans une perspective de mise en œuvre technique. Elle définit ainsi l'architecture physique du système. Les fonctions du système identifiées dans les couches plus hautes sont allouées aux dispositifs physiques du système. La couche physique modélise également les échanges d'information. La figure suivante (Figure 2.12) présente la structure de décomposition physique (PBS) du système. Cette vue décrit les éléments physiques présents dans le système : pompes, valves, résistances thermiques et réservoirs.

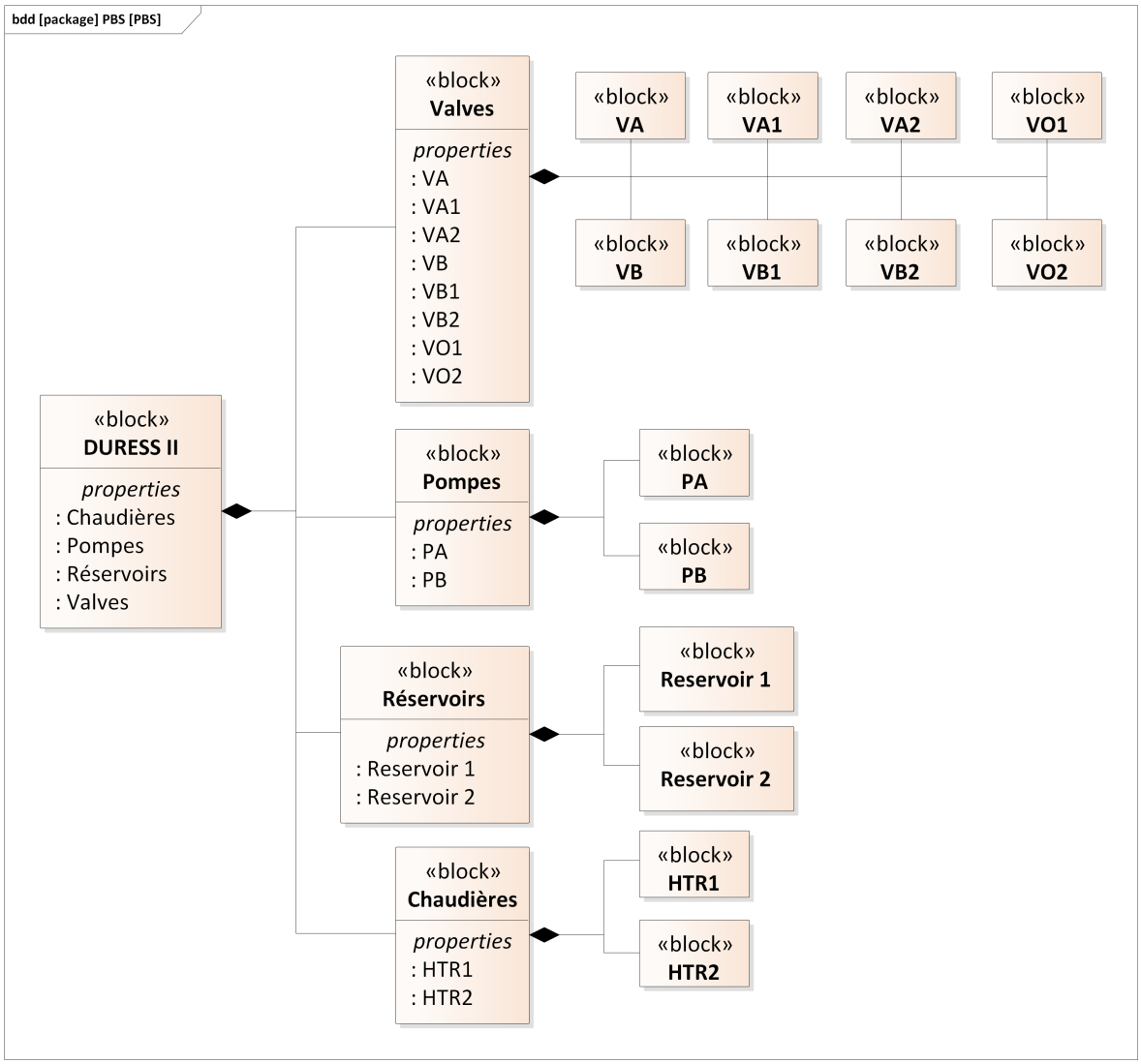


FIGURE 2.12 – Le PBS de DURESS II

Bien qu'absents pour des raisons pratiques de présentation, les composants physiques sont positionnés au niveau forme physique de la hiérarchie d'abstraction. Les éléments identifiés sont :

– Les deux pompes PA et PB

– Les huit valves VA, VA1, VA2, VB, VB1 et VB2 ainsi que les deux valves d'évacuation VO1 et VO2
– Les deux résistances HTR1 et HTR2
– Les deux réservoirs R1 et R2

Les éléments physiques issus de l'analyse du domaine sont décrits à un très haut niveau d'abstraction. Elle reste peu explicite sur la structure interne et les connexions des composants physiques. Elle demeure également peu informative pour l'allocation des composants fonctionnels avec ceux de la couche physique. Cet aspect est cohérent avec la nature même de l'analyse du domaine de travail qui identifie les contraintes à un haut niveau d'abstraction dans les phases de conception. Il revient aux concepteurs du système d'affiner la modélisation de la couche physique en décomposant davantage les éléments physiques présents.

La matrice suivante (Figure 2.13) montre l'allocation des sous-systèmes modélisés par le FBS aux composants du PBS.

	FBS::Alimentation d'eau et d'énergie	FBS::Stockage d'eau	FBS::Stockage d'énergie	FBS::Transfert d'énergie	FBS::Evacuation
PBS::VA	x				
PBS::VA1	x				
PBS::VA2	x				
PBS::VB	x				
PBS::VB1	x				
PBS::VB2	x				
PBS::VO1					x
PBS::VO2					x
PBS::PA	x				
PBS::PB	x				
PBS::Réservoir 1		x	x		
PBS::Réservoir 2		x	x		
PBS::HTR1				x	
PBS::HTR2				x	

FIGURE 2.13 – Matrice d'allocation des éléments FBS–PBS

Étape 9 – Vérification de l'architecture physique

Le modèle de traçabilité pour l'alimentation en eau et en énergie du système est présenté ci-dessous (Figure 2.14).

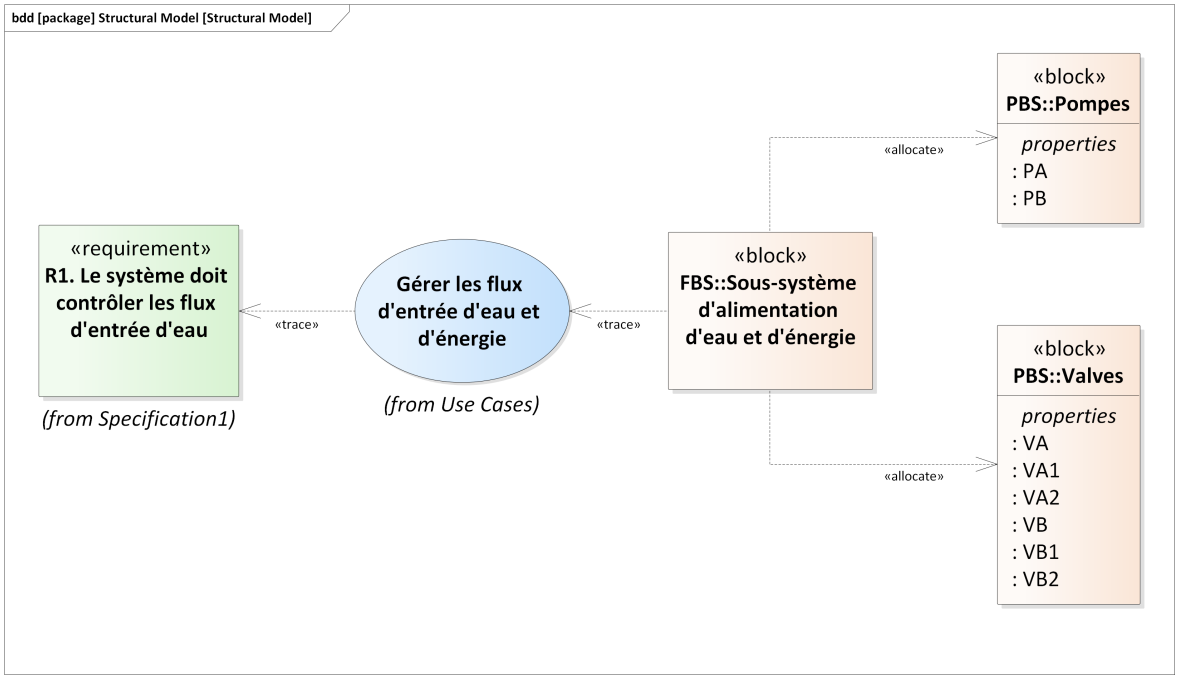


FIGURE 2.14 – Modèle de traçabilité pour l'alimentation du système

Ce modèle représente l'architecture globale du système à travers ses couches opérationnelles, logiques et physiques.

2.3 Itérations suivantes

L'analyse du domaine définit DURESS II comme un système causal. Tous les aspects liés par exemple à la sécurité du fonctionnement du système pourrait être mise en œuvre. Il n'est pas possible de traiter de ces aspects dans notre cas d'étude car les informations relatives à cette problématique sont indisponibles, tout comme des utilisateurs potentiels.

2.4 Synthèse

Le cas d'étude du système DURESS II a montré que la méthode IS+WDA est également applicable pour les systèmes causaux et dont les éléments de conception sont datés et limités. De ce fait, il n'a pas été possible de mener une démarche de conception centrée utilisateur à cause de l'absence d'utilisateurs.

De la même manière que le système NECTAR, elle a permis de définir les exigences, les cas d'utilisation, de faire émerger des scénarios opérationnels, et de construire une première architecture fonctionnelle et physique du système.

Ce cas d'étude illustre bien l'émergence de scénarios par la lecture descendante de la hiérarchie d'abstraction. En effet, le remplissage des réservoirs est

possible par trois stratégies différentes, matérialisé par les relations moyens-fins liant les services d'alimentation en eau aux différentes valves et pompes.

La hiérarchie d'abstraction a également pu être modélisée en SysML dans la couche opérationnelle du modèle du système. Les matrices d'allocation et le modèle de traçabilité permettant de garantir la complétude et la cohérence des modèles face à la hiérarchie d'abstraction.

Face au déficit d'informations, il est difficile de poursuivre les itérations de la méthode pour la conception du système. L'intégration de contraintes intentionnelles, liées par exemple à la sécurité, est dans ce cas difficile bien que nécessaire.

Cinquième partie

Conclusion et perspectives

Chapitre 1

Résumé des contributions

Le document se compose de quatre parties qui décrivent respectivement l'état de l'art, l'expérimentation, la proposition de la méthode IS+WDA et enfin les deux cas d'étude.

1.0.1 Partie 1 – État de l'art

L'état de l'art est composé de trois thèmes qui ont défini la problématique de travail.

Tout d'abord, le cadre général structurant les activités de l'ingénierie système a été présenté. Les normes définissent les processus à mener durant le cycle de vie d'un système, leurs réalisations étant déléguées aux méthodes. Les éléments du système sont représentés par des formalismes. Ainsi, l'ingénierie système dispose de moyens formalisés et outillés pour définir, concevoir et produire des systèmes complexes. Dans ce document, la norme ISO 15288, la méthode MBSE et le formalisme SysML ont été détaillés.

Malgré ces qualités, l'ingénierie système se confronte à des limitations pour intégrer la composante humaine dans ses processus, ses méthodes et ses formalismes. Des difficultés à collaborer se manifestent entre les ingénieurs systèmes et les praticiens des facteurs humains.

Face à ce constat, l'approche HSI a été proposée. Elle se concentre sur l'étude des domaines dans lesquels s'expriment la composante humaine au sein d'un système (facteurs humains, sûreté, santé, environnement etc.). L'objectif du HSI est de concevoir des systèmes qui garantissent la compatibilité entre les demandes opérationnelles et les caractéristiques humaines, qui garantissent la tolérance et la récupération des erreurs humaines malgré tout inévitables, et qui assurent une coopération optimale entre le système et l'opérateur. Avec ces qualités, le système atteint les niveaux de performance et de sureté optimaux.

Le HSI dispose de modèles et de méthodes qui s'articulent principalement autour de la conception centrée utilisateur et de l'ingénierie cognitive. La conception centrée utilisateur permet de décrire le contexte opérationnel du système, mais elle se concentre essentiellement sur l'implication des utilisateurs finaux dans les choix de conception et d'évaluation du système. L'ingénierie cognitive dispose des méthodes d'analyse de l'activité pour identifier les actions ou les processus cognitifs mis en œuvre par les opérateurs pour atteindre les buts du système. Trois approches de méthodes d'analyse de l'activité existent. Les approches normatives et descriptives se concentrent sur l'analyse de la tâche qui identifie et décompose les actions dans une situation donnée. L'approche formative se distingue par sa capacité à décrire, non pas les tâches, mais les contraintes qui délimitent l'espace des actions possibles des opérateurs. Cette dernière comble les lacunes des analyses de la tâche qui sont dépendantes du nombre et de la qualité des observations des situations. L'approche normative a donc été identifiée comme méthode pertinente pour améliorer la prise en considération des aspects humains dans un système.

L'approche formative dispose du cadre conceptuel CWA pour mener ses analyses. Il est constitué de cinq phases qui analysent l'ensemble des dimensions qui constituent l'activité humaine dans un système. L'analyse du domaine est la principale et la plus utilisée des phases du CWA. Elle analyse les contraintes intentionnelles, fonctionnelles et physiques qui établissent l'objet de l'action des opérateurs, indépendamment des situations.

L'analyse du domaine fait émerger des informations qui peuvent nourrir les modèles d'ingénierie système et du HSI, ce qui sera confirmé par les expérimentations. Elle s'intègre également dans une démarche de conception centrée utilisateur et dans un cycle de vie itératif.

Les caractéristiques de l'analyse du domaine sont prometteuses pour la problématique identifiée dans la thèse. En ce sens, il a été décidé de poursuivre l'étude de la convergence entre l'ingénierie système et l'analyse du domaine pour soutenir l'approche HSI.

1.0.2 Partie 2 – Expérimentation

Il a été décidé de mener une expérimentation sur l'utilisation de l'analyse du domaine dans le cadre de la conception d'un système. L'objectif de cette expérimentation était de confirmer ou non l'intérêt de l'analyse du domaine pour la modélisation de système, directement auprès d'ingénieurs système. Dix participants, répartis en deux groupes équivalents, ont été sollicités pour modéliser un système en utilisant soit l'analyse du domaine, soit une analyse de la tâche. Ils ont ensuite été interrogés afin de recueillir leurs ressentis sur la méthode utilisée.

Les résultats observés montrent que l'utilisation de l'analyse du domaine est bénéfique. Les exigences et les scénarios modélisés jugés corrects sont sensiblement identiques pour les deux groupes, avec une meilleure analyse des facteurs humains. L'utilisation de la hiérarchie d'abstraction a permis pour certains participants de faire émerger de nouveaux scénarios. Pour les cas d'utilisation, l'analyse du domaine a identifié deux fois plus de cas d'utilisation corrects.

Du point de vue des ressentis, les tests ont permis de recueillir les données sur l'effort cognitif consenti, l'acception des méthodes et la sensation de réussite. De manière générale, les retours des participants montrent que l'analyse du domaine demande plus d'effort cognitif et elle est moins acceptée que l'analyse de la tâche. Cette tendance s'exprime dans les verbalisations par le manque de pratique et le caractère original de la méthode. Ils disent cependant que la méthode est susceptible de les aider dans leurs activités avec davantage de pratique. Enfin, le sentiment de réussite est équivalent pour les deux groupes, ce qui montre que l'analyse du domaine a permis aux ingénieurs de modéliser les exercices demandés.

L'expérimentation a validé l'hypothèse émise sur l'intérêt d'intégrer l'analyse du domaine dans les processus de l'ingénierie système. Il est à noter, qu'à notre connaissance et au-delà des résultats, qu'une telle expérimentation fondée sur l'évaluation de méthodes issues de l'ingénierie cognitive pour l'ingénierie système n'a pas été faite auparavant. Notre méthode expérimentale constitue donc une contribution au domaine.

1.0.3 Partie 3 – Proposition de la méthode IS+WDA

Les parties précédentes du document ont montré la pertinence de développer une méthode qui intègre l'analyse du domaine dans les processus d'ingénierie. Une telle méthode aurait le potentiel d'améliorer la prise en compte des aspects techniques, humaines et organisationnels du système, dans les stades précoces des processus de conception et dans une démarche de conception centrée utilisateur.

Dans cette partie, nous proposons un méthode qui se dirige en ce sens. Elle se positionne dans la boucle d'ingénierie et dans les méthodes MBSE. Au travers de ses étapes de recueil d'informations, d'analyse du domaine, d'analyse des acteurs et des situations de vie, elle nourrit directement les couches opérationnelles, fonctionnelles et physiques du modèle global. Elle intervient de manière itérative dans les phases de conception du système. Elle améliore également les étapes de V&V grâce à la comparaison entre la hiérarchie d'abstraction et les modèles du système.

La méthode doit pouvoir s'appliquer à différents types de système, du causal à l'intentionnel. La partie suivante valide cette propriété en déployant la méthode IS+WDA pour les systèmes NECTAR et DURESS II.

1.0.4 Partie 4 – Cas d'étude

La méthode IS+WDA a été déployée pour deux cas d'étude. Le premier est le système NECTAR qui répond aux besoins de voyageurs pour préparer leurs vols. Il s'agit d'un domaine de travail dont les contraintes sont principalement intentionnelles. Le second cas d'étude traite de la centrale thermodynamique DURESS II, son domaine de travail étant constitué de contraintes exclusivement causales.

Les deux cas d'étude ont validé l'utilisation de la méthode. La complémentarité des processus d'ingénierie et des analyses du domaine et de la tâche ont permis de modéliser l'ensemble des couches du modèle des systèmes, avec la participation d'utilisateurs finaux. De manière plus précise, l'analyse du domaine a identifié les objectifs, les critères de réussite, les services et les dispositifs physiques des systèmes. Par sa complémentarité avec l'analyse de la tâche, elle a participé à l'élaboration de scénarios opérationnels. Enfin, elle nourrit directement la conception des architectures fonctionnelles et physiques. Elle reste cependant dépendante d'autres méthodes pour définir les architectures internes des composants fonctionnels et physiques.

Dans une perspective MBSE, il a été montré que la hiérarchie d'abstraction contribuait au modèle global en étant modélisable, en SysML, au niveau de la couche opérationnelle. Par conséquent, tous les éléments de la hiérarchie d'abstraction sont liés et sont traçables dans le modèle général.

Chapitre 2

Perspectives de travail

Les recherches menées dans ce document ont soulevé plusieurs problématiques qui n'ont pas pu être traitées et qui constituent par conséquent des perspectives de travail.

En premier lieu, un des axes de travail majeur consiste à évaluer la pertinence et la faisabilité de l'intégration des quatre autres étapes du CWA dans la méthode IS+WDA. Elles apportent un niveau d'analyse davantage fondé sur l'analyse des tâches cognitives qui peuvent s'avérer intéressante pour la conception de système complexes.

L'expérimentation menée comptait relativement peu de participants malgré des résultats encourageants. Il serait judicieux d'augmenter le nombre de participants pour améliorer la représentativité des résultats lors d'une seconde passation.

Les problématiques de gestion et de pilotage de projets n'ont pas été abordées dans cette étude. Aucune étude d'impacts n'a été réalisée à propos des délais et des coûts engendrés par l'intégration de l'analyse du domaine dans les processus d'ingénierie. Il est envisageable de penser que ceux-ci vont augmenter, mais au profit d'une meilleure définition du système. Il serait donc intéressant de quantifier les gains et les pertes avec le déploiement de la méthode IS+WDA.

La collaboration entre les ingénieurs système et les ingénieurs cognitifs dans un cadre opérationnel n'a pas été étudié. Il serait intéressant de mener une étude sur les interactions entre ces deux communautés, d'observer les points d'achoppement et les points de convergence dans un cas d'étude. Ces résultats permettraient possiblement d'adapter la méthode IS+WDA aux usages opérationnels.

La méthode proposée s'inscrit dans un cadre générique d'ingénierie système. Elle n'est pas liée à une méthode MBSE particulière, comme par exemple la méthode Arcadia. Deux axes de travail se dégagent alors. Soit le développement

de la méthode IS+WDA continue et elle représentera une méthode à part entière. Soit la méthode est intégrée dans des méthodes MBSE existantes.

La question de l'outillage n'a pas été traitée dans cette étude. L'ingénierie système et l'ingénierie cognitive disposent d'outils distincts. Il est peu vraisemblable que les ingénieurs cognitifs utilisent couramment les outils de modélisation tels que Enterprise Architect ou Capella. Une des pistes de travail consiste donc à établir un cadre commun de travail ou un espace de collaboration entre les deux communautés.

Sixième partie

Bibliographie

Bibliographie

[1] ISO 13407. Human-centred design processes for interactive systems. Technical report, International Organization for Standardization, 1999.

[2] Military Standard 1472. Human engineering design criteria for military systems, equipment and facilities. *Military standard, human engineering, Washington DC, US Department of Defense*, 1999.

[3] ISO/IEEE/IEC 15288. Ingénierie système – processus de cycle de vie des systèmes. Technical report, International Organization for Standardization, 2015.

[4] Bernard Adelstein, Alan Hobbs, John O'Hara, and Cynthia Null. Design, development, testing, and evaluation : Human factors engineering. *NASA Engineering and Safety Center's Super Problem Resolution Human Factors Team Report*, 2006.

[5] AFIS. Découvrir et comprendre l'ingénierie système. *Association Française d'Ingénierie Système*, 2009.

[6] Ulf Ahlstrom. Work domain analysis for air traffic controller weather displays. *Journal of safety research*, 36(2) :159–169, 2005.

[7] British Airways. Information.

[8] ANSI/EIA. Processes for engineering a system. Technical report, American National Standards Institute (ANSI)/Electronic Industries Association (EIA), 2003.

[9] Stuart Arnold, Jonathan Earthy, and Brian Sherwood-Jones. Addressing the people problem-iso/iec 15288 and the human-system life cycle. In *INCOSE International Symposium*, pages 641–647. Wiley Online Library, 2002.

[10] A Terry Bahill and Bruce Gissing. Re-evaluating systems engineering concepts using systems thinking. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C : Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 28(4) :516–527, 1998.

[11] Loyd Baker, Paul Clemente, Bob Cohen, Larry Permenter, Byron Purves, and Pete Salmon. Foundational concepts for model driven system design. *INCOSE Model Driven System Design Interest Group*, 16, 2000.

[12] Aaron Bangor, Philip T Kortum, and James T Miller. An empirical evaluation of the system usability scale. *Intl. Journal of Human–Computer Interaction*, 24(6) :574–594, 2008.

[13] Hélene Billet and Thierry Morineau. Application du cadre des interfaces écologiques au domaine de la stratégie financière. In *MajecSTIC 2005 : Manifestation des Jeunes Chercheurs francophones dans les domaines des STIC*, pages 308–315, 2005.

[14] Ann M Bisantz and Catherine M Burns. *Applications of cognitive work analysis*. CRC Press, 2008.

[15] Barry Boehm. A spiral model of software development and enhancement. *ACM SIGSOFT Software engineering notes*, 11(4) :14–24, 1986.

[16] Eric Bonjour, Samuel Deniaud, and Jean-Pierre Micaëlli. Conception complexe et ingénierie système. *Les systèmes techniques. Lois d'évolution et méthodologies de conception*, pages 83–101, 2009.

[17] Eric Bonjour and Maryvonne Dulmet. Pilotage des activités de conception par l'ingénierie système (is). *Ingénierie de la conception et cycle de vie des produits.*, pages 85–105, 2006.

[18] Harold R Booher. *Handbook of human systems integration*, volume 23. John Wiley & Sons, 2003.

[19] Guy A Boy and Jennifer McGovern Narkevicius. Unifying human centered design and systems engineering for human systems integration. In *Complex Systems Design & Management*, pages 151–162. Springer, 2014.

[20] Eric Brangier and Corinne Bornet. Persona : A method to produce representations focused on consumers' needs. *Human Factors and Ergonomics in Consumer Product Design : Methods and Techniques, Taylor and Francis*, pages 37–61, 2011.

[21] Anne Bruseberg. Human views for modaf as a bridge between human factors integration and systems engineering. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 2(3) :220–248, 2008.

[22] Catherine M Burns, David J Bryant, and Bruce A Chalmers. Scenario mapping with work domain analysis. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 45, pages 424–428. SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA, 2001.

[23] Catherine M Burns and John Hajdukiewicz. *Ecological interface design*. CRC Press, 2004.

[24] Catherine M Burns, Gyrd Skraaning Jr, Greg A Jamieson, Nathan Lau, Jordanna Kwok, Robin Welch, and Gisle Andresen. Evaluation of ecological interface design for nuclear process control : situation awareness effects. *Human factors*, 50(4) :663–679, 2008.

[25] PC Cacciabue and G Cojazzi. A human factors methodology for safety assessment based on the dylam approach. *Reliability Engineering & System Safety*, 45(1-2) :127–138, 1994.

[26] Julien Cegarra and Nicolas Morgado. Étude des propriétés de la version francophone du nasatlx. In *Communication présentée à la cinquieme édition du colloque de psychologie ergonomique (Epique)*, pages 28–30, 2009.

[27] JJ Clark and RK Goulder. Human systems integration : ensuring design & development meet human performance capability early in acquisition process-hsi-the acquisition process. *Program Manager*, pages 88–91, 2006.

[28] Miranda Cornelissen, Paul M Salmon, Daniel P Jenkins, and Michael G Lenné. A structured approach to the strategies analysis phase of cognitive work analysis. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 14(6) :546–564, 2013.

[29] Fred D Davis. *A technology acceptance model for empirically testing new end-user information systems : Theory and results*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1985.

[30] Aéroport de Toulouse-Blagnac. Infos pratiques.

[31] Groupe de travail IS (Ingénierie Système). Ingénierie système pourquoi ? - comment ? Technical report, Association Française de l'Ingénierie Système, 1997.

[32] Anandhi Vivekanandan Dhukaram and Chris Baber. A systematic approach for developing decision aids : From cognitive work analysis to prototype design and development. *Systems Engineering*, 19(2) :79–100, 2016.

[33] Dan Diaper and Neville Stanton. *The handbook of task analysis for human-computer interaction*. CRC Press, 2003.

[34] Neil A Ernst, Greg A Jamieson, and John Mylopoulos. Integrating requirements engineering and cognitive work analysis : A case study. In *Fourth Conference on Systems Engineering Research, Los Angeles*, 2006.

[35] Jeff A Estefan et al. Survey of model-based systems engineering (mbse) methodologies. *Incose MBSE Focus Group*, 25(8), 2007.

[36] Kevin Forsberg and Harold Mooz. The relationship of system engineering to the project cycle. *Proceedings of the National Council for Systems Engineering (NCOSE) Conference*, pages 57–65, 1991.

[37] Air France. Mon voyage étape par étape.

[38] Bernat Gacias, Julien Cegarra, and Pierre Lopez. An interdisciplinary method for a generic vehicle routing problem decision support system. In *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM 2009)*, 2009.

[39] Defense Acquisition Guidebook and Workplace Ethic. Introduction to systems engineering. 2000.

[40] John R Hajdukiewicz and Kim J Vicente*. A theoretical note on the relationship between work domain analysis and task analysis. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 5(6) :527–538, 2004.

[41] Christopher Hale, Cindy Ching, Bryan Brett, and Anita Rothblum. Survey of human systems integration (hsi) tools for uscg acquisitions. Technical report, DTIC Document, 2009.

[42] Holly AH Handley and Robert J Smillie. Architecture framework human view : The nato approach. *Systems Engineering*, 11(2) :156–164, 2008.

[43] Nicholas Hardman, John Colombi, David Jacques, Raymond Hill, and Janet Miller. The challenges of human considerations in the systems engineering technical processes. In *7 th Annual Conference on Systems Engineering Research (CSER 2009), Loughborough*, 2009.

[44] Nicholas S Hardman. An empirical methodology for engineering human systems integration. Technical report, DTIC Document, 2009.

[45] Sandra G Hart and Lowell E Staveland. Development of nasa-tlx (task load index) : Results of empirical and theoretical research. *Advances in psychology*, 52 :139–183, 1988.

[46] Shane Hastie and Stephane Wojewoda. Standish group 2015 chaos report, 2015.

[47] Steven R Hirshorn, Linda D Voss, and Linda K Bromley. *NASA Systems Engineering Handbook*. 2017.

[48] Alan Hobbs, Bernard Adelstein, JOHN OHara, and CYNTHIA Null. Three principles of human-system integration. In *Proceedings of the 8th Australian Aviation Psychology Symposium, Sydney, Australia (April 8-11, 2008)*, 2008.

[49] Shinichiro Hori, Kim J Vicente, Yujiro Shimizu, and Isao Takami. Putting cognitive work analysis to work in industry practice : integration with iso13407 on human-centered design. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 45, pages 429–433. SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA, 2001.

[50] IEEE. Ieee standard for application and management of the systems engineering process. Technical report, 2005.

[51] ltd Imperial Chemical Industries, Chemical Industries Association. Chemical Industry Safety, and Health Council. *A Guide to Hazard and Operability Studies*. Chemical Industry Safety and Health Council of the Chemical Industries Association, 1977.

[52] INCOSE. Systems engineering vision 2020. *Systems Engineering Vision Working Group of the International Council on Systems Engineerings*, 2007.

[53] INCOSE. Systems engineering handbook : A guide for system life cycle processes and activities. *Wiley*, 2015.

[54] Dhouha Kbaier Ben Ismail and Olivier Grivard. Model-driven estimation of operators' workload for usage centred design of interactive systems. In *Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support (CogSIMA), 2015 IEEE International Inter-Disciplinary Conference on*, pages 63–69. IEEE, 2015.

[55] ISO. Iso 9241-210 :2010 ergonomics of human-system interaction – part 210 : Human-centred design for interactive systems. Technical report, International Organization for Standardization, 2010.

[56] ISO/IEC. Iso/iec 42010 :2007 systems and software engineering – recommended practice for architectural description of software-intensive sys-

tems. Technical report, International Organization for Standardization, 2007.

[57] ISO/IEC/IEEE. Systems and software engineering - requirements engineering. Technical report, International Organization for Standardization, 2011.

[58] Ivar Jacobson. *Object-oriented software engineering : a use case driven approach*. Pearson Education India, 1993.

[59] Greg A Jamieson, DVC Reising, and JR Hajdukiewicz. Eid design rationale project : Case study report. *Toronto, ON*, 2001.

[60] D Jenkins, N Stanton, G Walker, P Salmon, and M Young. Creating interoperability between the hierarchical task analysis and the cognitive work analysis tools. *Report from the Human Factors Integration Defence Technology Centre, UK*, 2006.

[61] Daniel P. Jenkins. Using the abstraction hierarchy to create more innovative specifications. In *Cognitive Work Analysis : Applications, Extensions and Future Directions*. 2017.

[62] Barry Kirwan and Les K Ainsworth. *A guide to task analysis : the task analysis working group*. CRC press, 1992.

[63] Carine Lallemand and G Gronier. Méthodes de design ux. *Paris, Eyrolles*, 2016.

[64] Jacques Leplat. *Repères pour l'analyse de l'activité en ergonomie*. Presses universitaires de France, 2015.

[65] Gavan Lintern. Work domain analysis : Tutorial. *General Dynamics, Dayton, Ohio*, 2013.

[66] Azad M Madni. Integrating humans with software and systems : Technical challenges and a research agenda. *Systems Engineering*, 13(3) :232–245, 2010.

[67] John C Mankins. Technology readiness assessments : A retrospective. *Acta Astronautica*, 65(9) :1216–1223, 2009.

[68] Jean-Pierre Meinadier. *Ingénierie et intégration des systèmes*. Hermes, 1998.

[69] Stéphane Mer, Alain Jeantet, and Serge Tichkiewitch. Les objets intermédiaires de la conception : modélisation et communication. *Le communicationnel pour concevoir*, pages 21–41, 1995.

[70] Christopher A Miller and Kim J Vicente. Comparison of display requirements generated via hierarchical task and abstraction-decomposition space analysis techniques. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 5(3) :335–355, 2001.

[71] T Morineau. La méthode tmta d'analyse écologique de la tâche et son application à une tâche praxique. *Le travail humain*, 73(2) :97–122, 2010.

[72] Alexandre Moïse and Jean-Marc Robert. Wodomoleid : un langage de modélisation de domaines de travail pour la conception d'interfaces écologiques. *Journal of Human Mediatised Interactions / Revue des Interactions Humaines Médiatisées*, 17(2), 2016.

[73] Ajoy Muralidhar. How human systems integration and systems engineering can work together. *Insight*, 11(2) :11–14, 2008.

[74] Neelam Naikar. Cognitive work analysis : Foundations, extensions, and challenges. Technical report, Defence Science and Technology Organisation Edinburgh (Australia) Air Operations Div, 2011.

[75] Neelam Naikar, Robyn Hopcroft, and Anna Moylan. Work domain analysis : Theoretical concepts and methodology. Technical report, DTIC Document, 2005.

[76] Neelam Naikar, Gavan Lintern, and Penelope Sanderson. Cognitive work analysis for air defense applications in australia. *Cognitive systems engineering in military aviation environments : avoiding cogminutia fragmentosa*, pages 169–200, 2002.

[77] NDIA. Top five systems engineering issues in defense industry. 2007.

[78] Catherine Harvey John M. Preston Simon Blainey Adrian Hickford Brendan Ryan Neville A. Stanton, Rich C. McIlroy. *Exploring the Constraints of Modal Shift to Rail Transport*. CRC Press, 2017.

[79] U.S. Government Accountability Office. Assessments of selected major weapon programs. *United States Government Accountability Office Report to Congressional Committees*, 2005.

[80] OMG. Sysml. Technical report, 2015.

[81] Michael P O'Neil. Development of a human systems integration framework for coast guard acquisition. Technical report, Monterey CA, 2014.

[82] Lisa C Orchanian, Thomas P Smahel, Dianne E Howie, and Kim J Vicente. Duress ii users' manual : A thermal-hydraulic process simulator for research and teaching, 1996.

[83] Douglas W Orellana and Azad M Madni. Human system integration ontology : Enhancing model based systems engineering to evaluate human-system performance. *Procedia Computer Science*, 28 :19–25, 2014.

[84] Fabio Paternò. Concurtasktrees : an engineered notation for task models. *The handbook of task analysis for human-computer interaction*, pages 483–503, 2004.

[85] Mavor A. S. Pew R.W. *Human-System Integration in the System Development Process*. D.C. : National Research Council, 2007.

[86] Ana Luísa Ramos, José Vasconcelos Ferreira, and Jaume Barceló. Revisiting the similar process to engineer the contemporary systems. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 19(3) :321–350, 2010.

[87] Jens Rasmussen. Skills, rules, and knowledge ; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, (3) :257–266, 1983.

[88] Jens Rasmussen. Information processing and human-machine interaction. *An approach to cognitive engineering*, 1986.

[89] Jens Rasmussen, Annelise Mark Pejtersen, and Len P Goodstein. Cognitive systems engineering. 1994.

[90] Jens Rasmussen, Annelise Mark Pejtersen, and Kjeld Schmidt. *Taxonomy for cognitive work analysis*. 1990.

[91] Camille Raymond and Daniel Prun. Extending mbse methodology and sysml formalism to integrate human considerations. In *Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace*, page 18. ACM, 2016.

[92] Camille Raymond, Daniel Prun, and Julien Cegarra. Associer l'ingénierie système et le cognitive work analysis pour soutenir l'intégration homme-système. In *Ergo'IA 2016*, 2016.

[93] Gemma JM Read, Paul M Salmon, and Michael G Lenné. Cognitive work analysis and design : current practice and future practitioner requirements. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 16(2) :154–173, 2015.

[94] Gemma J.M. Read, P.M. Salmon, and Michael G Lenne. The cognitive work analysis design toolkit. In *Cognitive Work Analysis : Applications, Extensions and Future Directions*, pages 249–270. CRC Press, 2017.

[95] James Reason. *Human error*. Cambridge university press, 1990.

[96] Samuel Rochet. Formalisation des processus de l'ingénierie système : Proposition d'une méthode d'adaptation des processus génériques à différents contextes d'application. 2007.

[97] Pascal Roques. *Modélisation de systèmes complexes avec SysML*. Editions Eyrolles, 2013.

[98] Pascal Roques. Mbse with the arcadia method and the capella tool. In *8th European Congress on Embedded Real Time Software and Systems (ERTS 2016)*, 2016.

[99] W. W. Royce. Managing the development of large software systems. *IEEE Wescon*, 1970.

[100] Rouse W.B. Sage A. *Handbook of Systems Engineering and Management*. John Wiley & Sons, 1999.

[101] Paul Salmon, Daniel Jenkins, Neville Stanton, and Guy Walker. Hierarchical task analysis vs. cognitive work analysis : comparison of theory, methodology and contribution to system design. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 11(6) :504–531, 2010.

[102] Penelope Sanderson, Neelam Naikar, Gavan Lintern, and Simon Goss. Use of cognitive work analysis across the system life cycle : From requirements to decommissioning. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 43, pages 318–322. SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA, 1999.

[103] DL Scapin and JMC Bastien. Analyse des tâches et aide ergonomique à la conception : l'approche mad. *Analyse et Conception de l'IHM. Interaction Homme Machine pour les SI*, 1 :85–116, 2001.

[104] Jan Maarten Schraagen, Susan F Chipman, and Valerie L Shalin. *Cognitive task analysis*. Psychology Press, 2000.

[105] SITA. Air transport industry insights, passenger it trends, 2015.

[106] Neville A. Stanton and Daniel P. Jenkins. Application of cognitive work analysis to system analysis and design. In *Cognitive Work Analysis : Applications, Extensions and Future Directions*, pages 3–71. CRC Press, 2017.

[107] Neville A Stanton, Rich C McIlroy, Catherine Harvey, Simon Blainey, Adrian Hickford, John M Preston, and Brendan Ryan. Following the cognitive work analysis train of thought : exploring the constraints of modal shift to rail transport. *Ergonomics*, 56(3) :522–540, 2013.

[108] Alan D Swain and Henry E Guttmann. Handbook of human-reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications. final report. Technical report, Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA), 1983.

[109] Michael Samir Tadros. Integrating the human element into the systems engineering process and mbse methodology. Technical report, Sandia National Laboratories (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2013.

[110] Robert Tassinari. *Pratique de l'analyse fonctionnelle*. Dunod, 2006.

[111] Gerard Torenvliet, Antony Hilliard, Catherine M Burns, Gavan Lintern, and Jean-Yves Lamarre. Modelling and simulation for requirements engineering and options analysis. Technical report, ESTERLINE CMC ELECTRONICS OTTAWA (ONTARIO), 2010.

[112] Jean Verries. *Approche pour la conception de systèmes aéronautiques innovants en vue d'optimiser l'architecture. Application au système portes passager*. PhD thesis, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2010.

[113] Kim J Vicente. *Cognitive work analysis : Toward safe, productive, and healthy computer-based work*. CRC Press, 1999.

[114] Norme Française X50-420. Management des systèmes – soutien logistique intégré – concepts généraux. Technical report, 1994.

Septième partie

Annexes

V.1. Expérimentation 2
V.1.1. Questionnaire préliminaire 2
V.1.2. Support formation HTA 3
V.1.3. Support formation WDA 14
V.1.4. Questionnaire Formation 37
V.1.5. Analyse de la tâche pour l'expérimentation 42
V.1.6. Analyse du domaine pour l'expérimentation 44
V.1.7. Questionnaire modélisation 45
V.1.8. Questionnaire NASA-TLX 49
V.1.9. Questionnaire SUS 51
V.1.10. Questionnaire TAM 53
V.1.11. Verbalisations des exercices de modélisation 57
V.1.12. Verbalisations questionnaires 69
V.1.13. Modèles produits 102
V.1.14. Évaluation des formations 132
V.1.15. Temps d'exécution et sensation de réussite 133
V.1.16. Résultats des questionnaires NASA-TLX 134
V.1.17. Résultats des questionnaires TAM 135
V.1.18. Résultats des questionnaires SUS 136
V.1.19. Explication du test Mann-Whitney 137
V.1.20. Test Mann-Whitney 139
V.1.21. Test Spearman 141

V.1. Expérimentation

V.1.1. Questionnaire préliminaire

Questionnaire : « Mieux vous connaitre »

Vous
Initiales…… Sexe …….. Âge ……..

Dernier niveau d'étude acquis……

Votre profession
Nom de votre profession actuelle……

Depuis combien de temps ? ……

Quelles professions avez-vous exercées avant et leurs durées : ……

Vos compétences
Avez-vous des compétences en (entourez la réponse) :

Informatique ? OUI / NON

- Si oui, quel niveau : Débutant / Intermédiaire / Expert

Facteurs humains ? OUI / NON

- Si oui, quel niveau : Débutant / Intermédiaire / Expert

Mathématiques ? OUI / NON

- Si oui, quel niveau : Débutant / Intermédiaire / Expert

Modélisation, conception ? OUI / NON

- Si oui, quel niveau : Débutant / Intermédiaire / Expert

Management de projet ? OUI / NON

- Si oui, quel niveau : Débutant / Intermédiaire / Expert

Sciences humaines ? OUI / NON

- Si oui, quel niveau : Débutant / Intermédiaire / Expert

Psychologie ? OUI / NON

- Si oui, quel niveau : Débutant / Intermédiaire / Expert

Biologie ? OUI / NON

- Si oui, quel niveau : Débutant / Intermédiaire / Expert

Environnement ? OUI / NON

- Si oui, quel niveau : Débutant / Intermédiaire / Expert

V.1.2. Support formation HTA

Pourquoi cette formation ?

- La méthode « Analyse Hiérarchique de la Tâche » est très utilisée dans la **conception** et **l'évaluation** des **interfaces homme-machine (IHM)**, et aussi dans la prédiction ou l'explication des **performances** des utilisateurs avec une interface donnée

- Cette méthode s'intègre dans l'ensemble des **activités de conception**, de modélisation :

  - Mettre en évidence et décrire logiquement les tâches à effectuer pour atteindre les objectifs des utilisateurs

  - Fixer un cadre et des objectifs

- **Objet de l'étude** : voir si l'analyse hiérarchique de la tâche est intéressante pour l'Ingénierie Système dans les tâches de conception, avec la prise en compte des facteurs humains.

Méthode Ingénierie Système

- **Concevoir des systèmes : Normes et Méthodologies**
  - Normes : les activités (le *quoi?*)
  - Méthodologies : leur réalisation (le *comment?*)
- **Stades précoces de conception : description du système**
  - Les cas d'utilisation
  - Les scénarios opérationnels
  - La rédaction des besoins
  - La spécification des exigences

Analyse hiérarchique de la tâche

- **Approche descriptive**
- **But** : mettre en évidence et décrire les tâches à effectuer pour accomplir un travail.
- **Utilisation** : aider à concevoir les interfaces homme-machine, expliquer les performances des utilisateurs, mettre en place des procédures

4

Analyse hiérarchique de la tâche : Avantages et Inconvénients

- **Avantages :**
  - Compare objectivement différentes approches de la même tâche, en termes de nombres et de types d'étapes
  - Bien formalisée (pas soumise à interprétation)
  - Spécifie les objectifs fonctionnels à des niveaux plus élevés de l'analyse avant que des décisions finales ne soient prises sur le matériel.
- **Inconvénients**:
  - Technique nécessitant des compétences du concepteur pour analyser efficacement et finement la tâche

→ **Promesse de complémentarité des méthodologies IS et analyse hiérarchique de la tâche**

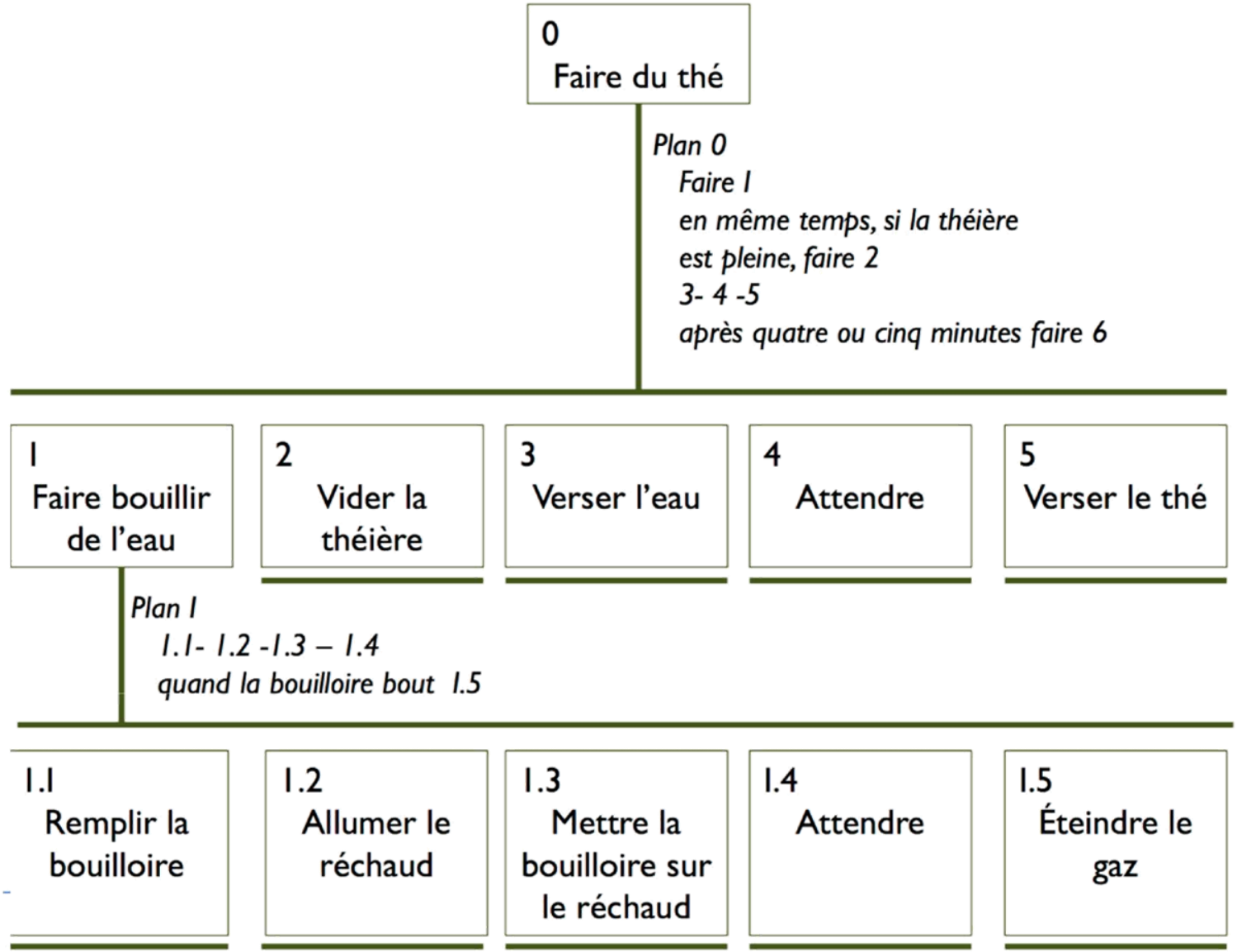
Les principes de l'analyse hiérarchique de la tâche

- **Identifier les principaux objectifs des utilisateurs** : but général défini, puis décomposer en sous-buts auxquels correspondent des sous-tâches (…)
- **Définir et détailler les unités d'analyse** : correspondent aux opérations (durée et complexité n'y sont pas définies), aux étapes que les utilisateurs doivent accomplir pour atteindre leurs objectifs
- **Elaborer un plan :** les unités sont systématiquement organisées. Le plan spécifie quand et dans quel ordre les opérations doivent être exécutées
- Formalisation dans un **arbre hiérarchique**

Comment obtenir l'arbre des tâches ?

- **Analyse de la tâche :**
  - Faire expliciter par une personne la planification d'une série d'actions ou la décomposition d'une tâche en buts, sous-buts, ou encore les cas d'exception, … par la technique d'entretien (ex: la technique du pourquoi (l'objectif visé) et comment (mise en oeuvre))
  - Mettre en évidence la structure hiérarchique de sa connaissance (du plus abstrait au plus détaillé) d'un ensemble d'actions, d'une procédure qu'elle exécute de façon habituelle.
- Modélisation :
  - Organiser les données
  - Formaliser en arbre des tâche

Exemple d'arbre de tâches (Analyse hiérarchique de la tâche)



Les apports de l'analyse hiérarchique de la tâche

- Cette méthode s'intègre dans l'ensemble des **activités de conception**, de modélisation :
  - Mettre en évidence et décrire logiquement les tâches à effectuer pour atteindre les objectifs des utilisateurs
  - Fixe un cadre et des objectifs
  - Décrire les interactions entre un utilisateur et un système
  - Explorer diverses approches possibles pour compléter la même tâche (nouveau système)
  - Optimiser certaines interactions d'un système existant

Et après…

- L'analyse hiérarchique de la tâche semble **prometteuse pour accompagner la démarche d'IS**
- Nous souhaitons faire des **tests utilisateurs** pour évaluer ses apports (objectivement et subjectivement)
- But :

  Faire un **essai appliqué** en IS

  Comparer les résultats et les ressentis

V.1.3. Support formation WDA

Pourquoi cette formation?

- La méthode « Analyse du domaine » **se développe beaucoup :**
  - dans le médical (pour l'état du patient),
  - dans l'aéronautique (pour avoir les contraintes d'un système)

- Cette méthode s'intègre dans l'ensemble des **activités de conception**, de modélisation :
  - Identifier les activités principales du domaine
  - S'affranchir des activités et des acteurs
  - Identifier les goulots d'étranglement dans l'organisation globale du système

- **Objet de l'étude** : voir si l'analyse du domaine est intéressante pour l'Ingénierie Système avec la prise en compte des facteurs humains.

Méthodologie Ingénierie Système

- **Concevoir des systèmes : Normes et Méthodologies**
  - Normes : les activités (le *quoi?*)
  - Méthodologies : leur réalisation (le *comment?*)
- **Stades précoces de conception : description du système**
  - Les cas d'utilisation
  - Les scénarios opérationnels
  - La rédaction des besoins
  - La spécification des exigences

Qu'est ce que l'analyse du domaine ?

- **Méthode ergonomique** permettant d'analyser les systèmes sociotechniques complexes (dont les processus sociaux de communication et de coopération sont omniprésents et essentiels pour leur fonctionnalité globale)

- **Analyse centrée sur les contraintes** du domaine du travail et sur les potentialités de l'environnement de travail, et non sur les tâches

  → Permet de s'affranchir des agents et des situations (approche indépendante)

- **Source d'information précieuse pour le concepteur :**

  → Intervient tôt dans la conception donc s'il y a modification du système ou si on détecte un problème, cela est moins coûteux en temps et en argent.

Les contraintes : définition et les différentes natures

- L'analyse du domaine permet d'identifier les contraintes présentes dans l'environnement de travail.

  Contrainte = les moyens disponibles que les agents doivent utiliser pour atteindre les objectifs.

Comparaison analyse taches / analyse domaine

Analyse de la tâche

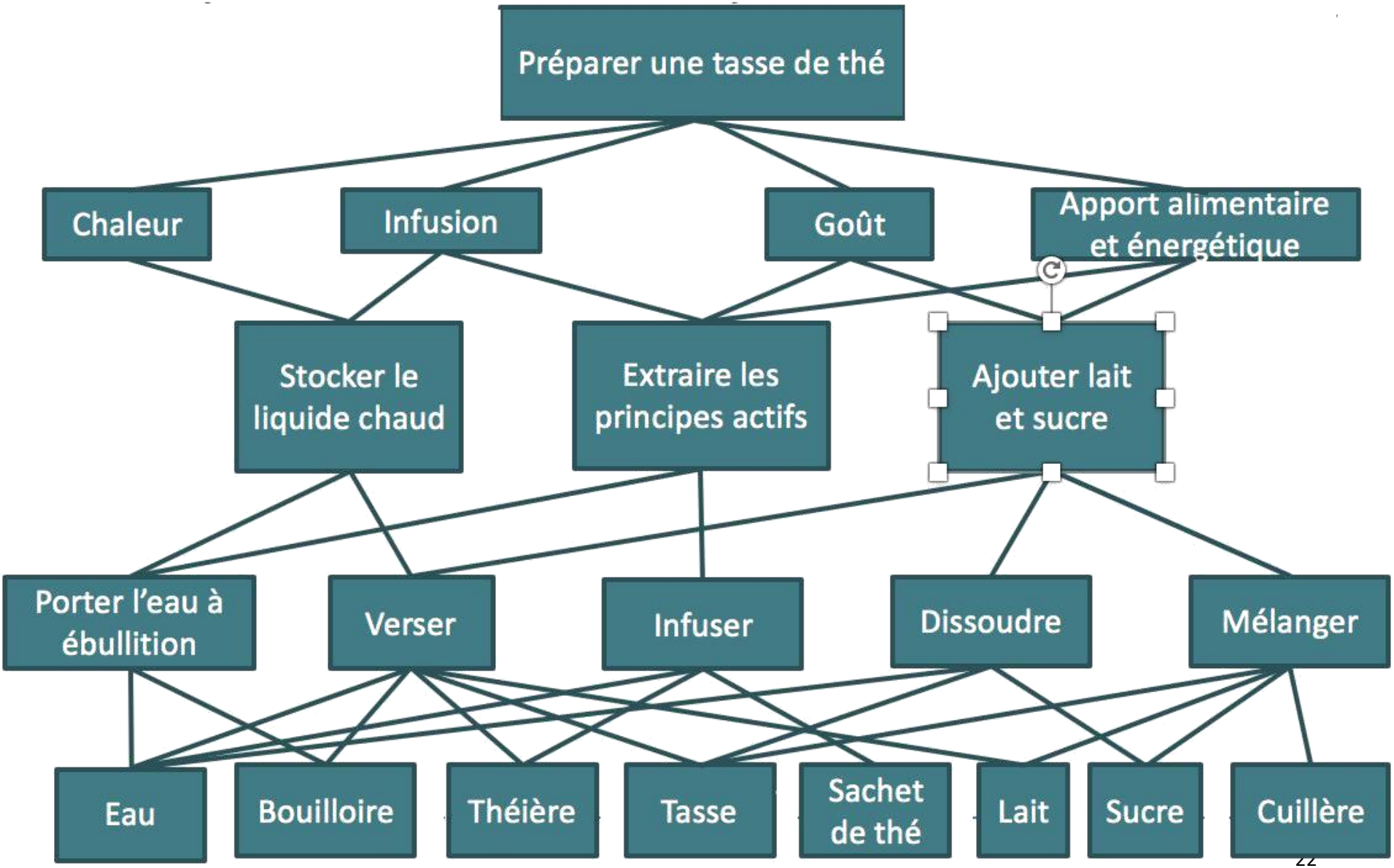
Analyse du domaine

Ces méthodes peuvent offrir une promesse de complémentarité

Analyse de la tâche : préparer une tasse de thé

- Analyse de la tâche :
  - Mettre de l'eau dans la bouilloire
  - Mettre la bouilloire à bouillir
  - Mettre le sachet de thé dans la théière
  - Verser l'eau chaude dans la théière
  - Attendre quelques minutes
  - Verser du lait dans la tasse
  - Verser le thé dans la tasse
  - Mettre du sucre dans la tasse
  - Mélanger le thé

Analyse du domaine : Préparer une tasse de thé



Les différents niveaux d'abstraction

- **Les 5 niveaux d'abstraction :**
  - Objectif Fonctionnel *(Functional Purposes)*
  - Fonctions Abstraites *(Abstract Functions)*
  - Fonctions Généralisées *(Generalized Functions)*
  - Fonctions Physiques *(Physical Functions)*
  - Formes Physiques *(Physical Resources)*

- **Il n'est pas nécessaire de connaître le fonctionnement interne des éléments présentés dans le domaine.**

Le niveau *Objectif Fonctionnel* (1er niveau)

Objectif Fonctionnel

- = **Objectifs principaux du domaine de travail**
- Ils représentent :

les raisons d'être du système

+

l'état souhaité à obtenir

+

la description des contraintes externes imposées par l'environnement

Le niveau *Fonctions Abstraites* (2nd niveau)

- Identifie les **critères (valeurs et mesures prioritaires) qui évaluent la progression globale du système vers les objectifs définis**. Le système ne peut atteindre ses objectifs seulement s'il respecte les critères de mesure exprimés à ce niveau.
- NB : les critères de mesure **restent stables** dans le domaine de travail, même lorsque le système fait face à des situations non prévues lors de sa conception.

Le niveau *Fonctions Généralisées* (3ème niveau)

Ces fonctions doivent être réalisées pour atteindre les objectifs du système (décrits au niveau *Objectifs Fonctionnels*), à l'aide des dispositifs physiques (décrits au niveau *Objets Physiques*).

Le niveau *Fonctions Physiques* (4ème niveau)

- Ce sont **les processus nécessaires aux fonctions *généralisées*,** et qui sont obtenus par les *formes physiques*.

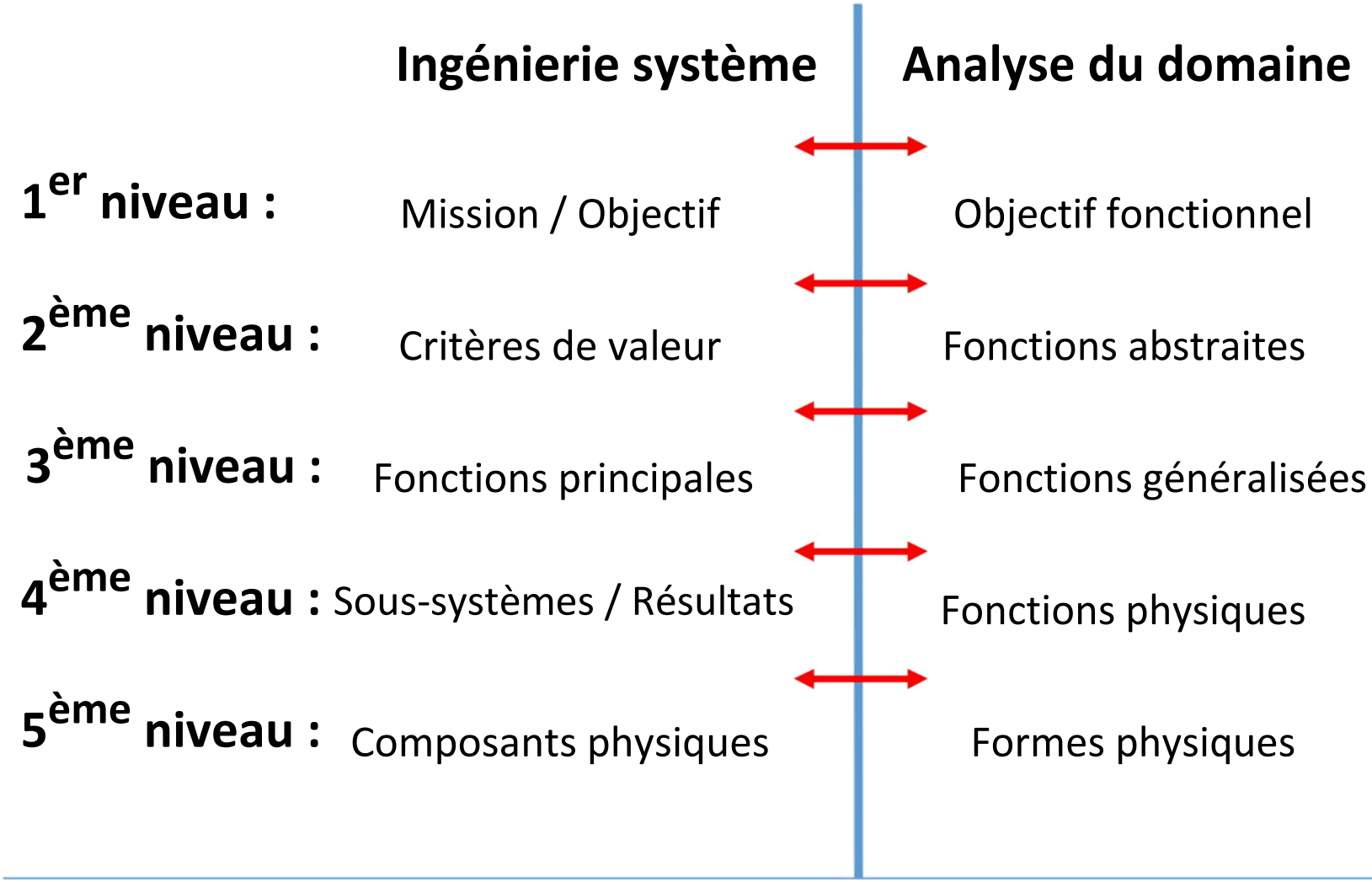
- Pour pouvoir réaliser la fonction généralisée, le domaine doit fournir un **moyen,** une capacité. Cette capacité peut être réalisée de plusieurs manières différentes, identifiées au niveau d'abstraction *formes physiques*.

Le niveau *Formes Physiques* (5ème et dernier)

- Ce sont les **dispositifs physiques ou les acteurs humains** qui réalisent les *fonctions physiques*

- Les agents du système les utilisent pour réaliser les *fonctions généralisées* du domaine.

Equivalence entre terminologie Analyse du domaine et terminologie Ingénierie Système



Les liens moyens-fins

- **Pour un niveau d'abstraction donné :**

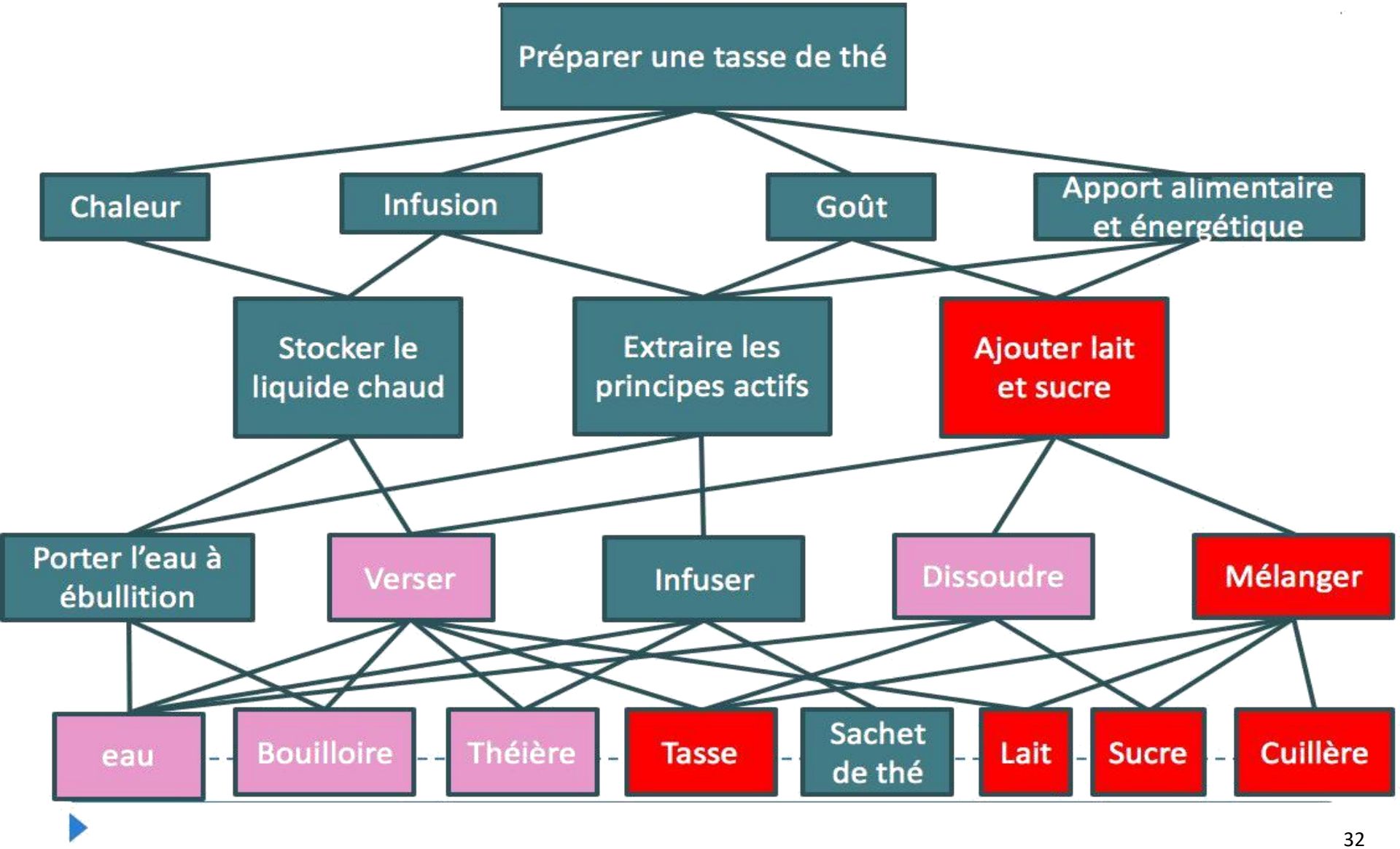
Elément du niv. supérieur → le but à atteindre (le *pourquoi*)
Elément du niv. inférieur → le moyen d'obtention (le *comment*)

- Les liens *moyens-fins* améliorent la **compréhension du système** de travail :

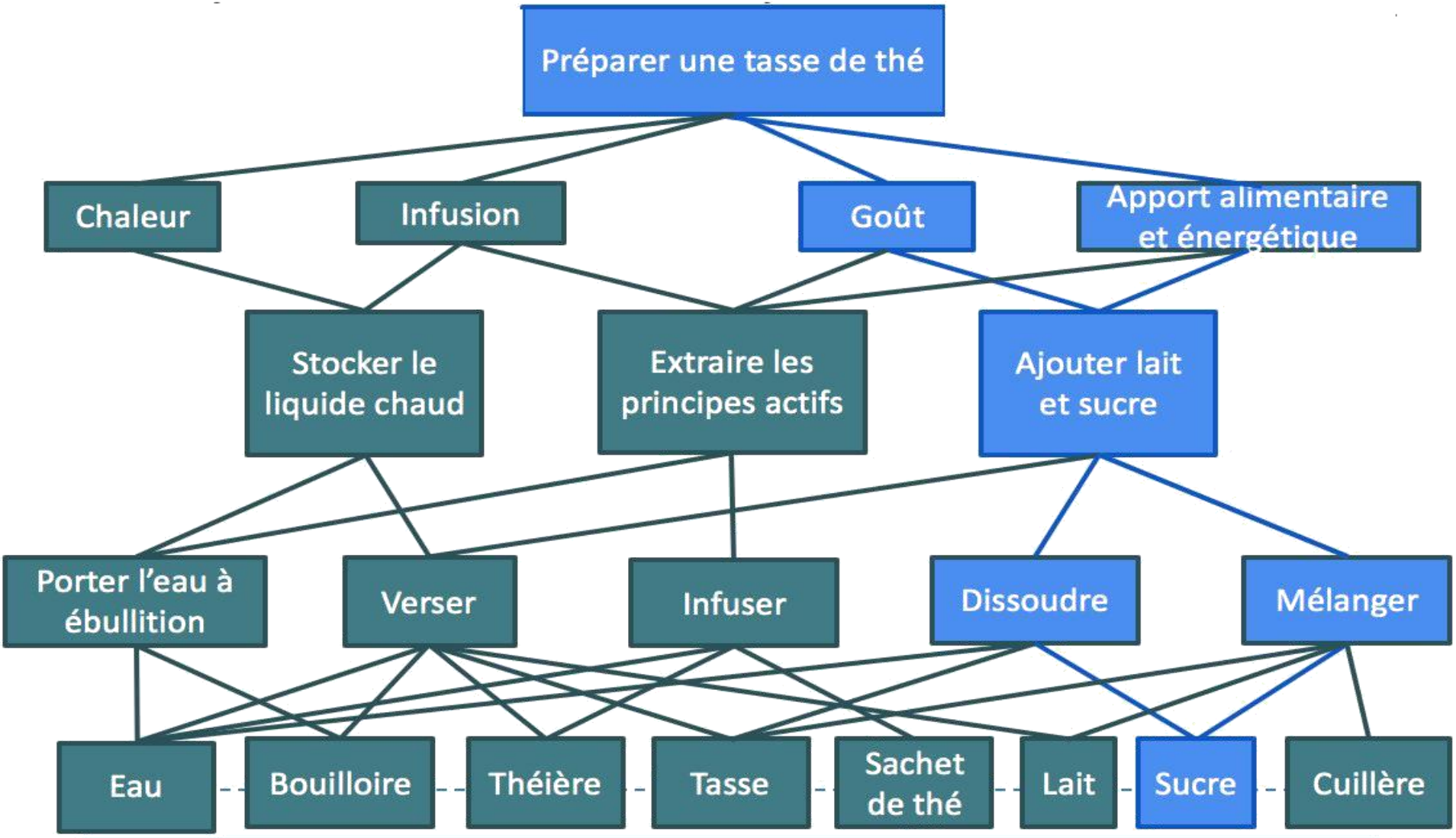
Parcours descendant (Top-Down) → Fonctionnement du système

Parcours ascendant (Bottom-Up) → Objectifs à atteindre

Parcours descendant : Fonctionnement du système



Parcours ascendant : objectifs à atteindre



Les apports de cette approche

- S'intégrer complètement dans les **activités de conception**
- **Visualiser les objectifs** du domaine, les systèmes à développer et les dispositifs physiques à mettre en œuvre, tout en ayant les moyens de mesure pour vérifier leur obtention.
- **Identifier les activités principales** du domaine (indépendante des acteurs) et **établir les services principaux** à mettre en œuvre dans le système pour les exigences
- Faire émerger les **différentes alternatives** pour un même cas d'utilisation (grâce aux liens moyen-fin) : notion des goulots d'étranglement (car fortement mis à contribution) dans l'organisation globale du système
- Exposer des **aspects organisationnels** intéressants pour le concepteur.
- Permet d'avoir une analyse globale (non détaillée) du système
- Permet des degrés de liberté dans la conception et l'évolution du système

Et si le système évolue ?

- Permet de visualiser **les goulots d'étranglement, les alternatives** pour augmenter les capacités du système actuel tout en respectant les contraintes imposées par le système

- Permet de **visualiser les impacts des évolutions et** d'**anticiper** les modifications à prendre en considération.

- Aider les concepteurs à mettre au point des évolutions du système

Et après…

- L'analyse du domaine semble prometteuse pour accompagner la démarche d'IS
- Nous souhaitons faire des **tests utilisateurs** pour évaluer ses apports (objectivement et subjectivement)
- But :

  Faire un **essai appliqué** en IS

  Comparer les résultats et les ressentis

V.1.4. Questionnaire Formation

Formation au HTA - Evaluation de la formation

Vous venez de suivre une formation réalisée par les étudiants du Master Ergonomie de l'INU Champollion, voici maintenant une évaluation de cette formation pour voir si elle a été correctement comprise.

Plusieurs réponses possibles.

Q1 : A quoi la formation faisait-elle référence ?

O La méthode MBSE (Model based on system engineering)
O L'analyse hiérarchique des tâches
O L'analyse du domaine (Work Domain Analysis)

Q2 : Qu'est-ce que l'analyse hiérarchique des tâches ?

O Une méthode de description d'un système
O Un outil de conception informatique
O Une base de données permettant de recueillir les différents besoins utilisateurs

Q3 : A quoi sert l'analyse hiérarchique des tâches ?

O Identifier les contraintes présentes dans l'environnement de travail
O Identifier les principaux buts des utilisateurs
O Identifier les moyens physiques à disposition des utilisateurs du système

Q4 : Quels sont les avantages de l'analyse hiérarchique des tâches ?

O Méthode bien formalisée
O Visualisation rapide des tâches à réaliser
O L'analyse n'a pas besoin d'être refaite si le système évolue

Q5 : Quels sont les inconvénients de l'analyse hiérarchique de la tâche ?

O Méthode qui nécessite d'être complétée (ex : pour les cas dégradés)
O Méthode longue à mettre en place
O Méthode difficile à mettre en place

Q6 : Classifier les étapes de l'analyse hiérarchique des tâches ? (Donner l'ordre des étapes de 1 à 3)

O Définir et détailler les opérations des utilisateurs
O Identifier les principaux buts des utilisateurs
O Elaborer un plan d'ordre d'exécution des tâches

Q7 : Quelle est la technique utilisée pour réaliser une analyse hiérarchique des tâches ?

O Technique du logigramme
O Technique d'entretien (pourquoi-comment)
O Technique des 5 « pourquoi »

Q8 : Comment s'appelle la formalisation de l'analyse hiérarchique des tâches ?

O Arbre des tâches
O Arbre généalogique
O Arbre des causes

Q9 : Qu'apporte cette approche ?

O Un moyen de décrire les besoins d'une interface homme-machine
O Les moyens de mesure pour vérifier l'obtention des objectifs de l'utilisateur
O Un moyen d'optimiser certaines interactions d'un système existant

Formation au WDA - Evaluation de la formation

Vous venez de suivre une formation réalisée par les étudiants du Master Ergonomie de l'INU Champollion, voici maintenant une évaluation de cette formation pour voir si elle a été correctement comprise.

Plusieurs réponses possibles.

Q1 : A quoi la formation faisait-elle référence ?

O La méthode MBSE (Model based on system engineering)
O L'analyse des tâches
O L'analyse du domaine (WDA) et ses niveaux d'abstraction

Q2 : Qu'est-ce que l'analyse du domaine ?

O Une méthode d'analyse de systèmes complexes
O Un outil de conception informatique
O Une base de données permettant de recueillir les différents besoins utilisateurs

Q3 : A quoi sert l'analyse du domaine ?

O Identifier les moyens présents dans l'environnement de travail
O Identifier les astreintes présentes dans l'environnement de travail
O Identifier les moyens à disposition des agents
O Identifier les astreintes des agents

Q4 : Combien y a t-il de niveaux d'abstraction ?

O 3
O 4
O 5
O 6

Q5 : A quoi correspond le niveau Objectifs Fonctionnels (1er niveau) ?

O Aux fonctions qui doivent être réalisées pour atteindre les objectifs du système
O Aux dispositifs physiques qui réalisent les fonctions physiques
O Aux dispositifs physiques permettant d'évaluer l'état du système
O Aux critères qui évaluent la progression du système vers les objectifs définis
O Aux raisons d'être du système et l'état souhaité à obtenir
O Aux fonctions produites par les dispositifs physiques

Q6 : A quoi correspond le niveau Fonctions Abstraites (2ème niveau) ?

O Aux fonctions qui doivent être réalisées pour atteindre les objectifs du système
O Aux dispositifs physiques qui réalisent les fonctions physiques
O Aux dispositifs physiques permettant d'évaluer l'état du système
O Aux critères qui évaluent la progression du système vers les objectifs définis
O Aux raisons d'être du système et l'état souhaité à obtenir
O Aux fonctions produites par les dispositifs physiques

Q7 : A quoi correspond le niveau Fonctions Généralisées (3ème niveau) ?

O Aux fonctions qui doivent être réalisées pour atteindre les objectifs du système
O Aux dispositifs physiques qui réalisent les fonctions physiques
O Aux dispositifs physiques permettant d'évaluer l'état du système
O Aux critères qui évaluent la progression du système vers les objectifs définis
O Aux raisons d'être du système et l'état souhaité à obtenir
O Aux fonctions produites par les dispositifs physiques

Q8 : A quoi correspond le niveau Fonctions Physiques (4ème niveau) ?

O Aux fonctions qui doivent être réalisées pour atteindre les objectifs du système
O Aux dispositifs physiques qui réalisent les fonctions physiques
O Aux dispositifs physiques permettant d'évaluer l'état du système
O Aux critères qui évaluent la progression du système vers les objectifs définis
O Aux raisons d'être du système et l'état souhaité à obtenir
O Aux fonctions produites par les dispositifs physiques

Q9 : A quoi correspond le niveau Formes Physiques (5ème niveau) ?

O Aux fonctions qui doivent être réalisées pour atteindre les objectifs du système
O Aux dispositifs physiques qui réalisent les fonctions physiques
O Aux dispositifs physiques permettant d'évaluer l'état du système
O Aux critères qui évaluent la progression du système vers les objectifs définis
O Aux raisons d'être du système et l'état souhaité à obtenir
O Aux fonctions produites par les dispositifs physiques

Q10 : Comment s'appellent les liens entre les niveaux ?

O Liens de subordination
O Liens d'abstraction
O Liens moyens-fins

Q11 : A quoi sert la lecture Top-down (descendante) ?

O Permet d'identifier les objectifs du domaine à atteindre
O Permet de comprendre le fonctionnement du système

Q12 : A quoi sert la lecture Bottom-up (ascendante) ?

O Permet d'identifier les objectifs du domaine à atteindre
O Permet de comprendre le fonctionnement du système

Q13 : Qu'apporte cette méthode ?

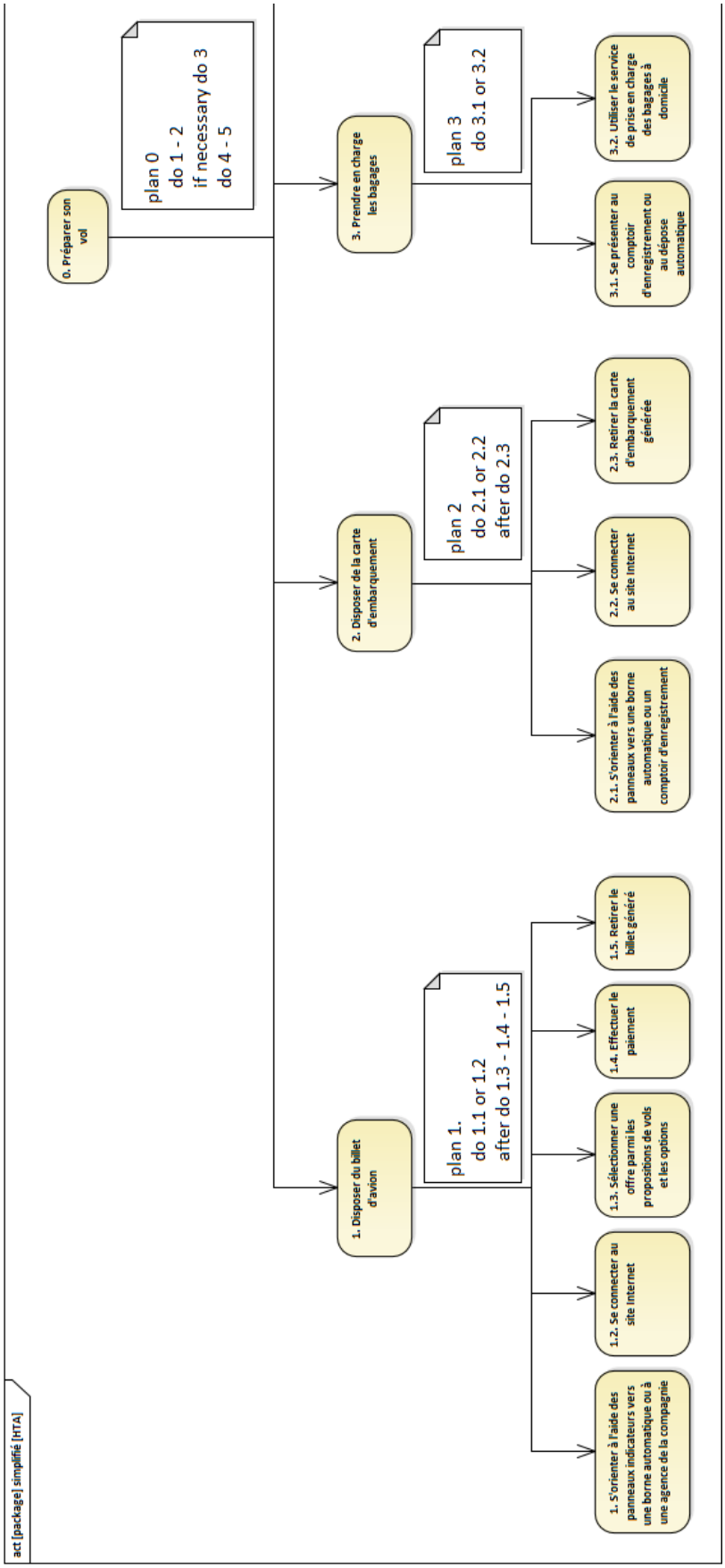
O Un moyen de visualiser les objectifs du domaine

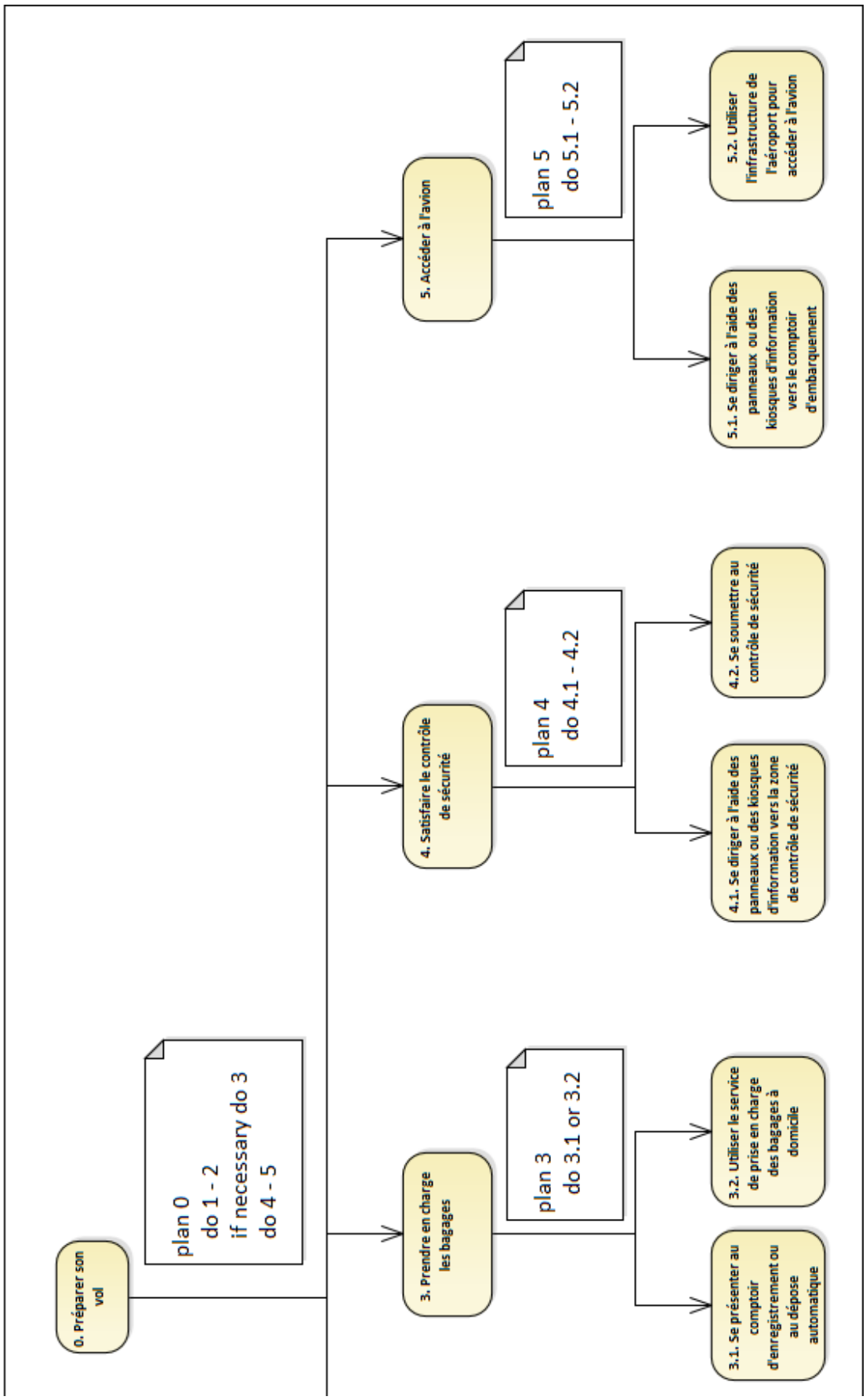
O Les critères de mesure pour vérifier l'obtention des objectifs du domaine

O Le respect des contraintes imposées par le système

O Une robustesse aux évolutions du système

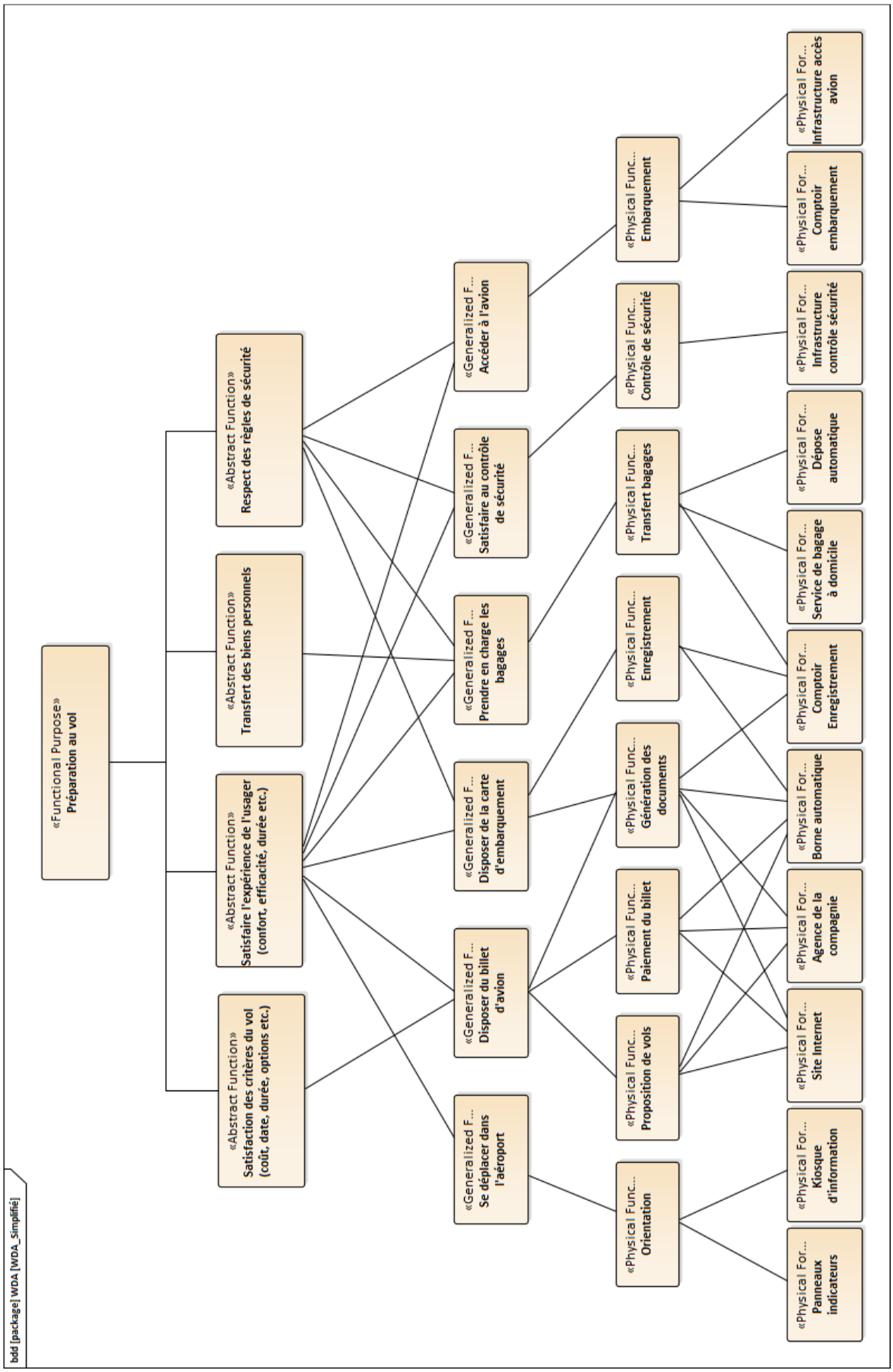
V.1.5. Analyse de la tâche pour l'expérimentation





V.1.5. Analyse de la tâche pour l'expérimentation

V.1.6. Analyse du domaine pour l'expérimentation



Questionnaire HTA

1/ Avez-vous utilisé l'analyse de la tâche pour définir les scénarios nominaux ?

□ Oui □ Non
Si oui, comment l'avez-vous parcouru ?

……
……
……
……

Pensez-vous que son utilisation est facile ?

Pas du tout d'accord						Tout à fait d'accord
	1	2	3	4	5	

Si non, pourquoi ne pas l'avoir utilisée ?

……
……
……
……

2/ Avez-vous utilisé l'analyse de la tâche pour définir les scénarios dégradés ?

□ Oui □ Non

Si oui, comment l'avez-vous parcouru ?

……
……
……
……

Pensez-vous que son utilisation est facile ?

Pas du tout d'accord						Tout à fait d'accord
	1	2	3	4	5	

Si non, pourquoi ne pas l'avoir utilisée ?

……
……
……
……

3/ D'après vous, quels sont les éléments physiques du système les plus sollicités par les usagers ?

……
……
……
……

4/ D'après vous, quels critères permettent d'affirmer que le système répond aux besoins de l'usager ? Pourquoi ?

……
……
……

5/ Face à une forte augmentation du trafic aérien, quelles solutions recommanderiez-vous pour assurer le fonctionnement du système dans de bonnes conditions ?

……
……
……

Questionnaire WDA

1/ Avez-vous utilisé l'analyse du domaine pour définir les scénarios nominaux ?

□ Oui □ Non
Si oui, comment l'avez-vous parcouru ?

……
……
……
……

Pensez-vous que son utilisation est facile ?

Pas du tout d'accord					Tout à fait d'accord
1	2	3	4	5	

Si non, pourquoi ne pas l'avoir utilisée ?

……
……
……
……

2/ Avez-vous utilisé l'analyse du domaine pour définir les scénarios dégradés ?

□ Oui □ Non

Si oui, comment l'avez-vous parcouru ?

……
……
……
……

Pensez-vous que son utilisation est facile ?

Pas du tout d'accord					Tout à fait d'accord
1	2	3	4	5	

Si non, pourquoi ne pas l'avoir utilisée ?

……
……
……
……

3/ D'après vous, quels sont les éléments physiques du système les plus sollicités par les usagers ?

……
……
……
……

4/ D'après vous, quels critères permettent d'affirmer que le système répond aux besoins de l'usager ? Pourquoi ?

……
……
……

5/ Face à une forte augmentation du trafic aérien, quelles solutions recommanderiez-vous pour assurer le fonctionnement du système dans de bonnes conditions ?

……
……
……

V.1.8. Questionnaire NASA-TLX

Questionnaire NASA-TLX

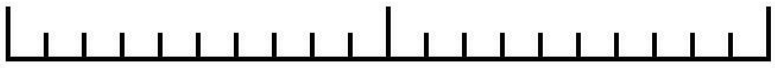
Présentation :

Vous avez participé à une étude sur l'utilisation de l'analyse hiérarchique des tâches dans votre activité et nous souhaiterions apprécier l'impact que celle-ci peut avoir sur votre travail ainsi que sur vous. Le questionnaire que vous allez remplir s'appelle le NASA-TLX. Il permet l'évaluation subjective de la charge de travail globale. Ce questionnaire concerne votre propre ressenti sur la tâche qui a été faite et il suffit de faire une croix pour représenter à quel niveau de l'échelle vous pensez être.

Questions :

Exigence mentale :

Dans quelle mesure des opérations mentales et perceptives ont-elles été requises (par ex. : penser, décider, calculer, se rappeler, regarder, chercher, etc.) ? Ont-elles conduit à une tâche plutôt :



Simple Complexe

Exigence physique :

Dans quelle mesure des opérations physiques ont -elles été requises (par ex. : pousser, tirer, tourner, superviser, activer, etc.) ? Ont-elles conduit à une tâche plutôt :

Facile Difficile

Exigence temporelle :

Quelle était la pression temporelle, que ce soit à cause de la cadence du rythme ou de l'allure des tâches ou de l'apparition des éléments de la tâche avez-vous ressenti ? L'allure était-elle plutôt :

Lente Rapide

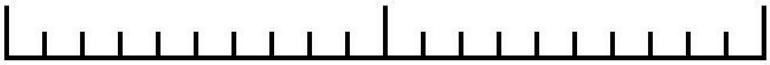
Effort :

Quelle a été la difficulté d'accomplir (mentalement et physiquement) la tâche avec un niveau de performance tel que le votre ?

Faible Forte

Performance :

Quelle réussite vous attribuez-vous en ce qui concerne l'atteinte des buts de la tâche fixés par l'expérimentateur (ou par vous-même) ? Dans quelle mesure êtes-vous satisfait de votre performance dans l'accomplissement de ces buts ?



Bonne Faible

Frustration :

Au cours de la tâche, quel sentiment d'être peu sûr de vous, découragé, irrité, stressé et agacé avez-vous ressenti contrairement au fait d'être sûr de vous, satisfait, content, détendu et complaisant ?

Faible Fort

V.1.9. Questionnaire SUS

Questionnaire SUS

Présentation :

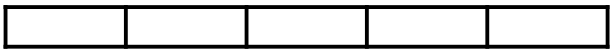
Vous avez participé à une étude sur l'utilisation de l'analyse hiérarchique des tâches dans votre activité, et nous souhaiterions apprécier l'impact que celle-ci peut avoir sur votre travail. Le questionnaire SUS créé par John Brooke en 1986 et de nombreuses études ont validé son utilisabilité.

Merci de répondre aux questions suivantes.

Questions :

1) Je pense que je vais utiliser l'analyse hiérarchique des tâches fréquemment

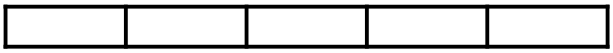
Pas du tout d'accord *Tout à fait d'accord*



1 2 3 4 5

2) Je trouve l'analyse hiérarchique des tâches inutilement complexe

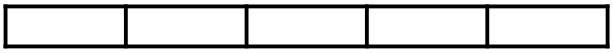
Pas du tout d'accord *Tout à fait d'accord*



1 2 3 4 5

3) Je pense que l'analyse hiérarchique des tâches est facile à utiliser

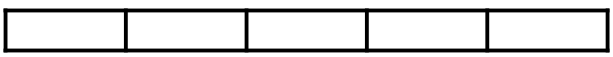
Pas du tout d'accord *Tout à fait d'accord*



1 2 3 4 5

4) Je pense que j'aurai besoin de l'aide d'un expert pour être capable d'utiliser l'analyse hiérarchique des tâches

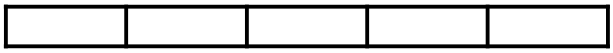
Pas du tout d'accord *Tout à fait d'accord*



1 2 3 4 5

5) J'ai trouvé que les différentes fonctions de l'analyse hiérarchique des tâches ont été bien comprises

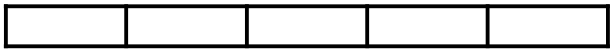
Pas du tout d'accord *Tout à fait d'accord*



1 2 3 4 5

6) Je pense qu'il y a trop d'incohérence dans l'analyse hiérarchique des tâches

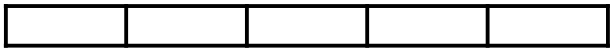
Pas du tout d'accord *Tout à fait d'accord*



1 2 3 4 5

7) J'imagine que la plupart des gens serait capable d'apprendre à utiliser l'analyse hiérarchique des tâches très rapidement

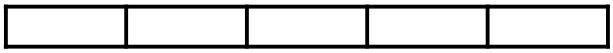
Pas du tout d'accord *Tout à fait d'accord*



1 2 3 4 5

8) J'ai trouvé l'analyse hiérarchique des tâches très lourde à utiliser

Pas du tout d'accord *Tout à fait d'accord*



1 2 3 4 5

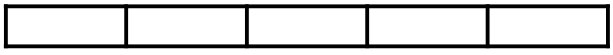
9) Je me sentais très en confiance en utilisant l'analyse hiérarchique des tâches

Pas du tout d'accord *Tout à fait d'accord*

1 2 3 4 5

10) J'ai besoin d'apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir utiliser l'analyse hiérarchique des tâches

Pas du tout d'accord *Tout à fait d'accord*



1 2 3 4 5

V.1.10. Questionnaire TAM

Questionnaire TAM

(Modèle d'Acceptation de la Technologie)

Vous venez de suivre une formation à l'analyse hiérarchique des tâches et de réaliser un test utilisateur, vous allez maintenant pouvoir répondre à un questionnaire afin d'avoir votre ressenti sur l'utilité perçue et la facilité d'utilisation de l'analyse hiérarchique des tâches. Merci de cocher la case correspondant à votre réponse.

Utilité perçue :

1) L'utilisation de l'analyse hiérarchique de la tâche améliorerait la qualité des tâches de conception que je fais

Pas d'accord /_____/_____/_____/_____/_____/_____/_____/
D'accord *extrêmement assez légèrement pas du tout légèrement assez extrêmement*

2) L'utilisation de l'analyse hiérarchique de la tâche me permettrait d'améliorer la qualité de mes livrables

Pas d'accord /_____/_____/_____/_____/_____/_____/_____/
D'accord *extrêmement assez légèrement pas du tout légèrement assez extrêmement*

3) L'utilisation de l'analyse hiérarchique de la tâche augmenterait la productivité dans mes tâches de conception

Pas d'accord /_____/_____/_____/_____/_____/_____/_____/
D'accord *extrêmement assez légèrement pas du tout légèrement assez extrêmement*

4) L'utilisation de l'analyse hiérarchique de la tâche prendrait en charge les aspects essentiels de mes tâches de conception

Pas d'accord /_____/_____/_____/_____/_____/_____/_____/ ***D'accord***

extrêmement assez légèrement pas du tout légèrement assez extrêmement

5) L'utilisation de l'analyse hiérarchique de la tâche couvre des aspects qu'on ne rencontre pas habituellement

Pas d'accord /_____/_____/_____/_____/_____/_____/_____/ ***D'accord***

extrêmement assez légèrement pas du tout légèrement assez extrêmement

6) L'utilisation de l'analyse hiérarchique de la tâche améliorerait mon efficacité dans la réalisation des tâches de conception

Pas d'accord */_____/_____/_____/_____/_____/_____/_____/* ***D'accord***

extrêmement assez légèrement pas du tout légèrement assez extrêmement

7) L'utilisation de l'analyse hiérarchique de la tâche faciliterait la réalisation de mes tâches de conception

Pas d'accord */_____/_____/_____/_____/_____/_____/_____/*
D'accord *extrêmement assez légèrement pas du tout légèrement assez extrêmement*

8) Je trouverais l'analyse hiérarchique de la tâche utile dans ma réalisation de tâches de conception
Pas d'accord */_____/_____/_____/_____/_____/_____/_____/* ***D'accord***

extrêmement assez légèrement pas du tout légèrement assez extrêmement

<u>Facilité d'utilisation perçue :</u>

9) Je trouve l'utilisation de l'analyse hiérarchique de la tâche lourde

Pas d'accord /_____/_____/_____/_____/_____/_____/_____/ ***D'accord***

extrêmement assez légèrement pas du tout légèrement assez extrêmement

10) Apprendre à utiliser l'analyse hiérarchique de la tâche est facile pour moi

Pas d'accord /_____/_____/_____/_____/_____/_____/_____/ ***D'accord***

extrêmement assez légèrement pas du tout légèrement assez extrêmement

11) Je trouve facile d'utiliser l'analyse hiérarchique de la tâche en complément des activités d'ingénierie système

Pas d'accord /_____/_____/_____/_____/_____/_____/_____/ ***D'accord***

extrêmement assez légèrement pas du tout légèrement assez extrêmement

12) L'utilisation de l'analyse hiérarchique de la tâche est claire et compréhensible

Pas d'accord /_____/_____/_____/_____/_____/_____/_____/ ***D'accord***

extrêmement assez légèrement pas du tout légèrement assez extrêmement

13) Je trouve qu'il est souple de travailler avec l'analyse hiérarchique de la tâche

Pas d'accord /_____/_____/_____/_____/_____/_____/_____/ ***D'accord***

extrêmement assez légèrement pas du tout légèrement assez extrêmement

14) Il est facile pour moi de me rappeler le fonctionnement de l'analyse hiérarchique de la tâche pour l'utiliser ensuite

Pas d'accord /_____/_____/_____/_____/_____/_____/_____/ ***D'accord***

extrêmement assez légèrement pas du tout légèrement assez extrêmement

15) Utiliser l'analyse hiérarchique de la tâche nécessite un important effort mental

Pas d'accord /_____/_____/_____/_____/_____/_____/_____/ ***D'accord***

extrêmement assez légèrement pas du tout légèrement assez extrêmement

16) Je trouve qu'un effort important est nécessaire pour acquérir de l'habileté à l'utilisation de l'analyse hiérarchique de la tâche

Pas d'accord /_____/_____/_____/_____/_____/_____/_____/ ***D'accord***

extrêmement assez légèrement pas du tout légèrement assez extrêmement

V.1.11. Verbalisations des exercices de modélisation

Participant HTA-P1

= Avez-vous utiliser l'analyse hiérarchique de la tâche pour définir les scénarios nominaux ? Oui ou non ?

= Oui

= Si oui, comment l'avez-vous parcouru ?

= J'ai pris quelques tâches, et j'ai associé un ou plusieurs scénarios.

= Et pensez-vous que son utilisation est facile ?

= Oui, tout à fait d'accord

= Questions : avez-vous utilisé l'analyse hiérarchique de la tâche pour les scénarios dégradés ?

= Non

= Pourquoi ne pas l'avoir utilisé ?

= Parce que j'ai utilisé mes scénarios. Je n'en avais plus besoin à ce moment là

= D'après vous, quels sont les éléments physiques les plus sollicités par les usagers ?

= Dans quel scénario ? Dans l'ensemble ?

= Oui

= Les bornes pour imprimer la carte d'embarquement. [Il réfléchit]. Les sièges … les panneaux …

= Ok, c'est tout ?

= C'est tout oui, oui je pense

= D'après-vous, quels critères permettent d'affirmer que le système répond aux besoins des usagers ? Et pourquoi ?

= [Il réfléchit] … Disons l'analyse de décomposition des tâches permet de connaitre le besoin de l'usager … j'imagine. Après, une manière d'en être sûr, c'est de le faire en réel, d'aller à l'aéroport est de voir si tout est bien fait. Et une fois qu'on respecte cette analyse-là, et que tous les scénarios couvrent les besoins du voyageur, c'est bon.

= Ok, face à une forte augmentation du trafic aérien, quelles solutions recommandiez-vous pour assurer le fonctionnement du système dans de bonnes conditions.

= Faciliter … essayer de diminuer les fils. Après c'est déjà une maîtrise des fils existantes, pour savoir qu'est ce qui est réellement le plus long. À chaque fois, je pense que c'est la sécurité, c'est là que les gens stressent le plus. Diminuer le temps d'attente dans les fils de sécurité. Et surtout qu'on va être de plus en plus embêter par les règles de sécurité.

= OK, très bien.

Participant HTA-P2

= Avez-vous utilisé l'analyse hiérarchique de la tâche pour définir les scénarios nominaux ?

= Alors est-ce que j'ai regardé … hum non … ouais j'ai dû regarder ce qu'il y avait dedans. Oui je vais dire oui au moins pour regarder les activités. Pour identifier les activités. Surtout nommer les activités … Oui j'ai nommé mes use cases grâce aux activités.

= Pensez-vous que son utilisation est facile ?

= Alors, ce qui est facile, c'est la décomposition comme ça. Après les « do » etc. ce n'est pas super clair par contre. Je ne sais pas, j'aurais peut-être mis ça dans un cran en dessous, pour voir ça ou ça … Même de le présenter un cran en dessous … C'est peut-être quelque chose … peut-être mettre des connecteurs logiques. **On va dire oui … Il y aurait peut-être ces apports à faire. C'est le séquencement … Peut-être mieux restructurer … mieux agencer visuellement**

= Avez-vous utilisé l'analyse hiérarchique de la tâche pour définir les scénarios dégradés ?

= Non. Je suis parti direct sur le site Internet, j'ai fait un mode dégradé par rapport à Internet … Parce qu'après, ce n'est pas immédiat. Ça n'apparait pas … Si par exemple, se connecter si on n'y arrive pas … c'est quoi le plan B. Il n'y a pas les alternatives. Il n'y a que le cheminement normal. S'il y avait un « ou », ça permettrait de voir. Je vais mettre 2.

= D'après-vous, quels sont les éléments physiques du système les plus sollicités par les usagers ?

= Carte d'embarquement, sans ça on ne fait rien. Ça c'est le plus utiliser. Après je dirais tous ce qui est information, les informations de disponibilité et de localisation. Tout ce qui est l'orientation quoi.

= D'après vous, quels critères permettent d'affirmer que le système répond aux besoins de l'usager ? Pourquoi ?

= Ça c'est une bonne question … Le besoin de l'usager c'est préparer son vol. Qu'est-ce que vous mettez derrière le terme de critères … Est-ce qu'il a pu accéder ou pas à l'avion. Si ça coince dans la chaîne … C'est l'accès à l'avion, c'est comme ça qu'on peut mesurer … dans les délais souhaités. Dans le respect des contraintes temporelles …

= Face à une forte augmentation du trafic aérien, quelles solutions recommanderiez-vous pour assurer le fonctionnement du système dans de bonnes conditions ?

= Tout ce qui sur la disponibilité, pour fluidifier l'information. Qu'il n'y ait pas de files d'attente comme ça. Améliorer le système d'information.

Participant HTA-P3

= Avez-vous utilisez l'analyse hiérarchique de la tâche pour rédiger les scénarios nominaux ?

= Non, je ne l'ai pas utilisée pour définir les scénarios nominaux.

= Est-ce que son utilisation est facile ? Entre 1 et 5

= Il n'y a pas de difficultés, je dirais 3.

= Et sinon, pourquoi tu ne l'as pas utilisée ?

= Je n'en ai pas eu l'occasion

= D'accord, sinon tu l'aurais fait ?

= Oui, pourquoi pas ?

= Avez-vous utilisez l'analyse hiérarchique de la tâche pour rédiger les scénarios dégradés ?

= Non, je ne l'ai pas utilisée non plus.

= As-tu trouvé son utilisation facile ?

= Moins facile

= Du coup, tu mettrais combien entre 1 et 5 ?

= Je dirais 3 aussi

= Alors pourquoi tu ne l'as pas utilisé ?

= Je ne comprenais pas tout

= D'après-vous, quels sont les éléments les plus utilisés du système ?

= Le site Internet pour l'achat, le guichet automatique, le comptoir …

= D'après vous, quels critères permettent d'affirmer que le système répond aux besoins de l'usager ? Pourquoi ?

= Sur le retour d'expérience des clients. Et la vérification et validation du système … sur le besoin client et au niveau des exigences …

= Face à une forte augmentation du trafic aérien, quelles solutions recommanderiez-vous pour assurer le fonctionnement du système dans de bonnes conditions ?

= il y a plusieurs possibilités. Juste un exemple que j'ai donné … les bornes automatiques sont là aussi…

Participant HTA-P4

= Avez-vous utilisé l'analyse hiérarchique de la tâche pour définir les scénarios nominaux ?

= Pour le deuxième exercice, la réponse est … non. Parce que je suis allé dans un étage trop détaillé. Donc c'est non.

= Pensez-vous que son utilisation est facile ?

= Je pense qu'il faut le faire une bonne première, après avec une bonne décomposition, c'est sûr que ça facilite.

= Ok, sur une échelle de 1 à 5 en termes de facilité ?

Après je pense que c'est assez facile, 4 sur 5 donc. Après il y a un exercice d'analyse qui est réalisé avant. Au niveau de l'analyse opérationnelle, avant l'analyse fonctionnelle.

= Sinon, pourquoi vous ne l'avez pas utilisé ?

= C'est parce que je n'étais pas au bon niveau dans l'exercice.

= Avez-vous utilisé l'analyse hiérarchique de la tâche pour définir les scénarios dégradés ?

= Je ne suis pas allé jusqu'à là.

= D'après-vous, quels sont les éléments physiques du système les plus sollicités par les usagers ?

= Alors, a priori les éléments physiques sont la borne automatique, et surtout du portail Internet. Les panneaux indicateurs aussi.

= D'après vous, quels critères permettent d'affirmer que le système répond aux besoins de l'usager ? Pourquoi ?

= Le critère la capacité à choisir rapidement le vol à partir de plusieurs options. Et la capacité à passer les contrôles et à se diriger dans l'aéroport. Et d'accéder rapidement à l'avion. C'est surtout une question de temps**.**

= Face à une forte augmentation du trafic aérien, quelles solutions recommanderiez-vous pour assurer le fonctionnement du système dans de bonnes conditions ?

= Prévoir une zone pour les contrôles plus importantes, pour réduire les files d'attente. Je pense aussi qu'il y a la planification des vols qui doit être prévue en conséquence. Donner une indication aux utilisateurs … en donnant l'affluence au moment de la journée.

Participant HTA-P5

= Avez-vous utilisé l'analyse hiérarchique de la tâche pour définir les scénarios nominaux ?

= Oui

= Comment l'avez-vous parcouru ?

= Moi, j'ai commencé par le haut niveau, j'ai jeté un petit coup d'œil avant le plan. Après, je suis revenu après avoir compris. Après j'ai regardé tous les sous-buts. Les bagages si il y en a ou pas. Je pense que j'ai regardé plus en détails, après l'exercice 1. Après le troisième niveau de 1. Donc du coup, j'ai regardé après aussi le plan et puis les autres troisièmes niveaux j'ai regardé un peu plus tard en faisant les exercices.

= Pensez-vous que son utilisation est facile ?

= Moi je dirais plutôt 4, il y avait juste le fait … au niveau du planning, ce n'est pas 100% direct.

= Avez-vous utilisé l'analyse hiérarchique de la tâche pour définir les scénarios dégradés ?

= Pas vraiment, non.

= Et pourquoi ?

= Parce que je suis plutôt parti des scénarios nominaux, c'est vrai que je ne suis pas revenue ici. J'ai regardé plutôt ce que j'ai défini comme étape dans les scénarios nominaux.

= Parce que vous aviez déjà les informations ?

= Ouais, j'ai déjà dans mon scénario nominal. J'ai réfléchi plutôt à chaque étape dans les scénarios nominaux.

= D'après-vous, quels sont les éléments physiques du système les plus sollicités par les usagers ?

= C'est les sources d'information, les panneaux. Je pense que c'est plutôt les panneaux. Et aussi, on va dire l'agence, le comptoir et le site Internet.

= D'après vous, quels critères permettent d'affirmer que le système répond aux besoins de l'usager ? Pourquoi ?

= Alors … je penserais … au niveau de la satisfaction des usagers. Moi je peux faire mes propres critères aussi ? [Oui oui] … Sûrement le temps d'attente dans l'ensemble des tâches. Et je dirais aussi, les moyens disponibles pour chaque service … Par exemple, pour acheter un billet on peut aller sur Internet, on peut aller sur les bornes automatiques … c'est-à-dire s'il y en a un qui ne marche pas, il y a des solutions de recours … Le plus important, c'est que l'usager arrive à voyager avec le système, donc du coup je ne sais pas … est-ce qu'on peut dire que c'est le niveau de confort … lié au fait que … on va peut-être ajouter le niveau de confort. Comme par exemple, s'il arrive facilement à accéder aux services, il est bien accueilli …

= Face à une forte augmentation du trafic aérien, quelles solutions recommanderiez-vous pour assurer le fonctionnement du système dans de bonnes conditions ?

= Donc, je pense qu'il faut augmenter… il faut mettre en place les moyens automatiques, qui avec les bonnes indications comme ça, ça pourrait réduire normalement les temps d'attente … et tout ça, ça veut dire permettre Internet et rendre automatique tout ça … Et aussi assurer que les informations sont disponibles et claires, par exemple tout ce qui est comme les informations des contrôles de

sécurité et tout ça, il faut les répéter et les mettre sous plusieurs moyens, par exemple les consulter sur Internet, mettre des panneaux comme ça et ne pas perdre de temps pendant les contrôles. Voilà.

V.1.11. Verbalisations des exercices de modélisation

Groupe WDA

Participant WDA-P1

= Avez-vous utilisé l'analyse du domaine de la tâche pour définir les scénarios nominaux ?

= Oui, les scénarios nominaux, c'est là que j'ai utilisé

= Et comment ?

= Dans les niveaux que je n'ai pas du tout utilisés, c'est les fonctions abstraites. Pour moi, ça n'a pas sa place à ce niveau-là. Je ne comprends pas pourquoi il est deuxième niveau. Ce que j'ai fait … j'ai utilisé le niveau des fonctions générales qui en fait permettent de retranscrire très bien les tâches finales. Et ensuite, pour les scénarios par exemple dégradés, je regardais les dispositifs physiques qui pouvaient être en panne, et là je remontais. Là aussi [le 4ème niveau], je les mettais ensemble. Et après, ça dépend comment on décrit le scénario, c'est un des deux.

= Avez-vous utilisé l'analyse hiérarchique de la tâche pour définir les scénarios dégradés ?

= En regardant ce qui pouvait être en panne et poser des problèmes, dans les dispositifs physiques.

= D'après-vous, quels sont les éléments physiques du système les plus sollicités par les usagers ?

= Site Internet, agence de compagnie, borne automatique. Là où il y a le plus de trucs [en montrant les relations moyens-fins].

= D'après vous, quels critères permettent d'affirmer que le système répond aux besoins de l'usager ? Pourquoi ?

= Là, il faut regarder les fonctions abstraites. [en montrant les fonctions abstraites] des indicateurs …

= Face à une forte augmentation du trafic aérien, quelles solutions recommanderiez-vous pour assurer le fonctionnement du système dans de bonnes conditions ?

= Alors … tout ce qui est goulot, faut les décupler, ça je pense que c'est évident. Automatiser au maximum … bref … ça redonde avec les goulots.

Participant WDA-P2

= Avez-vous utilisé l'analyse du domaine pour définir les scénarios nominaux ?

= Non

= Pourquoi ?

= J'ai utilisé directement les use case, et de là tous les scénarios ont découlé. Je n'ai donc pas utilisé l'analyse du domaine.

= Avez-vous utilisé l'analyse hiérarchique de la tâche pour définir les scénarios dégradés ?

= Non plus

= Pourquoi ?

= Parce que j'avais tous les éléments nécessaires grâce aux use case et au besoin pour définir mes scénarios dégradés.

= D'après-vous, quels sont les éléments physiques du système les plus sollicités par les usagers ?

= Je dirais les billets d'avion … et tout ce qui panneaux d'indication.

= D'après vous, quels critères permettent d'affirmer que le système répond aux besoins de l'usager ? Pourquoi ?

= [hésite longtemps] … on peut dire que le système répond parce qu'il couvre l'ensemble des besoins qui ont été définis en amont. C'est-à-dire satisfaire l'expérience de l'usager, transférer ses biens personnels, lui permettre d'accéder à l'avion, et aussi de se s'orienter.

= Face à une forte augmentation du trafic aérien, quelles solutions recommanderiez-vous pour assurer le fonctionnement du système dans de bonnes conditions ?

= Il faudrait rajouter un moyen de communication aux usagers, qu'ils leur permettent de savoir qu'il y a un trafic plus important et qu'il doit prendre ses dispositions pour ça. Il y a déjà cette possibilité-là. De là découle le fait que l'utilisateur devra soit arrivé plus tôt à l'aéroport et prendre ses dispositions, prendre la carte d'embarquement à l'avance, prendre ses dispositions pour le contrôle de sécurité. Les indications par rapport aux délais d'attente, on n'a pas forcément parlé de ça.

Participant WDA-P3

= Avez-vous utilisé l'analyse du domaine pour définir les scénarios nominaux ? Et comment l'avez

= Oui, j'ai regardé en fin de compte la cinquième couche, tous ce qui est dispositifs physiques, pareil pour les scénarios dégradés. Je me suis dit, est-ce que les panneaux indicateurs peuvent être défectueux, ou est-ce que le site Internet peut être défectueux. J'ai réfléchi en bottom-up en fin de compte. Et je me suis un petit peu intéressé aux quatre couches, mais d'une manière générale j'ai quand même regardé plus la couche physique qui m'a plus parlée. Il y a aussi des couches qui m'ont plus parlées, comme la couche 3, qui sont en fait pour nous les différentes fonctions à accomplir pour répondre aux besoins du système. Du coup, oui je me suis servi de l'analyse du domaine, ça c'est sûr.

= Sur une échelle de 1 à 5, est-ce vous trouvez ça facile ?

= Je dirais 3 sur 5.

= Avez-vous utilisé l'analyse hiérarchique de la tâche pour définir les scénarios dégradés ?

= Oui, du coup même chose.

= D'après-vous, quels sont les éléments physiques du système les plus sollicités par les usagers ?

= Je dirais les panneaux indicateurs, le site Internet, les bornes automatiques et le kiosque. Enfin en tout ceux qui sont beaucoup revenus dans le travail que j'ai fait.

= D'après vous, quels critères permettent d'affirmer que le système répond aux besoins de l'usager ? Pourquoi ?

= Je pense qu'ils essayent de diversifier au maximum le moyen d'achat du billet, pour pouvoir satisfaire le client en termes de durée, d'efficacité. Pareil pour le dépose-bagages, ils essayent de diversifier, pareil pour l'enregistrement ...

= Du coup les critères, ça serait quoi ?

= Le critère … la multiplicité des moyens pour accéder aux besoins je dirais.

= Face à une forte augmentation du trafic aérien, quelles solutions recommanderiez-vous pour assurer le fonctionnement du système dans de bonnes conditions ?

= Pour la préparation au vol … c'est marrant car je me retourne directement dessus, comme quoi ça m'aide [en parlant de la hiérarchie d'abstraction]. Moi je dirais les sites Internet, parce que c'est quand même la solution pour éviter les files d'attente. Aujourd'hui, je pense que 90% des gens achètent leurs billets d'avion sur les sites Internet, çà ça évite les problèmes de files d'attente comme on a vu dedans, toutes les problèmes de durée, peut-être aussi les problèmes de coût, les paiements sont plus simples et plus rapides directement sur Internet. Le transfert de bagage, le service à domicile, j'avoue que je ne l'ai jamais fait, je ne sais pas si ça existe mais c'est une bonne idée, pourquoi pas. On aurait peut-être du coup moins de monde dans la file d'attente pour les bagages. Au niveau de l'enregistrement, je pense que c'est bien de le faire au comptoir d'enregistrement. Quelles solutions peut-on apporter d'autres ? Après si on n'a pas le temps d'acheter le billet sur Internet, ce qui arrive quelques fois, ou quand on est pressé aussi, c'est peut-être améliorer au niveau des indications et de l'orientation dans l'aéroport pour avoir plus simplement accès aux bornes automatiques ou au kiosque d'information. Et voilà c'est à peu près tout.

Participant WDA-P4

= Avez-vous utilisé l'analyse hiérarchique de la tâche pour définir les scénarios nominaux ? Et pourquoi ?

= Non, la force de l'habitude. Parce que je n'ai pas … j'ai effectivement pas vu forcément, comment dire, la méthode ne m'a pas parue nécessaire pour ce que j'avais à faire. Donc, et en plus, après on a les concepts, encore faut-il les appliquer. Donc non.

= Sinon, Vous pensez que c'est facile à utiliser ?

= Par rapport à ce que je connais, oui ça me semble facile, 4. Parce que je ne l'ai pas vraiment fait.

= Avez-vous utilisé l'analyse hiérarchique de la tâche pour définir les scénarios dégradés ?

= Non plus

= Pour les mêmes raisons ?

= Pour les mêmes raisons.

= Et pour la facilité ?

= C'est pareil, 4.

= D'après-vous, quels sont les éléments physiques du système les plus sollicités par les usagers ?

= Le sol, ce n'est pas mal …

= D'après vous, quels critères permettent d'affirmer que le système répond aux besoins de l'usager ? Pourquoi ?

= Les critères, ça va être la satisfaction de l'usager, le temps d'attente pour toutes les tâches … et le dernier que j'ai noté quelque part … [il cherche], ah oui le confort et niveau sonore, enfin le confort sonore ... le niveau de nuisances sonores.

= Face à une forte augmentation du trafic aérien, quelles solutions recommanderiez-vous pour assurer le fonctionnement du système dans de bonnes conditions ?

= Honnêtement, là je n'ai pas de solutions … après ça va être, faire en sorte que les activités automatiques soient sollicitées comme le site Internet, l'enregistrement automatique des bagages et effectivement réduire le temps sur les différentes activités.

Participant WDA-P5

= Avez-vous utilisé l'analyse hiérarchique de la tâche pour définir les scénarios nominaux ?

= Oui

= Comment l'as-tu parcouru ?

= J'ai regardé cette ligne-là [3ème ligne], disposer du billet d'avion … et j'ai vu aussi la partie physique, les moyens pour justement acheter les billets d'avion : site Internet, agence et borne automatique.

= Penses-tu que son utilisation est facile ?

= Oui, je mettrai 5. De tout façon, tout ce qui est visuel est plus simple

= Avez-vous utilisé l'analyse hiérarchique de la tâche pour définir les scénarios dégradés ?

= Pas vraiment à vrai dire. Je me suis un peu basé sur l'exemple, et avec la partie physique, on peut trouver les cas non nominaux. Mais on n'a pas le niveau de détails … par exemple, peut-être que j'aurais pu le reprendre dans les use case, dans les use case tu as une partie qui s'appelle « extend » qui montre justement les comportements exceptionnels, justement tous ce qui est cas dégradés. On ne les voit pas forcément sur l'analyse du domaine. Peut-être pas très voyant … Il faut toujours être un peu créatif dans ce genre de choses.

= D'après-vous, quels sont les éléments physiques du système les plus sollicités par les usagers ?

= Entre tous cela ? … les choses qui sont obligatoires ou les choses les plus utilisés ? Moi je dirais vraiment … les panneaux indicateurs … parce qu'à l'aéroport, on a constamment besoin de savoir quels sont les quais … les portes … pareil pour les avions … voilà. Surtout je dirais surtout les panneaux indicateurs, ça dépend moi j'aime bien regarder … par exemple il y a Ryanair qui lance des offres sur leur newsletter où je peux voir leurs offres. Je pense que c'est obligatoire, mais bon globalement c'est le site Internet et les panneaux indicateurs. Après « infrastructure accès avion », c'est un peu obligatoire. À moins que vous soyez en hélicoptères.

= D'après vous, quels critères permettent d'affirmer que le système répond aux besoins de l'usager ? Pourquoi ?

= Ça serait plutôt pareil … et bien tout ça, ça répond aux critères [en montrant le deuxième niveau] … Clairement satisfaire l'expérience de l'usager, ça veut dire on respecte plus ou moins les exigences ou les attentes de l'usager concernant le système. C'est une bonne réponse ?

= Il n'y a pas de bonnes réponses … [rire]

= [rire]

= Face à une forte augmentation du trafic aérien, quelles solutions recommanderiez-vous pour assurer le fonctionnement du système dans de bonnes conditions ?

= Peut être faire un système de priorité au niveau de l'embarquement … par exemple s'il y a un vol qui part dans une heure 30 et un autre dans dix minutes, on va peut-être faire une file priorité au niveau du contrôle d'embarquement. Peut-être aussi, en fait au comptoir et au contrôle de sécurité, un système de priorité en fait. Et pareil aussi, au niveau du comptoir d'enregistrement. C'est tout le processus pour rentrer dans l'avion. Tout le process … on s'enregistre, on pose les bagages, sécurité bah … il faut des files prioritaires. Les aéroports nous proposent justement deux heures avant de faire tout le processus, ce qui n'ont peut-être pas trop le temps de faire les files prioritaires, c'est une

des solutions. Ouais ça pourrait être aussi au niveau infrastructure, avec augmenter le nombre d'embarquement. Peut-être aussi les contrôles, avec seulement deux personnes au contrôle avec mille personnes derrières, l'augmentation d'infrastructures. C'est un peu plus ou moins lié aux files prioritaires, on essaye d'améliorer l'infrastructure de l'aéroport. On rentre plus rapidement, et on gère ce problème de trafic.

= D'accord

= Je ne suis pas sûr que tout ce qui est billet ait un impact sur l'augmentation du trafic.

V.1.12. Verbalisations questionnaires

Participant HTA-P1

Transcription HTA (P1)

1er enregistrement :

MOI : alors j'aimerais savoir ce que vous avez pensez de cet exercice, savoir par exercice si vous avez l'impression de l'avoir réussi ou pas. Et pour chaque exercice, il vous faut justifier de manière concise votre réponse.

PARTICIPANT : d'accord par exercice

L'exercice 1, je l'ai fait en deux fois. La première fois j'ai écrit quelques exigences et avant de perdre trop de temps, disons, je suis allé à la suite. Mais j'avais l'impression de ne pas forcement trouver les exigences de facteurs humains. C'est des choses que je n'ai pas l'habitude de faire. Sinon pour les exigences fonctionnelles, j'ai trouvé cela assez simple.

L'exercice 2, j'ai commencé à faire des scénarios au lieu des « use case ». J'ai bien vu que l'exercice 3 c'était des scénarios, disons, qu'après j'ai refait plutôt une liste de « use case ».

L'exercice 3 du coup, comme il ne fallait pas faire de schéma, j'ai expliqué des choses textuelles.

MOI : Vous avez l'impression de l'avoir bien réussi ? est-ce que vous avez eu le temps de le terminer ?

Participant : ah oui, oui j'ai eu le temps de le terminer.

Donc l'exercice 4, là c'est des cas dégradés donc c'est amusant. Après je ne sais pas si j'ai fait des situations très réalistes, mais j'en ai fait trois.

2ème enregistrement : NASA-TLX

MOI : On va reprendre chacune des réponses qui ont été les vôtres, et je vais vous demander de justifier vos réponses.

PARTICIPANT :

1) Les exigences mentales

Du coup comme elle était déjà faite, du coup l'utiliser ça va, ça se comprend bien. Et après c'est plutôt ce qu'on doit faire derrière, il fallait lire les différentes questions, réfléchir à différents cas. C'est plutôt ça qui demande de réfléchir. La méthode en soi, à faire, elle était bien expliquée. Après moi, j'ai toujours du mal, un petit peu… Nous dans le métier on travaille pas mal, on étudie le système rapidement, alors que l'analyse hiérarchique des tâches est basée sur la personne qui utilise. La frontière entre les deux est souvent proche On peut réfléchir un peu différemment.

Je vais rajouter un petit peu. L'écriture : effectivement on a l'habitude de travailler sur PC. Et écrire ne permet pas d'effacer et recommencer, de faire plein de flèches. On a l'habitude d'être aidé quand même pas mal. Après le fait, d'avoir effectivement ça, (Modèle HTA), ça aide.

2) Les exigences physiques

Bon, physique pour ce qu'on a fait c'était pas trop compliqué

3) Les exigences temporelles

Ça fait gagner du temps clairement, parce qu'en une feuille, toutes les situations de vie sont présentées donc après il suffit, donc je me suis mis des points de repère, regardez, 3.1, 4.1… oui c'est bien. Donc du coup ça apporte, une fois que c'est fait, il y a un gain de temps.

4) L'effort

L'utilisation de la méthode : pour moi elle est utilisée pour faire l'arbre au début. Pour moi, je ne fais que l'utiliser, le boulot est déjà fait. Ça fait, gagner du temps. Après il n'en reste pas que pour découvrir tout le « use case », tous les scénarios qu'il y a derrière ça demande à réfléchir.

5) La performance

Je pense avoir fait les quatre exercices, j'ai pas tout border, mais quelques points.

EXPERIMENTATEUR : êtes-vous satisfait de ce que vous avez fait ?

Tout ce qui est textuel, c'est facile. Pour tout ce qui est de scénarios, c'est vrai qu'on a l'habitude d'utiliser des outils informatiques. On trace de belles flèches, des trucs tout beaux, c'est vrai que là c'est tout pas beau. Donc c'est moyen.

6) La frustration

Je n'ai pas de frustration particulière

<u>3ème enregistrement</u> : TAM

1) Ça été un point de repère tout au long des exercices, ne serait-ce que la numérotation
2) Indéniablement, cela permet de savoir est-ce qu'on a tout couvert ou pas et d'avoir une référence
3) Je ne pense pas, parce que … Bon c'est toujours pareil toutes ces analyses transverses. Je pense que ça ne fait pas gagner de temps, ça permet juste d'être sûr que le résultat soit bon. Mais ça demande du temps pour le faire. C'est plutôt une question de qualité, je pense.
4) Tout à fait, effectivement on s'attache généralement aux scénarios principaux

5) Légèrement pas d'accord, parce que c'est des choses qu'on évoque à chaque fois. Là c'est juste une nouvelle manière, une manière différente de le présenter.
6) Ni l'un, ni l'autre, je ne sais pas ça doit dépendre des cas complexes sûrement. Sur des cas relativement simples ça serait perdre du temps.
7) Par contre ça facilite, le fait d'avoir un point de repère. C'est toujours mieux.
8) Pareil, je suis d'accord pour moi c'est la même que celle d'avant « faciliterait la réalisation de ma tâche » et là c'est « serait utile dans la réalisation de ma tâche ». Je pense que ça peut être utile.
9) Oh là la, il y a une double négation. Il faut dire que je ne suis pas d'accord qu'elle soit lourde.
10) Je suis d'accord que c'est facile ; parce que on en fait régulièrement des schémas, on a l'habitude d'en faire.
11) Oui parce que c'est assez proche.
12) Tout à fait d'accord, on voit bien l'ordre chronologique et c'est clair comme c'est un arbre.
13) Ça dépend, en fait tant que ce n'est pas outillé ça n'est pas forcément souple, parce que toutes les analyses graphiques comme ça on va rajouter quelque chose au milieu. On casse tout de son arbre. Tant que ce n'est pas outillé, c'est pas facile. Quand on a le résultat ça paraît simple
14) Tout à fait parce qu'on a eu la formation avant.
15) Oui ça nécessite de réfléchir
    EXPERIMENTATEUR : est-ce que l'effort mental est important, plus pour que pour autre chose ?

Non, mais disons ça changera rien par rapport à si on ne l'a pas on sera obligé de réfléchir au système

16) Je botte en touche, je ne sais pas si j'ai tout compris. L'effort n'est pas très important, je ne sais pas.

<u>4ème enregistrement</u> : SUS

1) Je ne sais pas donc je botte au centre.
2) Pas du tout d'accord, il y a ce qu'il faut.
3) Tout à fait d'accord.
4) Pas du tout d'accord, après on utilise souvent ce type de diagramme. On a l'habitude de les construire même si ce n'est pas sous cet angle-là.
5) Là, faudra que je relise le PowerPoint mais oui.
6) Je ne vois pas pourquoi il y aurait des incohérences, de toute façon c'est juste des descriptions. On est forcément d'accord avec les scénarios. Après comme c'est un peu simpliste peut-être qu'il peut y avoir des cas. Moi je sais que dans nos technologies on a souvent des branches en parallèle, par exemple on peut imaginer qu'on fasse passer la sécurité et enregistrer les bagages en même temps c'est-à-dire

que les tâches ne sont pas forcément chronologiques, mais sont synchrones donc ça va être beaucoup plus compliqué que ça.

7) Tout à fait d'accord.
8) Pas du tout d'accord, ça s'utilise bien.
9) Je botte en touche ça ne m'a pas… ça m'a aidé, on ne peut pas dire que ça m'a mis en confiance.
10) Pas du tout d'accord.

Participant HTA-P2

1er enregistrement : échec / réussite aux exercices de modélisation

Exp : Je voulais savoir si vous pensiez avoir réussi chaque exercice en justifiant vos réponses, en commençant par le 1er.

Par : Le 1er, je l'ai laissé à la fin mais j'aurai dû peut-être commencer avec celui-ci. Mais j'ai des difficultés à distinguer ce qui est fonctionnel et ce qui est d'ordre des facteurs humains. Il y avait une exigence qui était liée aux informations par les panneaux et aux kiosques, j'ai hésité entre aspects fonctionnels et facteurs humains.

Exp : Et tu penses avoir réussi ?

Par : Oui. Oui, à peu près

Pour le 2è, j'ai commencé avec. Je pense avoir réussi aussi.

Exp : D'accord

Par : J'ai essayé de mettre un peu de détails aussi. Après, je ne sais pas si au niveau des use cases, on a besoin de ce type de détail.

Et le 3è, au niveau du scenario, j'ai pas vraiment fait en décrivant avec des phrases, moi j'ai plutôt fait avec des flèches et tout. Ouais, je pense avoir noté la possibilité des 3 moyens différents pour acheter. Après, la question 3, c'était vraiment le cas nominal, c'est-à-dire le cas qui marche bien.

Exp : Oui

Par : Et le 4, si j'ai bien compris c'était plutôt les cas dégradés mais j'en ai fait 2 pour l'achat d'un billet

Exp : D'accord

Par : Et, en prenant compte des tendances entre les différentes solutions et aussi le fait que si jamais on ne retrouve pas les services, j'en ai listé 2.

2ème enregistrement : NASA-TLX

Exp : Pouvez-vous m'expliquer comment vous avez pu évaluer chaque question ?

Par : OK

Exp : Pour l'exigence mentale :

Par : Pour l'exigence mentale, moi je pense en général que les informations sont assez claires et aussi le fait d'avoir déjà eu cette décomposition, c'est assez simple. En fait, c'est plutôt en réorganisation des informations que vraiment que sortir de nouvelles informations, du coup, c'était plutôt simple pour moi.

Exp : D'accord

Par : Et, après au niveau physique, j'ai l'habitude de travailler avec l'ordinateur. Du coup, écrire, c'est devenu difficile. Surtout si je veux changer quelque chose, c'est plus compliqué. Donc le physique c'était pour ça.

Exp : OK

Par : L'exigence temporelle, je me sentais limitée au niveau du temps, surtout que j'entendais certains (de mes collègues) dire qu'ils passaient à un autre exercice. Et puis on ne nous a pas dit au début combien de temps on aurait ou j'ai loupé l'information, c'est vrai que du coup, je n'ai pas trop organisé le temps.

Exp : D'accord

Par : Du coup, j'avais un peu de stress, surtout à la fin. Donc du coup, en fait, j'ai mis pas mal de temps pour le 2 et après

Exp : Camille a rappelé le temps restant quand tu faisais l'exercice 3

Par : Oui et ça m'a stressée

Donc en général, je dirais que c'est assez normal. C'est un peu plus difficile au niveau physique et temps.

Exp : OK. Maintenant Performance.

Par : Ouais, je pense avoir plutôt bien réussi mais si j'avais eu plus de temps, j'aurais pu revoir certaines choses.

Exp : Très bien. Et pour la frustration, le stress, le découragement ?

Par : Un peu stressé au niveau temps, sinon ça va.

Exp : Du coup, faiblement stressée

Par : Voilà. Oui en fait, je dirais c'est le neutre. Un petit peu stressée alors

3ème enregistrement : TAM

1ère question :

Par : Je dirais assez

Ex : ça se traduit comment ?

Par : Sans cet arbre, je pense que j'y arriverai quand même à lister. Car pendant la conception, on est obligés de faire quand même plus ou moins une décomposition des tâches. Avec l'arbre des tâches, le travail a déjà été fait. Ça me permet de réussir à ne pas oublier certaines tâches pendant la conception.

2è question :

Par : Je dirais légèrement car comme je l'ai expliqué, de toute façon on doit le faire et je dois rendre des documents de qualité. Après, au lieu d'avoir le travail déjà fait, je ferai et referai et je discuterai avec les gens pour revoir les informations mais ça n'aurait pas de gros impacts sur la qualité de mes livrables. Du coup, je dirais légèrement.

3è question :

Par : ça fait gagner du temps. Donc je mettrai assez d'accord

4è question :

Par : Légèrement quand même parce que c'est très fonctionnel. Mais on doit prendre d'autres aspects comme le non fonctionnel. On doit gérer les interfaces, les conceptions à plus bas niveaux. C'est assez séquentiel et si on doit avoir des scenarios plus compliqués, j'ai un doute si ça permet de couvrir ces aspects ou pas.

5è question :

Par : Non, je ne pense pas. Je pense que c'est la façon de représenter les choses qui est nouvelle.

Exp : ça n'apporte donc rien de nouveau ?

Par : Si, c'est une vision de très haut niveau, une vision globale, surtout la partie séquentielle.

6è question :

Par : L'efficacité … oui c'est ça que je trouve. C'est qu'en fait ça met en évidence une décomposition de fonctions dès le début et après on peut prendre cette référence. Je trouve ça vraiment pas mal.

7è question :

Par : Légèrement dans le sens qu'en fait on a une référence faite dès le début, une vision globale et exhaustive donc ça donne de la cohérence aussi.

8è question :

Par : Assez utile, notamment dans les tâches de conception, oui.

9è question :

Par : Non, pas du tout lourde. En fait assez car les plans alourdissent.

10è question :

Par : Oui, assez facile mis à part les plans. C'est un système simple donc la lecture est simple mais si on décompose davantage, ça pourrait être plus difficile.

11è question :

Par : En complément … Après avec notre système un peu compliqué mais c'est peut-être à nous de voir jusqu'à quel niveau on descend. Du coup, je dirais assez facile.

12è question :

Par : Oui, c'est extrêmement clair et compréhensible. C'est facile à comprendre et à utiliser. Il n'y a pas de grosses différences avec ce qu'on fait.

13è question :

Par : Je pense que chaque fois on peut l'adapter au niveau du détail. Si on le fait au niveau de la conception, s'il y a un changement, je me demande si c'est assez souple car il faut aussi le modifier et le maintenir. Je dirais assez.

14è question :

Par : C'est extrêmement facile, ça ressemble beaucoup à ce qu'on fait. Bon c'est nouveau mais ce n'est pas très différent.

15è question :

Par : Non, plutôt pas d'accord. Si ce n'est pour les plans.

16è question :

Par : Je pense que le fait de le maintenir et l'adapter par rapport à ce qu'on fait, ça peut demander un effort mental.

4ème enregistrement : SUS

1ère question :

Par : Je vais tester je pense pour voir ce que ça donne pour des vrais sujets qu'on a. Car ça me semble évident mais est-ce que ça améliore l'efficacité ou est-ce que ça va poser des problèmes, étant donné que ça ajoute des choses à faire. Donc je dirais que je suis plutôt neutre. Je vais tester

2ème question :

Par : Trop compliqué… non pas du tout d'accord. C'est assez simple quand même.

3ème question :

Par : 4, c'est assez facile à utiliser mais comme pour les autres questions, il y a les plans. Je vais essayer de m'adapter. Mais je pense aussi à comment adapter cette méthode à celle qu'on a dans la vie de chaque jour.

4ème question :

Par : Non, je ne pense pas. Je comprends ce qu'il faut utiliser.

5ème question :

Par : Oui, tout à fait d'accord.

6ème question :

Par : Non, il n'y en a pas. Je ne trouve pas.

7ème question :

Par : Oui, complètement.

8ème question :

Par : Non, pas d'accord

9ème question :

Par : Ouais, si ce n'est les plans.

10ème question :

Par : Plutôt pas d'accord.

Participant HTA-P3

- **Echec/réussite :**

Expérimentateur : « Pour la première modélisation, est-ce que vous pouvez me dire de façon brève, si vous pensez l'avoir réussie ou du moins terminée ? »

Participant : « [Rires] Non, non, je ne pense pas. En fait, il y a beaucoup de fonctions, c'est très vaste, on le voit d'ailleurs sur le schéma ici (A3 du HTA), et du coup ça prend beaucoup de temps, à lister les différentes fonctions, et donc… Voilà c'est difficile de lister la partie fonctionnelle et puis de prendre en compte les facteurs humains et les contraintes, ça arrive généralement en deuxième et c'est difficile de lister la partie fonctionnelle, et c'est très long. J'ai mal géré le temps. »

Expérimentateur : «Donc vous pensez ne pas l'avoir terminée, pour une question de temps ? Vous voulez peut-être ajouter un commentaire sur cette modélisation, vraiment votre ressenti personnel. »

Participant : « Je n'ai pas de commentaire particulier, comme je disais, peut-être que ce serait plus intéressant d'avoir un peu moins de fonctionnalités, de s'arrêter à une étape intermédiaire je ne sais pas. Après c'est un exemple qui parle à tout le monde, c'est bien choisi. »

Puis il revient sur la modélisation 1, et me parle de son travail global :

Participant : « J'ai l'impression d'être allé trop dans le détail en fait, pour la première modélisation, et je pense qu'on est un peu poussés à aller dans le détail, par la liste de tous ces items. »

Pas d'autres verbalisations pour le FeedBack, le participant n'a pas eu le temps de commencer les modélisations 3 et 4.

- **NASA TLX**

Participant : « Je n'ai pas trouvé super complexe, parce qu'en fait on avait cette décomposition des tâches, voilà. Euh là je ne comprends pas en fait [relis la question 2] je ne vois pas le rapport, enfin je vois pas du tout d'effort physique »

Expérimentateur : « Alors pas du tout ! »

Participant : « Pression temporelle… [lis] euh oui, assez rapide ! Parce que je n'ai pas eu le temps de le faire et parce qu'il y a beaucoup d'exigences, on va trop dans le détail en fait. [Passe à la question sur la difficulté à accomplir la tâche] C'est difficile à dire, c'est assez moyen, plutôt fort, de toute façon j'ai pas réussi. Performance… [lis la question] euh… Non, performance, non, plutôt faible. Frustration [lis la question] est-ce que je me suis senti, frustré, agacé, peu sur de vous, euh… ouais, je ne suis pas sûr de bien comprendre. Y'a une frustration parce que je ne suis pas allé au bout, c'est juste le manque de temps qui m'a frustré. »

- **TAM**

Expérimentateur : « Je vous laisse justifier votre réponse à l'oral »

Participant : « [lis la question 1- réfléchit] Oui, c'est la définition de la hiérarchie, c'est vrai que l'on passe très vite, des fois trop vite, à une analyse fonctionnelle, et on… la partie analyse opérationnelle, de comment est utilisé le système, on y passe trop vite, donc c'est assez voir extrêmement d'accord. »

[lis la question 2- réfléchit] Légèrement, parce qu'en général, le système, sa définition est revue avec le client, l'utilisateur. Donc c'est un exercice qui est déjà fait. Et peut-être qu'en apportant cette analyse, des tâches, peut-être que ça aiderait aussi le client à mieux définir son besoin. Je suis partagé en fait. Entre les deux, ni d'accord, ni pas d'accord. »

[lis la question 3- réfléchit] Je ne sais pas. Je ne sais pas. Légèrement peut-être, mais vraiment je ne sais pas.

[lis la question 4- réfléchit] Ouais légèrement.

[lis la question 5] Je suis au moins, assez d'accord. Comme je le disais c'est un niveau d'analyse qui est opérationnel.

[lis la question 6 - réfléchit] Je ne sais pas vraiment… Je ne sais pas quoi dire là.

[lis la question 7] euh légèrement sur ce scénario-là.

[lis la question 8] Y'a des systèmes qui vont avoir des aspects facteurs humains beaucoup plus importants, et donc du coup, j'ai l'impression que ce n'est pas forcément un facteur essentiel

dans l'aéronautique, je pense notamment à des systèmes que j'ai traité, où il y a déjà des choses bien cadrées. Mais ça reste important d'avoir ça et de savoir, et même bien savoir comment est utilisé notre système.

[lis la question 9] Non.

Expérimentateur : « Donc entre les deux ? Ni lourd, ni pas lourd ? »

Participant : « Voilà c'est ça, pas du tout.

[lis la question 10] Non, ça ne me semble pas compliqué.

[lis la question 11] Oui je suis assez d'accord.

[lis la question 12] Je vais mettre légèrement, parce que pour moi, j'aurai besoin de pratiquer l'exercice, de manière un peu plus sereine, et d'approfondir un peu plus, ou de faire cet exercice particulier ou plutôt les différents exercices.

[lis la question 13] Oui assez mais à priori, je ne l'ai pas assez pratiqué.

[lis la question 14] Cette décomposition-là, oui, elle est, elle me semble, assez facile.

[lis la question 15] – [relis la question] Non, légèrement.

[lis la question 16] Non, je pense pas non plus.

- **SUS :**

Participant : « Dans l'immédiat non, (utilisation fréquente), parce que je n'ai pas l'impression d'avoir des systèmes à définir from scratch. »

Expérimentateur : « Que veut dire from scratch ? »

Participant : « En partant de rien, donc dans l'immédiat non, mais sur d'autres projets, pourquoi pas.

[Lis la question 2] Non je suis pas d'accord (ce n'est pas inutilement complexe)

[Lis la question 3] Ouais je suis assez d'accord (c'est facile à utiliser)

[Lis la question 4] Ben paradoxalement [rapport réponse précédente] je pense que ça mériterait un coaching de le faire avec quelqu'un qui l'a déjà exercé, pour être bien sûr pour que ça soit bien appliqué.

[Lis la question 5]

Expérimentateur : « Par vous-même, on demande votre ressenti personnel »

Participant : « Je peux pas répondre oui, parce que je suis pas allé au bout de tous les exercices, disons que c'est un peu… Un peu court.

[Lis la question 6] Pas d'accord, pas du tout d'accord. J'en n'ai pas… tout est cohérent.

[Lis la question 7] Là je suis assez d'accord.

[Lis la question 8] Non là je peux pas répondre, je vais mettre au centre.

[Lis la question 9] Je suis pas sûr de savoir bien l'utiliser alors… Par rapport à l'exercice que j'ai mené en fait. Je suis pas sûr d'être allé au bon niveau en fait. Mais au niveau du support en lui-même l'analyse qui est là oui, on est en confiance. Ça serait intéressant de voir le passage de cette analyse à la modélisation.

[Lis la question 10] Beaucoup je crois pas non, mais peut-être un peu oui.

Participant HTA-P4

- **Echec/réussite :**

Expérimentateur : « Maintenant, tu vas pouvoir me dire, de façon concise, si pour toi, l'exercice a été un échec ou une réussite et ce que tu en penses. »

Participant : « L'exercice était trop riche. Il y avait trop à modéliser. »

Expérimentateur : « Par rapport à la première question, qu'est-ce que tu en as pensé ? »

Participant : « Oui j'ai réussi à la faire, oui, c'était bien. »

Expérimentateur : « D'accord, est-ce que tu as autre chose à me rajouter par rapport à cette question ? Tout s'est bien passé ? »

Participant : « Non rien, au niveau des exigences c'était bon. »

Expérimentateur : « Pour la question deux maintenant ? »

Participant : « La deuxième question c'était quoi… ? A ouais, c'était le… le cas d'utilisation. Oui j'ai réussi, toutes les infos sont bonnes, il n'y avait pas de difficultés non plus. »

Expérimentateur : « D'accord, ensuite pour la question trois maintenant ? »

Participant : « Cela m'a pris du temps… ça m'a pris du temps, j'ai trop imaginé les scénarios. Donc au niveau des difficultés… j'ai pas bien compris le principe. »

Expérimentateur : « D'accord, tu penses l'avoir réussi ou pas ? »

Participant : « Oui, mais à 80%... Le quatrième exercice, globalement il n'y avait pas de difficultés, c'était juste des scénarios. »

Expérimentateur : « Donc là ça s'est bien passé cet exercice ? »

Participant : « Oui ça s'est bien passé, la seule difficulté c'était au niveau du troisième exercice. »

Expérimentateur : « OK, est-ce que tu trouves quelque chose à rajouter à tout ce qu'on vient de dire ? »

Participant : « Non c'est bon ! »

Expérimentateur : « Super, alors c'est fini pour cette partie, merci. »

- **NASA-TLX**

Expérimentateur : « Maintenant que tu as rempli le questionnaire, est-ce que tu peux m'expliquer tes choix pour chaque question s'il te plaît ? »

Participant : « D'accord, donc au niveau de l'exigence mentale, euh, c'était assez simple. Pour les exigences physiques ce n'était pas super usant donc c'était facile. Au niveau des exigences temporelles, c'était trop rapide, le temps était insuffisant, oui, pour modéliser tous les diagrammes il faut du temps. Au niveau de l'effort général c'était moyen. »

Expérimentateur : « C'était trop court, d'accord. »

Participant : « Au niveau de ma performance je dirais que c'était assez bon…, donc je suis satisfait [rire]. Au niveau de la frustration, je suis satisfait aussi de l'exercice, je n'ai pas été frustré, ni stressé… »

Expérimentateur : « D'accord, donc est-ce que tu aurais quelque chose à rajouter par rapport au questionnaire ? A l'exercice ?... »

Participant : Je dirais que les questions du questionnaire sont un peu…..

Expérimentateur : C'est un questionnaire scientifique après ce n'est pas nous qui l'avons fait donc les questions sont assez complexes c'est vrai… ! »

Participant : Ah d'accord, non donc juste par rapport à l'exercice, il était trop riche, au niveau de la modélisation, et voilà. »

- **TAM**

Expérimentateur : « Donc ici, même principe que pour le NASA-TLX, sauf que tu vas pouvoir m'expliquer tes choix en même temps que tu y réponds. Je te laisse faire ! »

Participant : « [lis la question 1], oui pourquoi pas, ça peut…, ça permet de décomposer les tâches en sous-tâches et la compréhension de la tâche globale, je suis assez d'accord. [Lis question 2], [moment de réflexion] là oui je suis légèrement d'accord. »

Expérimentateur : « Pour quelles raisons du coup ? »

Participant : « Pour les mêmes raisons qu'à la question précédente. [Lis question 3], oui je suis assez d'accord. [Lis question 4], pas du tout, parce que j'utilise une méthode compliquée. [Lis question 5, recherche dans ses feuilles], oui je suis d'accord, elle peut couvrir les aspects qu'on ne peut pas rencontrer, par exemple l'optimisation. [Lis question 6], oui ça améliore. »

Expérimentateur : « En quoi cela peut améliorer ? »

Participant : « Dans la décomposition comme je l'ai dit. [Lis question 7], oui, même réponse que la question précédente. [Lis question 8], ça correspond aux activités du MBSE donc je dirais oui je suis d'accord. [Lis question 9], ouais…, [Lis question 10], lourde à quel niveau ? »

Expérimentateur : « Lourde à utiliser, dans le sens compliqué, difficile, qui demande un effort important… »

Participant : « Ah d'accord, non c'est facile, ça va. [Lis question 11], ouais pourquoi pas. [Lis question 12], oui tout à fait d'accord. [Lis question 13], mmmh, je suis assez d'accord. [Lis question 14], oui il est facile de se rappeler des fonctions et de son fonctionnement. [Lis question 16]… »

Expérimentateur : « Ok, Vous avez des choses à rajouter par rapport aux réponses ? »

Participant : « Non c'est bon. »

- **SUS :**

Expérimentateur : « Et le dernier questionnaire, donc même principe, tu réponds aux questions et en même temps tu m'expliques rapidement et j'enregistre. C'est ok pour toi ? On peut démarrer ? »

Participant : « Oui, c'est bon. Donc [lis question 1], euh moyen pourquoi pas. [Lis question 2], pas du tout elle n'est pas complexe. [Lis question 3], oui très facile. [Lis question 4], pas du tout car elle est facile. [Lis question 5], non, elle est bien expliquée, bien détaillée. [Lis question 6], non car ça correspond aux méthodes d'ingénierie système. [Lis question 7], oui, en plus dans une courte durée, je pense que ce serait possible. [Lis question 8], non, ah mince je me suis trompée sur l'échelle, elle est compliquée à utiliser ! [Lis question 9], oui. [Lis question 10], moyen, oui il faut faire du SADT pour la décomposition, il faut quand même des bases. »

Expérimentateur : « C'est bon pour toi ? Tu veux rajouter quelque chose ? »

Participant : « Non, c'est bon, merci. »

Expérimentateur : « Eh bien merci à toi d'avoir participé, c'était mon dernier questionnaire ! »

Participant HTA-P5

Echec/réussite :

Consigne : « Nous allons revenir sur chaque question et vous allez me dire si vous vous êtes plutôt senti en réussite ou en échec sur la question et si vous avez un commentaire à ajouter. »

Mod 1 :

Réussite oui, car j'ai bien séparé les tâches fonctionnelles des contraintes je pense.

Mod 2 :

Réussite, les use cases sont un outil assez simple, c'est un système connu que j'utilise au quotidien et donc cela ne m'a posé aucun problème.

Mod 3 :

Réussite mais le fait que j'ai mal lu la consigne m'a fait passer plus de temps sur la question que le temps nécessaire.

Mod 4 :

Réussite, l'outil est vraiment intéressant car la décomposition du système permet de confronter le fonctionnement du système face aux représentations que peut se faire une personne.

Nasa-TLX :

Exp : On va maintenant revenir sur chaque question et vous allez m'expliquer vos choix avec tout d'abord les exigences mentales.

Par : Oui c'est assez automatique, c'est mon métier donc c'est peu contraignant pour moi.

Exp : Ensuite pour les exigences physiques ?

C'est surtout lié à la question 3, où j'ai mal lu la consigne et du coup j'ai écrit plus que ce que j'aurais dû écrire, il a fallu gratter et je ne suis pas habitué à écrire avec un stylo dans mon travail. Après je pense que ici on parle d'exigences physiques générales et cela m'a peu impacté. Exigence physique : écriture avec le stylo sur des tâches non demandés (hors sujet a fait écrire plus que la normale). J'ai beaucoup écrit dû au hors sujet, il a fallu que je tartine. « Achat du billet » sur la question 3.

Exp : En ce qui concerne l'exigence temporelle

Par : Plutôt normal, je n'ai pas intégré le temps dans l'exécution de la tâche.

Exp : Même lors des rappels de temps vous n'avez pas ressenti de pression spécifique ?

Par : Non, non je me suis dit j'avance vu que c'est toujours comme ça finalement, on sait que les choses s'arrêtent à un moment donné mais qu'il faut les faire. Cela ne m'a pas paru une exigence.

Exp : Pour l'effort ?

Par : Ça doit faire la moyenne entre exigence physique et mentale. (Relecture résultat Q1 et Q2), oui donc c'est cohérent.

Exp : Au niveau de la performance maintenant ?

Par : Je me mets 12 à peu près, à cause de mon hors sujet à la question 3.

Exp : on va finir avec la frustration :

Par : Non je ne me sens pas spécialement frustré à part peut être vis-à-vis de la question 3 toujours. Toujours pareil avec mon activité hors sujet.

TAM :

Q1 :

Par : Là je suis assez d'accord d'après ce que j'ai déjà dit

Exp : Si c'est possible de donner un peu plus d'indications sur les réponses et d'expliciter vos choix

Q2

Par : Oui car ça permet de faire une checklist

Q3

Par : C'est lié à la question précédente ou on parle de qualité produit. Dans le but d'atteindre la qualité souhaitée directement.

Q4 :

Par : Là je ne suis pas persuadé

Q5

Par : Je ne vois pas du tout… Il y a rien de nouveau, c'est juste une manière différente de présenter l'info.

Q6

Par : Pour moi, l'amélioration de l'efficacité est totalement liée à l'amélioration de la qualité et de la productivité. C'est des méthodes qui peuvent être complémentaires car on ne pense pas forcément à tout. Le métier d'ingénieur système c'est avant tout beaucoup de fonctionnel avec beaucoup de IHM.

Q7

Par : Là je dirais oui, ça va dépendre des contextes, sur un système électronique pur, on peut faire une checklist et ce sera suffisant alors qu'un appareil avec une forte interaction homme-machine bénéficie de ce complément de modèle.

Q8

Par : Oulah il y a une subtilité de grammaire avec la question précédente.

Exp : serait utile et faciliterait

Q9

Par : Bah non, c'est pas un système lourd à utiliser

Q10

Par : D'accord

Q11

Par : Assez d'accord, après il faut cibler tout ce que l'on fait.

Q12

Par : Tout à fait d'accord

Q13

Par : D'accord aussi

Q14

Par : Tout à fait d'accord

Q15

Par : On ne va pas dire qu'on fait rien mais…

Q16

Par : Non pas du tout !

SUS :

Exp : on va passer au dernier questionnaire qui est dirigé vers l'utilisabilité du modèle dans votre contexte de travail.

Q1

Par : Oh oui en ce moment je suis sur des projets Peugeot et donc on travaille sur le fonctionnement de portières qui s'ouvrent et se ferment donc voilà…

Q2

Par : Inutilement complexe non, ça dépend du sujet.

Q3

Par : Totalement.

Q4

Par : Non, il ne faut pas exagérer, je suis capable de l'utiliser tout seul.

Q5

Par : Oui ça je suis d'accord après il faut voir comment j'ai répondu aux questions de toute à l'heure.

Q6

Par : Non justement je pense qu'il y a plutôt des complémentarités.

Q7

Par : Oui ça je suis d'accord.

Q8

Par : Très lourd ? Pas du tout, j'y ai répondu dans le questionnaire précédent.

Q9

Par : Oui la facilité d'utilisabilité m'a permis d'être tranquille pendant la réalisation de la tâche.

Q10

Par : Non, j'ai réussi à le mettre en place facilement.

Groupe WDA

Participant WDA-P1

- **Echec/réussite :**

Participant : « Si on commence par le premier exercice qui est la rédaction des exigences, je n'ai pas trop su comment commencer par rapport au texte, bon je n'avais pas vu qu'il y avait le schéma, mais c'est autre chose. Rien qu'avec l'analyse du domaine ça m'a aidé pour rédiger, on va dire plus précisément les exigences. Par contre c'est l'exercice qui était pour moi le plus compliqué, notamment pour classifier après les exigences à partir des analyses du besoin. J'aurai fait des sous parties, mais c'est plus des exigences dérivées qui découlent les unes des autres que des fonctionnelles ou des human factor, ou des contraintes.
En ce qui concerne les cas des utilisations (l'exercice 2), pour moi, il n'y a pas eu de problème de ce côté-là. Avec l'analyse du besoin, on traite facilement les « use case » qui découlaient directement, moi j'ai pris du 3ème niveau. Donc au 3ème niveau, je me suis inspiré de ça pour faire les cas d'utilisation du 1er niveau. A partir de cela découlait des cas d'utilisations opérationnelles un peu plus fin. Donc voilà, je pense bien terminer l'exercice.
Pour ce qui concerne le 3ème exercice, je n'ai pas eu non plus trop de difficultés. Avec les « use cases » précédentes, j'ai réussi facilement à voir quel scénario opérationnel en découlait donc j'en ai rédigé trois, il y en a forcément plus. Donc voilà, pas de problème particulier.

Et pour le niveau, le 4ème exercice est intéressant aussi. Donc j'ai réalisé quatre scénarios dégradés tous différents de plusieurs points de vue donc pas seulement de l'utilisateur, mais des outils permettant d'acheter le billet donc voilà, je pense avoir terminé.
Dans l'ensemble j'ai plutôt bien vécu l'exercice par rapport à cette difficulté de démarrer au début et de savoir sur quoi se baser pour réaliser telle ou telle action et notamment la rédaction des exigences, voilà mon ressenti global. »

- **NASA – TLX :**

Participant : « En ce qui concerne les exigences mentales c'est toujours un peu complexe parce que c'est une discipline qu'on ne connait pas. On a un temps très court pour faire cet exercice. Là il y a une part de réflexion, d'adaptation, c'était relativement complexe. Mais après face au job ça s'est bien passé dans l'ensemble. C'est une tâche complexe mais qui n'a pas forcément affecté là-dessus.
Pour les exigences physiques, ça demande quasiment aucune exigence physique. C'est clairement mental. Donc aucune exigence physique ici.
Euh, les exigences temporelles maintenant, je l'ai un peu abordé au début c'est vrai que vu que c'est quelque chose de nouveau et qu'on a un temps même si l'exercice n'est pas non plus… dur, dans un délai assez court, ça a son importance dans la réalisation de son objectif.
Après par rapport à l'effort, comme je disais, moi c'était neutre parce que voilà ça ne m'a pas demandé plus d'effort que ça. J'aurai juste aimé, voilà en me réunissant avec la question

d'avant, avoir plus de temps pour prendre le temps pour faire quelque chose de peut-être plus accompli donc c'est aussi lié à la frustration voilà.
Pour la performance, là je me suis trompé je voulais mettre un peu plus haut. Je change, j'ai pensé plus faible mais en écoutant… Donc non au niveau de la performance je suis plutôt content de ce que j'ai fait, de ce que j'ai compris et appris. Donc après on verra si ce que j'ai fait est en accord ou pas.
Et au niveau de la frustration, je disais que j'étais un peu frustré par rapport au début des exigences, et la manière de comprendre. Ça va dans mon tempérament et mon caractère de comprendre tout de suite. »

- **TAM :**

Participant : « [Lis la question 1], Au jour d'aujourd'hui je dirai « assez ».
[Lis la question 2], pas du tout, je ne vois pas comment la qualité des livrables… cette question est trop subjective pour moi.
[Lis la question 3], ça c'est possible, donc je dis « assez » par rapport à… je pense à la rapidité d'exécution des tâches… voilà une fois qu'on a fait les 5 niveaux, pour les cas d'utilisation en tout cas, c'était quand même assez rapide.
[Lis la question 4], je dirais pas du tout parce que prendre en charge certaines de mes tâches n'est pas essentiel.
[Lis la question 5], ça c'est vrai.
[Lis la question 6], légèrement, j'ai besoin de preuves.
[Lis la question 7], j'ai l'impression que c'est … ça c'est possible, c'est légèrement aussi.
[Lis la question 8], au jour d'aujourd'hui, je dirai que ça complexifierai les choses. Donc pas du tout parce que c'est complexe mais parce que je n'en maîtrise pas toutes les fonctions. Je serai moins efficace aujourd'hui avec cette méthode.
[Lis la question 9], au jour d'aujourd'hui, oui, parce qu'il y a 5 niveaux. Ça nous amène à nous poser énormément de questions et sur certains points de vue, vu que tout est à plat ça reste assez vague.
[Lis la question 10], alors là pas du tout. Non ce n'est pas facile au début à appréhender, on voit les rapports avec l'ingénierie système, on comprend comment ça fonctionne c'est assez simple. Après je pense qu'il y a certaines notions qui sont vraiment différentes de l'ingénierie système même si on peut raccorder. Il y a toujours des parallélismes, c'est quand même quelque chose qu'il faut apprendre à maîtriser.
[Lis la question 11], là je suis d'accord.
[Lis la question 12], pas trop, par rapport à ce que j'ai dit précédemment.
[Lis la question 13], là je trouve que oui, assez quand même.
[Lis la question 14], là je dirai légèrement, j'ai plus ou moins compris mais bon voilà, il y a encore des choses qui me manquent.
[Lis la question 15], oui assez. Dans tous les cas il amène à une grosse part de réflexion au début donc cela implique un effort mental c'est sûr. Cet effort mental est surement diminué par la suite, au début il est important.
[Lis la question 16], oui, assez. C'est pareil, c'est nouveau ça demande un effort d'adaptation. »

- **SUS :**

Participant : «
[Lis la question 1], au jour d'aujourd'hui pas forcément parce que : j'ai besoin de preuves.
[Lis la question 2], « inutilement complexe », je trouve ça assez fort, je n'ai pas forcément d'avis, je vais mettre neutre.
[Lis la question 3], je dirai plutôt oui mais quand on maîtrise certaines compétences. En tant qu'ingénieur système on fait ce raccordement, on arrive à comprendre le sens général, voilà sans avoir tous les détails.
[Lis la question 4], oui et non.
[Lis la question 5], là je ne suis pas trop d'accord. Je pense que ça s'apprend avec l'expérience.
[Lis la question 6], je mettrai 3 parce qu'en raccordant avec l'ingénierie système, on peut voir des choses notamment à un certain niveau de l'analyse du besoin qui amènerait peut-être des incohérences.
[Lis la question 7], oui, je dis oui pour les gens qui font partie de l'ingénierie système
[Lis la question 8], donc là je suis encore indécis là-dessus. La méthode est encore un peu lourde mais il faut appliquer. Je suis sûr que ça peut améliorer le quotidien.
[Lis la question 9], pas forcément, vu que c'était la première fois que j'utilisais l'analyse du domaine.
[Lis la question 10], non pas forcement. Il me manque encore certaines notions pour bien comprendre et pouvoir l'utiliser sereinement.
Dans l'ensemble, je pense qu'elle peut amener des réflexions qu'on n'a pas forcément en ingénierie système ou un niveau de granularité différent, donc ça peut apporter des choses bénéfiques je pense mais je dirai que pour l'instant au jour d'aujourd'hui avec ce que j'ai vu en deux heures c'est plus complémentaire qu'en remplacement de l'ingénierie système. »

Participant WDA-P2

1er enregistrement : échec / réussite aux exercices de modélisation

Par : on commence par le 1er. Au niveau des exigences, je pense en avoir trouvé pas mal au niveau fonctionnel, les contraintes aussi. Les facteurs humains, je ne connaissais pas mais j'ai su en mettre.

Exp : Donc tu penses avoir réussi globalement l'exercice ?

Par : Alors, je n'ai pas tout bien, à mon avis. J'ai pas tout analysé. Quand j'ai terminé globalement les exercices, j'ai essayé de revenir sur ce que j'avais fait.

Pour le 2è, pareil, j'ai fait 5-6 basis used cases (ce qu'on appelle used case principaux). Ensuite j'ai aussi regardé ce qu'il y avait dans ces basis used cases.

Exp : Donc globalement, tu as bien réussi ?

Par : Je n'ai pas mis les used cases exceptionnels, tout ce qui est dégradé, je n'ai que 2 acteurs, je pense qu'il y en a d'autres mais je ne l'ai pas fait. Mais oui j'ai réussi mais j'aurai pu en ajouter d'autres (comme l'agence de compagnie).

Exp : Pour le 3è exercice, est-ce que tu penses avoir réussi, terminé, répondu à la question ?

Par : Oui, j'ai fait 2 autres scénarios, en plus de l'exemple. En creusant un peu on pourrait en trouver d'autres aussi mais avec le temps imparti (par exemple : Comme obtenir un billet en hackant le site internet)

Pour le 4è, j'en ai trouvé 2-3 aussi.

Exp : Ta réponse te parait donc pertinente et correcte ?

Par : Ouais, ouais. Après je ne suis pas rentré dans le détail, ça demandait plus de réflexion. Par exemple, les vols sont complets, l'utilisateur peut voler le billet, ne pas passer le contrôle de sécurité.

2ème enregistrement : NASA-TLX

1ère question :

Exp : Peux-tu me justifier ta réponse pour cet item ?

Par : ça reste relativement simple, pas de calcul.

2ème question :

Par : ça ne demande pas beaucoup d'effort physique, si ce n'est écrire, mais bon… et transpirer aussi

3ème question :

Par : Au niveau temporel, c'est plus contraignant. Justement, un temps à respecter, les rappels de temps qui restait.

4ème question :

Par : Pour l'effort, que ce soit mentalement ou physiquement, c'est plutôt facile, quoi.

5ème question :

Par : Performance neutre, car moyennement satisfait de ce que j'ai fait. Avec plus de temps, j'auraii mis plus de détails, j'aurai fait plus de schémas aussi

6ème question :

Par : Plutôt neutre, ni tendu, ni détendu. C'est comme un petit exam.

3ème enregistrement : TAM

1ère question

Par : Peut-être légèrement. Je trouve que c'est très pratique, on peut facilement s'y référencer.

2ème question

Par : Voir ça (le WDA), ça m'a donné des idées donc légèrement. Notamment au niveau des scenarios fonctionnels, j'ai pu penser à certaines choses, comme l'agence de la compagnie car moi-même je ne passe pas par ce biais-là. Je dirais donc légèrement.

3ème question

Par : Là, je mettrai assez d'accord. C'est visuel, ça permet de gagner du temps. Pour acheter un billet d'avion, on voit directement les 3 possibilités sur l'analyse du domaine.

4ème question

Par : Je fais pas mal de scenarios. Au niveau fonctionnel, oui. Mais au niveau non fonctionnel, ça ne m'a pas apporté grand-chose.

5ème question

Par : Légèrement pas d'accord on va dire car ce qui est exceptionnel, on doit de toute façon l'imaginer. En cas d'échec, qu'est-ce qu'on fait ?

6ème question

Par : Légèrement.

7ème question

Par : ça rendrait mon travail plus facile un minimum. Je n'ai pas ressenti de facilité sur les tâches de conception. Par exemple, j'ai l'impression que ça force à ne pas trop penser à tout ce qui est comportement exceptionnel. On peut peut-être trop se baser là-dessus et ne pas voir les autres scenarios exceptionnels ou farfelus. Je mettrai au milieu, là.

8ème question

Par : ça peut m'être utile, oui. En termes de temps, ça donne rapidement un aspect visuel au système. Ça facilite pour voir les mots-clés. Un peu comme les systèmes d'ontologie en MBSE, c'est un peu similaire (ça permet d'avoir plusieurs vues d'un système, une combinaison de vues). Du coup, légèrement d'accord.

9ème question

Par : C'est pas super bien détaillé mais après, si on commence à détailler, il peut y avoir énormément de flèches, c'est pas le cas ici mais peut-être que pour les systèmes plus complexes, ça peut devenir très lourd, style plat de spaghettis. Du coup, ça fait neutre, au milieu. Ça dépend vraiment du système en question plus que de l'analyse du domaine.

10ème question

Par : Oui et non. J'ai principalement utilisé pour les scenarios fonctionnels, les 3è et 5è lignes. Après, c'est utile pour tout ce qui concerne l'humain, les contraintes, … L'utilisation est quand même assez facile. Ça dépend certainement du système. Après, ça s'apprend assez vite.

11ème question

Par : Je pense que je vais mettre légèrement parce que ça me donne des données en plus.

12ème question

Par : C'est pas toujours clair et compréhensible. Je suis pas sûr car je ne me suis pas servi des 2è et 4è lignes. Donc je mettrai au milieu.

13ème question

Par : Au milieu parce que pour les scenarios exceptionnels, faut les imaginer. Certes ça donne des idées mais bon…

14ème question

Par : non, c'est simple.

15ème question :

Par : Non pas du tout.

16ème question :

Par : Là, pas du tout. Il n'y a pas d'effort.

5ème enregistrement : SUS

1ère question

Par : Oui ça pourrait m'aider, en aide visuelle

2ème question

Par : Sur le cas présent, non ce n'est pas complexe. Mais je mets neutre par ce que si le système est complexe, l'analyse du domaine peut l'être.

3ème question

Par : Tout à fait d'accord.

4ème question

Par : Pour la 4è ligne, ça pourrait aider car je n'ai pas su l'utiliser.

5ème question

Par : 4 parce que j'ai pas utilisé toutes les fonctions, surtout la 4è ligne. Ce n'est pas des verbes et on n'a pas l'habitude pour les fonctions.

6ème question

Par : Il y a des incohérences, mais il s'agit d'habitudes. Le fait que ça ne soit pas formalisé, ça n'aide pas.

7ème question

Par : Moi j'aime bien tout ce qui est visuel et je pense que la plupart de mes collègues aussi, donc plutôt d'accord. Ça me permet de comprendre rapidement le visuel.

8ème question

Pas très lourd, non.

9ème question

Par : Je mets 4, parce que je suis confiant mais c'était ma 1ère utilisation.

10ème question

Par : Non, à part quelques éclaircissements sur la 4è ligne.

Participant WDA-P3

- **Echec/réussite :**

Expérimentateur : « Donc pour les 4 modélisations, est-ce que tu peux me dire, de façon rapide, si tu penses les avoir réussies ou du moins terminées. Et si tu veux ajouter des commentaires, ton ressenti personnel par rapport à la question. »

Participant : « Pour le premier exercice, non, j'ai pas l'impression d'avoir terminé. En fait, les exigences fonctionnelles, je pense les avoir toutes trouvées, mais j'arrive pas à faire, comment dire, à déterminer les exigences facteurs humains et contraintes, j'en ai terminé quelques-unes mais je suis pas sûre en tout cas. Je suis pas sûre-sûre on va dire. »

Expérimentateur : « Ensuite pour le second. »

Participant : « Le second un peu plus oui, le second un peu plus. Les « Use cases » je pense que je les aie toutes. J'ai essayé de les détailler au maximum, avec les « includes ». Cet exercice-là, je pense qu'il est complet.

Le troisième, je pense aussi, j'ai pas eu de difficultés, l'exemple a bien donné, du coup, la marche à suivre, pareil pour l'exercice 4, les scénarios dégradés, j'ai peut-être pas tout trouvé, mais j'en ai trouvé, 3 au moins, donc quelques-uns. »

Expérimentateur : « Est-ce que tu as un commentaire à ajouter sur l'ensemble des exercices ? Un ressenti ? »

Participant : « Un ressenti global ? Même vis-à-vis de ça ? (elle montre le support WDA) »

Expérimentateur : « Oui oui ! Surtout ! »

Participant : « Oui clairement, en fait je suis assez perturbée par la méthode de l'analyse du domaine. En fait, plus je regardais ce tableau-là, et plus j'étais perturbée, ben parce que c'est pas du tout la technique que j'ai l'habitude d'utiliser. Nous on est plutôt sur du Model Based System Engineering, et dans le MBSE on divise pas du tout en fait le système dans ces 5 couches là, et ouais, assez difficile du coup de faire le lien entre mon expérience, et cette méthode-là. Qui sont en fin de compte assez, comment dire, complémentaires mais pas similaires en fait dans le process. »

- **NASA TLX**

Participant : [Lis la question 1 – Relis la question 1]

Expérimentateur : « Ça porte vraiment sur l'exigence mentale en fait, est ce que tu penses que l'exigence mentale est faible ou forte, pour l'exercice que tu as réalisé. »

Participant : « Pour les 4 ? Pour le tout ? »

Expérimentateur : « Oui oui, et pour l'utilisation du WDA aussi. »

Participant : « Cette échelle-là, c'est en fonction de ce que je connais de plus complexe en exigences mentales ? »

Expérimentateur : « C'est comme tu le ressens. »

Participant : « Ok, euh… plutôt au milieu je dirais. Exigences physiques… pousser tirer… Ben là… Facile quoi, j'ai pas eu de… zéro, pas eu d'exigences physiques là-dessus.

Exigences temporelles [Lis la question 3] l'allure… Au niveau du temps, non je me suis sentie bien au niveau du temps, donc c'était plutôt, moyen je dirais, au milieu.

Alors ça continue, l'effort [lis la question 4] là c'était autre chose par contre, là c'était un petit plus difficile par rapport à d'habitude, du fait d'intégrer une nouvelle méthode en fait.

Performance, réussite, ah oui, alors la par contre, l'atteinte des buts fixés… J'espère qu'on aura les réponses parce que là je pense que je suis pas top ! Je suis pas très satisfaite. Vis-à-vis de la méthode en tout cas, qu'on a apprise, l'analyse du domaine, je sais pas si je suis très bien. On verra.

Frustration [Lis la question 6] je dirais, au trois quarts quand même. Assez fort quoi. C'est-à-dire qu'on est assez perturbés, et assez stressés, on sait pas trop par quoi commencer, ce tableau-là moi ça me parle pas du tout, j'ai pas l'habitude, voilà. C'est comme ça que je le ressens, en tout cas. »

- **TAM**

Participant : « [lis la question 1] Oui, euh… à chaque fois les tâches, par exemple les différents exercices que j'ai fait, est ce que ça m'a aidé… ça a améliorer la qualité ? Euh… »

Expérimentateur : « Après c'est vraiment du ressenti, du ressenti ou de la projection sur ce que tu peux faire toi dans ton boulot. Est-ce que ça pourrait t'aider ? Enfin comment tu le ressens. Je pense que c'est, et sur l'exercice, et sur ce que tu en penses toi. »

Participant : « D'accord, oui je dirais légèrement peut-être. Légèrement.

[Lis la question 2] Oui… Si si, ouais c'est possible.

[Lis la question 3] Productivité, moi je dirais pas du tout. »

Expérimentateur : « Pas du tout ? »

Participant : « Ouais, je pense qu'avec ou sans, ça serait la même chose en fait.

[Lis la question 4] Essentiels, je pense pas. Je pense que la méthode elle est pas assez factuelle en fait, pour prendre en charge les aspects essentiels des taches de conception. Donc moi je dirais… pas d'accord, plutôt assez.

[Lis la question 5] Oui, clairement. Je dirais extrêmement.

[Lis la question 6] L'efficacité, oui, potentiellement un petit peu je dirais.

[Lis la question 7] Facilité... euh... Si je connais bien la méthode quoi. Là j'ai encore un peu du mal. Donc je dirais, ouais, légèrement.

[Lis la question 8] Moi oui, je dirais oui. Quand même assez. Je passe à la suite.

[Lis la question 9] Ben un petit peu ouais, en fait. Du coup, assez.

[Lis la question 10] Un petit peu ouais, mais j'ai encore un peu de mal.

[Lis la question 11] Facile… En complément… En fait, je sais pas ce que ça pourrait donner. Pour l'instant c'est un petit peu, je débute on va dire. Facile, je dirais, ouais légèrement, je pense que c'est faisable mais, facile pas sûr.

[Lis la question 12] Non ben moi je dirais, légèrement pas, en fait.

[Lis la question 13] Souple, ça oui, ça c'est clair. Plutôt souple pour le coup.

[Lis la question 14] Ouais… Je trouve assez ouais. Donc légèrement.

[Lis la question 15] Effort mental, oui pour l'instant. Je pense assez.

[Lis la question 16] Non, moi je dis non parce que je pense que n'importe qui peut l'utiliser, enfin, on n'est pas forcément obligés de comprendre l'ingénierie des systèmes je pense pour utiliser l'analyse du domaine. C'est assez clair.

- **SUS :**

Participant : « [Lis la question 1] Euh non je dirais. Plutôt 2, parce que je connais d'autre méthodes, comme par exemple la MBSE, où je trouve ça plus factuel, plus carré, plus cartésien, et du coup je considère que tout l'environnement autour du système est balayé. Là, en tout cas j'ai pas l'impression, mais peut-être parce que j'ai pas le déroulé de comment ont été créées les 5 couches, pour un système en particulier. Donc je considère que, pas tous les jours, mais c'est possible que ça puisse apporter en tout cas, d'autres fonctions auxquelles on aurait pas pensé, d'autres scénarios dégradés, peut-être des composants physiques aussi, auxquels on aurait pas pensé voilà.

[Lis la question 2] Ouais, en fait les couches, 2, 3 et 4, sont, elles sont assez compliquées en fait, c'est-à-dire que la couche 1, moi je la comprends très bien, là, la couche 3 peut-être qu'on fait des sous-fonctions, je dirais, mais, ce sont des sous-fonctions qui sont aussi liées à, comment dire, à d'autres fonctions, « disposer de la carte d'embarquement » par exemple, elle est sur deux fonctions principales, euh… C'est vrai que ça complexifie, on est pas sur une architecture fonctionnelle basique avec le déroulé du Fonctional Breakdown Structure, et la quatrième couche qui vient apporter un supplément, encore des informations du coup, qui appellent du coup, les fonctions produites par la partie physique, nous, enfin moi, je mettrai directement du coup les items physiques à la suite, donc c'est vrai que ça fait un peu lourd en

fait de remettre au-dessus de la couche physique cette couche-là. Je trouve que c'est un petit peu complexe. Je mettrai, plutôt d'accord.

[Lis la question 3] Ouais ben du coup plutôt au milieu, je trouve que c'est compliqué bof quoi.

[Lis la question 4] Peut-être pas un expert, mais au moins quelques tests quoi avant de l'utiliser seul, tu vois. Au moins avoir de l'aide au départ. Sur 3-4 systèmes, et après je pense que ça peut être intéressant.

[Lis la question 5] C'est là que moi j'ai du mal. C'est aussi les termes, nous on utilise pas le mot « Fonction » si on n'a pas un verbe devant donc c'est pour ça aussi. Les termes « Orientation, proposition de vol » à moi, me parlent pas tellement. On fait pas des packages comme ça de fonctions physiques en fait, c'est spécial, c'est propre à cette méthode-là. Donc est-ce qu'ils ont bien été compris, oui pour la méthode, pour moi je ne sais pas. Donc je dirais, oui au milieu quoi.

[Lis la question 6] Non, moi je verrais pas d'incohérences, pas plus que ce que j'ai dit en tout cas. Donc 3 pareil.

[Lis la question 7] Oui, ça tout à fait d'accord oui.

[Lis la question 8] Oui plutôt ouais, plutôt 4 même.

[Lis la question 9] Non, plutôt pas du tout, plutôt 1 en fait.

[Lis la question 10] Non non, non pas du tout, c'est plutôt simple, même 1 en fait je dirais. Parce que comme je disais tout à l'heure, on n'est pas obligés d'être ingénieurs systèmes pour comprendre ça, je veux dire. Vous vous avez fait un master Ergonomie, je pense que vous comprenez parfaitement les liens, les tracés entre les différentes boites quoi. Donc voilà, je trouve ça plutôt simple.

Participant WDA-P4

- **Echec/réussite :**

Expérimentateur : « Donc on va passer à la suite, vous allez pouvoir me dire, de façon concise, si pour vous, l'exercice a été un échec ou une réussite et ce que vous en pensez. »

Participant : « Déjà, je ne les ai pas fait dans le même ordre parce que je n'aime pas trop écrire d'exigences en fait. Donc cette partie-là c'est quelque chose que j'appréhende moins bien et j'aime bien avoir un petit peu, une vision graphique. Après euh…. »

Expérimentateur : « Après faites par question si c'est possible »

Participant : « Sur la Q1, j'ai d'abord listé toutes les exigences fonctionnelles, tout ce qui est relié aux fonctions, et après j'ai essayé de caler sur ces exigences là, les différentes contraintes qui étaient dans l'énoncé, donc…fin après, ça manque d'être détaillé mais après je pense que

c'est plutôt relativement complet par rapport à l'attendu, mais bon il n'y avait pas de difficultés particulières. Après c'est toujours la problématique de l'exhaustivité de tout ce qui est fait par rapport à ce qui est écrit dans l'énoncé et ce qui est attendu. Après pour la partie cas d'utilisations, euh….pas de problèmes particuliers, euh….ouais non en fait, je n'ai pas eu de difficultés par rapport à ça. Non, je ne sais pas trop…. Après sur les scénarios, j'étais partie sur des scénarios assez, comment dire, j'avais fait des types de scénarios assez légers, après quand j'ai relu l'intitulé, fin l'exemple, j'ai re détaillé chaque scénarios de manière plus textuelle, plus… pas littéraire peut être pas, faut pas exagérer mais un peu plus habituelle pour une personne lambda. Et après pour la partie scénarios dégradés, moi je suis reparti des trois cas : sur internet, à la borne et au comptoir. A chaque fois je trouvais des choses similaires mais j'en ai rajouté après en-dessous, des dégradés que je n'avais pas forcément trouvé au-dessus, comme par exemple, il renverse son café sur la borne, des choses comme ça… voilà donc euh… mais à chaque fois que je faisais quelque chose sur un exercice je me disais qu'il fallait que je change quelque chose sur l'autre, d'où la correction. »

Expérimentateur : « Oui bien sûr vous aviez le droit ! Donc en général c'est plutôt réussi ? »

Participant : « Ça va, ça ne m'a pas posé de problèmes particuliers. Après c'est…enfin, moi je l'ai fait avec ce que je connais, je n'ai pas forcément fait de liens avec ce qu'on vient de voir, je n'ai pas re dispatché les différents éléments donc je ne sais pas si…. »

Expérimentateur : « oui, c'est justement ce qu'on veut voir si vous l'intégrez ou pas, donc il n'y a pas de problèmes ! »

Participant : « Ah ok, après il y a quand même un lourd passif derrière, ça fait quand même plusieurs années voire plus d'une décennie que je fais des choses comme ça, avec cette méthode là et ce formalisme-là. Se transférer dans un autre référentiel ce n'est pas simple. Après on retrouve quand même à peu près les même choses, on va dire, mais effectivement comme disait ma collègue, c'est que ce qui est appelé ici fonctions abstraites, on aurait plutôt tendance à appeler ça critères ou valeurs, en terme de fonctions c'est un peu limite. Donc voilà sinon pas de difficultés particulières mais je ne pense pas avoir intégré de choses particulières de ce qu'on a vu ici. »

NASA-TLX :

Participant : « Alors, pour exigence mentale, j'ai mis quelque chose d'assez modéré. C'est relativement simple enfin, c'est plutôt du côté simple car il n'y avait pas d'exigence particulière du point de vue intellectuel. Au niveau physique, j'ai quand même mis deux, parce qu'il fallait tenir un stylo et puis il a fait chaud quand même ! Au niveau du temps euh, ça correspondait au temps que j'ai pris donc il n'y a pas eu de pression, j'ai mis moyen. Donc l'effort, euh….il y avait un peu d'effort enfin il y avait de l'effort mais ça va c'était pas…c'est plus faible que moyen… [rire]. La performance ça me paraît plutôt pas mal, après c'est juste la partie…qui mériterait d'être plus détaillée. Et frustration, j'ai hésité entre le 1 et … après c'est juste le fait d'avoir fait l'exercice rapidement, c'est un exercice en temps limité, donc des fois ça mériterait de revenir dessus, mais frustration assez faible quand même. »

- **TAM :**

Participant : « [Lis question 1], euh, je pense légèrement d'accord parce que ça permet d'apporter une autre vue, en IS on a déjà un certain nombre de vue, là cela rajoute une vue supplémentaire qui va certainement bien compléter ce qu'on a déjà. Après j'ai mis légèrement, car les concepts, même s'ils ont des noms différents on les retrouve à peu près, comme ça a été dit dans la formation, donc je ne suis pas sûr comme ça qu'il y ait beaucoup de choses en plus. »

Expérimentateur : « D'accord. »

Participant : « [Lis question 2], pour moi ça va avec donc ce serait la même réponse. [Lis question 3], la productivité je ne pense pas, la qualité peut-être mais la productivité je ne pense pas, donc on va dire assez pas d'accord. [Lis question 4], non, non parce que comme je disais, on retrouve déjà pas mal de choses qu'on connaît donc ça viendrait compléter mais ça ne prendrait pas en charge. [Lis question 5], là je ne pense pas, comme ça, je n'ai pas vu d'aspects…alors si peut-être plus des éléments physiques, d'ergonomie qu'on ne rencontre pas effectivement, oui, c'est ça en poussant l'exercice un peu plus loin que je ne l'ai fait là effectivement oui, oups ! Mais bon faudrait tester… [Lis question 6], après la productivité c'est l'efficacité [rire], oui vu que ça augmente la qualité ça augmente l'efficacité. [Lis question 7], oui légèrement je pense. [Lis question 8], du même acabit, légèrement d'accord. [Lis question 9], non, extrêmement pas d'accord. [Lis question 10], assez d'accord. [Lis question 11], pas d'accord, c'est la contrepartie de la question de tout à l'heure…ah non c'est l'inverse donc oui assez d'accord. [Lis question 12], alors là par rapport à ce qu'on a vu c'est peut-être un peu léger sur une formation d'une demi-heure. »

Expérimentateur : « Oui donc par rapport à ce que nous on vous a montré ? »

Participant : « Oui, ce n'est pas simple, donc assez pas d'accord. [Lis question 13], euh ça je ne sais pas, donc je vais mettre pas du tout. [Lis question 14], ben là sur le peu de pratique, on va dire assez pas d'accord, car c'est un peu court pour moi. [Lis question 15], assez pas d'accord. [Lis question 16], un effort important je ne pense pas mais de la pratique oui, donc on va dire assez pas d'accord. »

- **SUS :**

Participant : « Ah oui, il y en a un paquet ! [Lis question 1], pas du tout d'accord mais pas forcément, donc ça sera un 2. [Lis question 2], non, je ne suis pas du tout d'accord. [Lis question 3], presque tout à fait d'accord, car il faut un peu de pratique. [Lis question 4], euh non. [Lis question 5], par moi ? Ou par quelqu'un d'autre ?! »

Expérimentateur : « Par vous ! »

Participant : « J'ai mis un peu de temps à comprendre, on va dire 3. [Lis question 6], non, à part le nom de la fonction abstraite sinon non. [Lis question 7], oui tout à fait d'accord. [Lis question 8], euh il y en avait pas une pareille déjà ?! »

Expérimentateur : « Si dans l'autre questionnaire ! »

Participant : « Pas du tout d'accord. [Lis question 9], dans la mesure où je ne m'en suis pas servi c'est un peu compliqué…on va mettre 3. [Lis question 10], non je ne pense pas. »

Participant WDA-P5

Echec/réussite :

Mod 1 :

Par : Vu le niveau demandé avec la granularité des exigences. Après c'est des choses sur lesquelles on peut aller beaucoup plus loin. Après je ne sais pas si je l'ai bien fait mais en gros j'ai réécrit le contexte sous forme d'exigences

Mod 2 :

Par : Là je pense que oui, j'ai réécrit le contexte sous forme de use cases enfin pareil. Le système peut être assez complexe et on peut toujours creuser un peu plus les choses. Il me semble qu'on pourrait rajouter des cases et des liens entre ces différentes cases. Il me manque des informations mais avec la formation que l'on a, on a les éléments pour nous aider.

Mod 3 :

Par : Là je me suis vraiment servi du WDA parce qu'effectivement pour décrire les scénarios c'est vraiment plus pratique sous une architecture de ce type. J'ai décrit en scénario nominal comment on embarquait dans un avion.

Mod 4 :

Par : J'ai regardé sur mon scénario nominal en regardant chaque étape et en réfléchissant sur les choses qui pourraient arrivées.

Nasa-TLX :

Exigence mentale :

Exp : Tu as mis « moyenne »

Par : Parce que ça va quoi, on a l'habitude de faire ce genre de choses du coup cela ne pose pas de problèmes spécifiques

Physique

Par : ce n'est pas comme si on courrait le marathon

Temporelle

Par : j'ai essayé de tenir le rythme, j'ai fini plus tôt et je faisais pas du tout attention.

Effort

Par : L'effort normal, je ne vois pas trop ce que cela peut représenter

Performance

Par : Je pense que ce n'était pas trop mal, on peut toujours mieux faire ce genre d'exo. Là c'était assez libre alors que dans notre métier on est souvent guidé des exigences ou des spécifications clients. Là c'est juste retranscrire donc ça reste assez vague finalement

Frustration

Par : Non je n'ai pas ressenti de sentiment négatif durant ces différents exercices.

TAM :

Q1

Par : « Lecture question » Mouii…

Exp : C'est un petit oui ça. (Pas de réponse).

Q2

Par : « Lecture question » Légèrement.

Q3

Par : « Lecture question » « bruits avec la bouche » Oui.

Q4

Par : Non pas vraiment.

Q5

Par : Non plus.

Q6

Par : Assez pas d'accord car au final en diagramme de cas d'utilisation on le couvre. Après effectivement ça rajoute une dimension physique qui est là. Normalement quand on fait les méthodologies de cas d'utilisations on ne pense pas à la dimension physique.

Q7

Par : Oui ça pourrait. Dans ce cas-là, le scénario je l'ai fait assez rapidement vu qu'il était en « input » le diagramme c'était facile mais en temps normal il faut le faire le diagramme.

Q8

Par : Oui

Exp En quoi il faciliterait du coup ?

Par : Parce que la lecture est facile, c'est transparent, on voit les nœuds. Là où ça bloque plus facilement que si on modélisait. Il y a une meilleure représentation des dépendances entre les soucis physiques et opérationnels et ben montre contrairement à d'habitude.

Exp : Vous fonctionnez avec quoi normalement ?

Par : On utilise les « use cases » on les détaille en scénario avec de l'activité ou des séquences ensuite on fait du statique ou du dynamique au niveau fonctionnel puis on trace sur de l'architecture physique pour que ça reste dynamique. Il y a plusieurs niveaux, diagrammes et modèle même donc du coup le lien à part si la traçabilité est bien faite et même encore, le lien n'est pas visible au premier coup d'œil comme ici sur ce modèle, comme par exemple on sait que la borne automatique est liée à la dépose de la carte d'embarquement. Donc c'est un bon truc de traçabilité.

Q9

Par : Oui ça rejoint la question précédente

Q10

Par : Non non

Q11

Par : Oui je trouve ça facile mais une fois le diagramme fait !

Q12

Par : Oui

Q13

Par : Oui

Q14

Par : ça je sais pas on verra

Exp : Comment ça ?

Par : Bah je sais pas

Q15

Par : Non

Exp : C'est pas un effort mental trop important parce que les informations sont données ?

Par : Oui c'est ça à la lecture c'est facile.

Q16

Par : Non

SUS :

Exp : Dernier questionnaire : le test SUS qui concerne l'utilisabilité du modèle WDA dans ton contexte de travail.

Q1

Par : Oui plutôt d'accord avec sa facilité de lecture, j'y vois un réel intérêt dans la traçabilité, après il faut le faire quoi. C'est pas plus compliqué que le reste c'est juste une vue différente de ce qui existe déjà.

Q2

Par : Non il n'est pas complexe du tout et plutôt assez clair.

Q3

Par : Oui c'est très limpide.

Q4

Par : Pas vraiment besoin d'un expert.

Q5

Par : Je mets moyen parce que j'ai vraiment un souci avec les critères.

Exp : C'est le terme critère qui te pose problème ?

Par : En fait c'est le niveau et son critère.

Exp : Pour toi il se situerait où alors ?

Par : Je le mettrais plutôt à coté sur chaque fonction généralisée, il y aurait une part d'abstrait.

Q6

Par : Mais non quelle incohérence il pourrait y avoir.

Q7

Par : Oui étant donné notre niveau de qualification.

Q8

Par : Non justement elle est très facile à utiliser.

Q9

Par : Oui sa facilité m'a rendu à l'aise avec son utilisation.

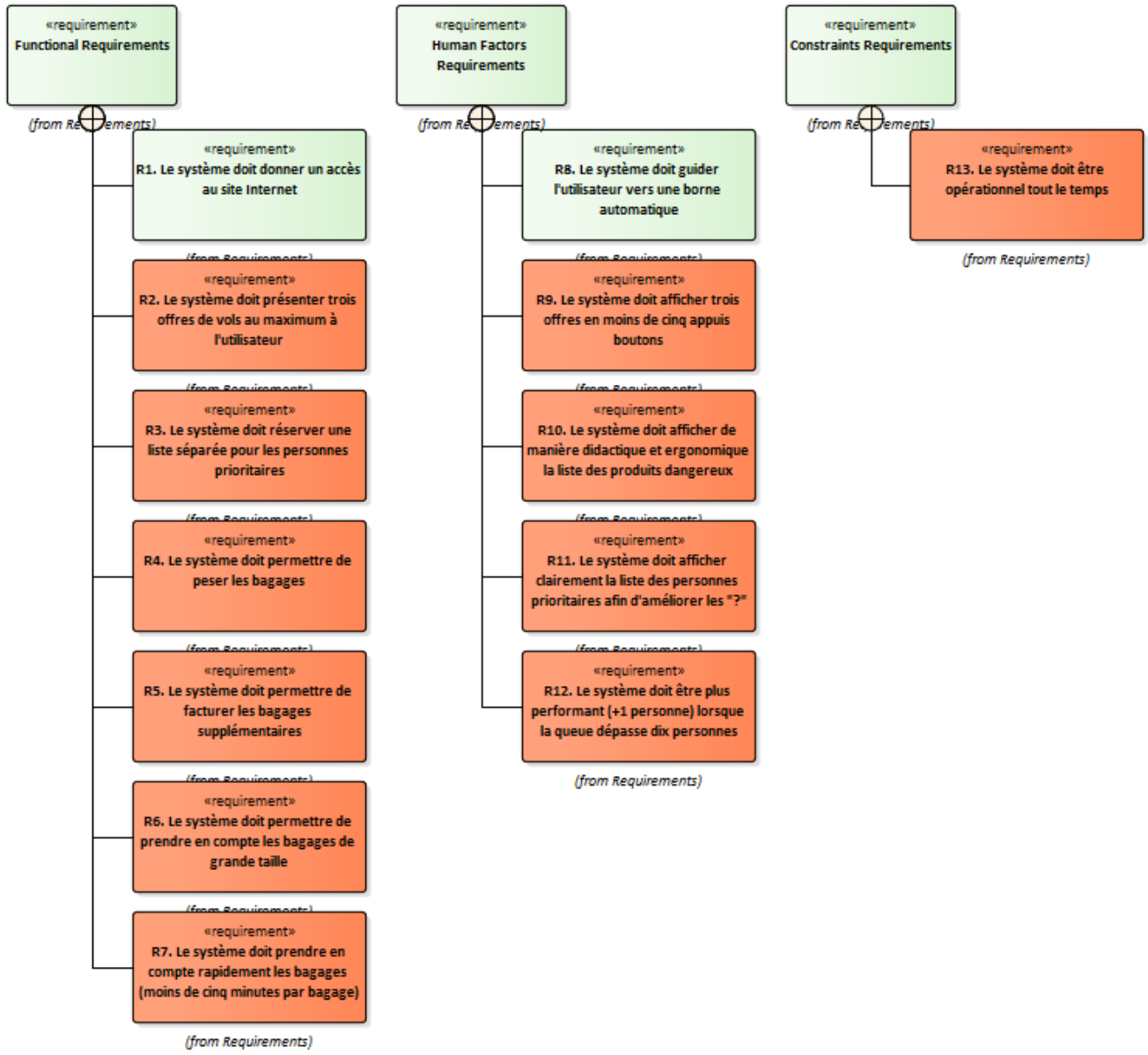
Q10

Par : Non je trouve ça super facile à la lecture, le seul problème pourrait consister à concevoir le diagramme.

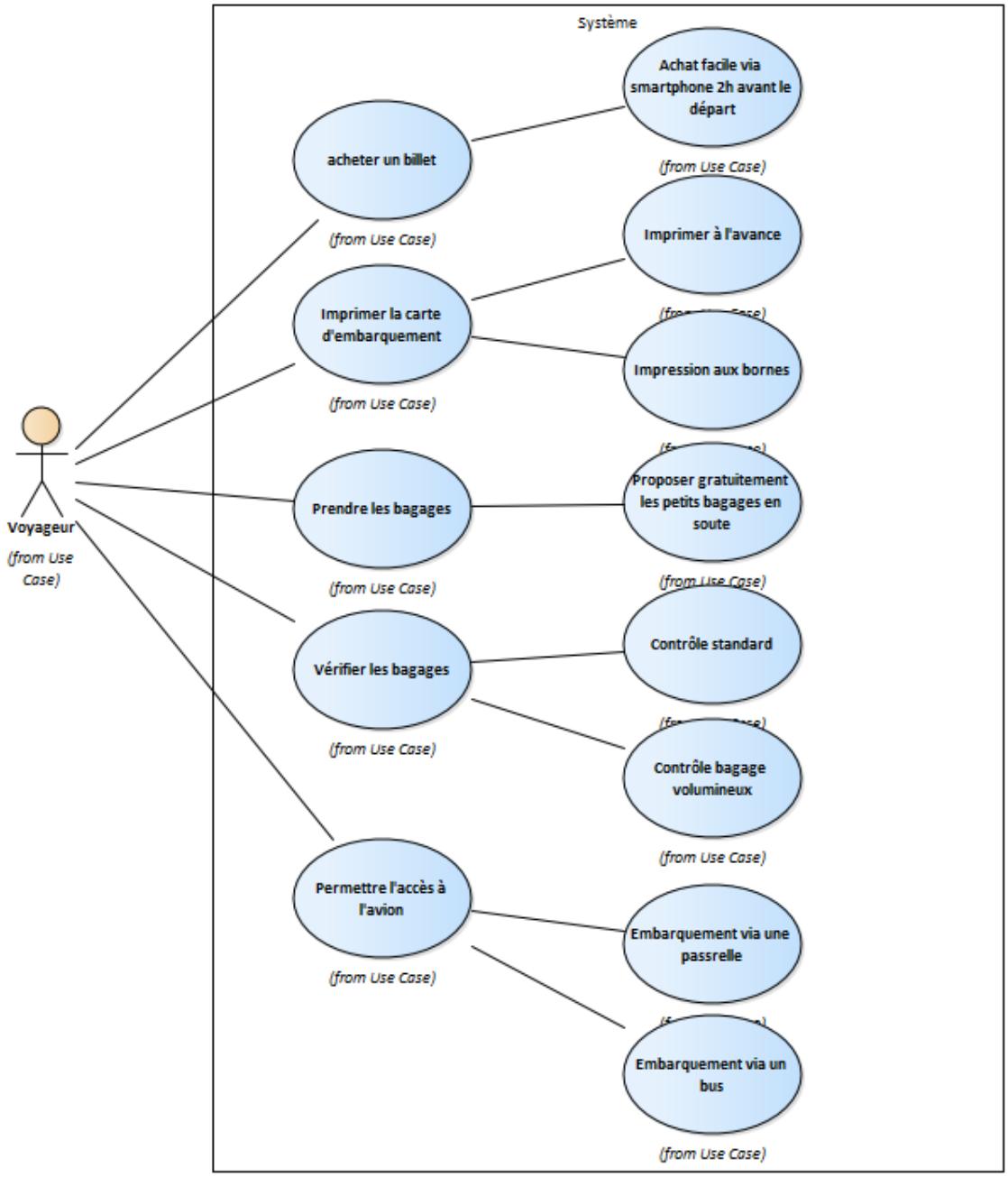
V.1.13. Modèles produits

Participant HTA-P1

Exigences HTA-P1



Cas d’utilisation HTA-P1



Scénarios HTA-P1

Scénarios nominaux d'achat de billet

#1 - Le voyageur achète son billet directement à une borne automatique, il connaît les horaires et sa destination. Objectif -> lui permettre d'acheter rapidement son billet

#2 - Le voyageur achète son billet à une agence, il connait à peu prêt sa destination et son horaire. Objectif -> lui permettre d'obtenir un billet et bien le conseiller pour qu'il revienne satisfait du service

#3 - Achat de billet sur un PC

#4 - Achat de billet via application smartphone en accès wifi

#5 - Achat de billet en espèces et chèques

Scénarios dégradés d'achat de billet

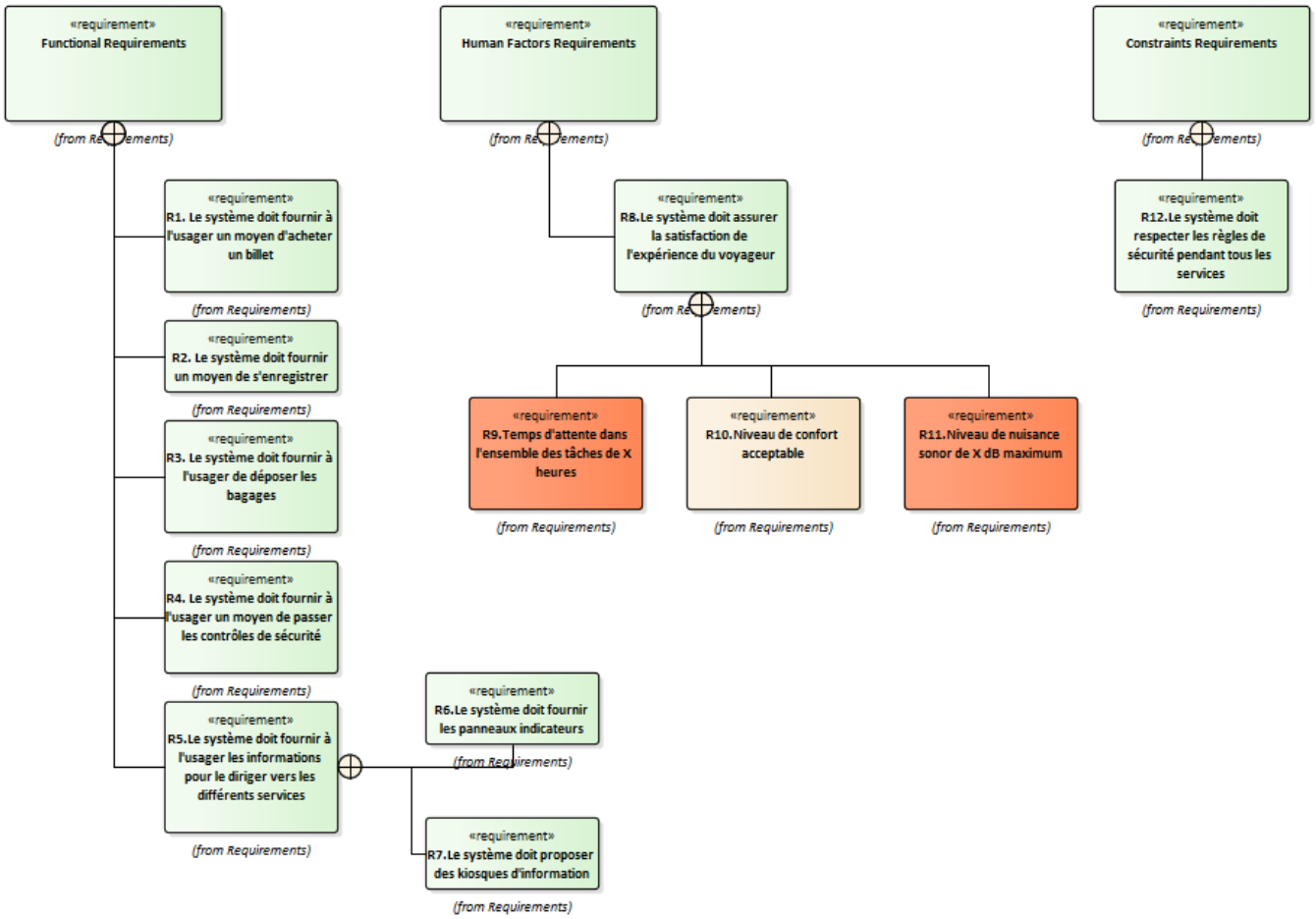
#1 - Le voyageur trouve une borne automatique immédiatement et achète son billet rapidement

#2 - Le voyageur arrive à la borne et trouve encore une longue queue, il ne sait pas quelle destination choisir. Une personne de l'aéroport dédiée à résorber ce problème l'aiguille vers d'autres bornes libres à cinq minutes à pied

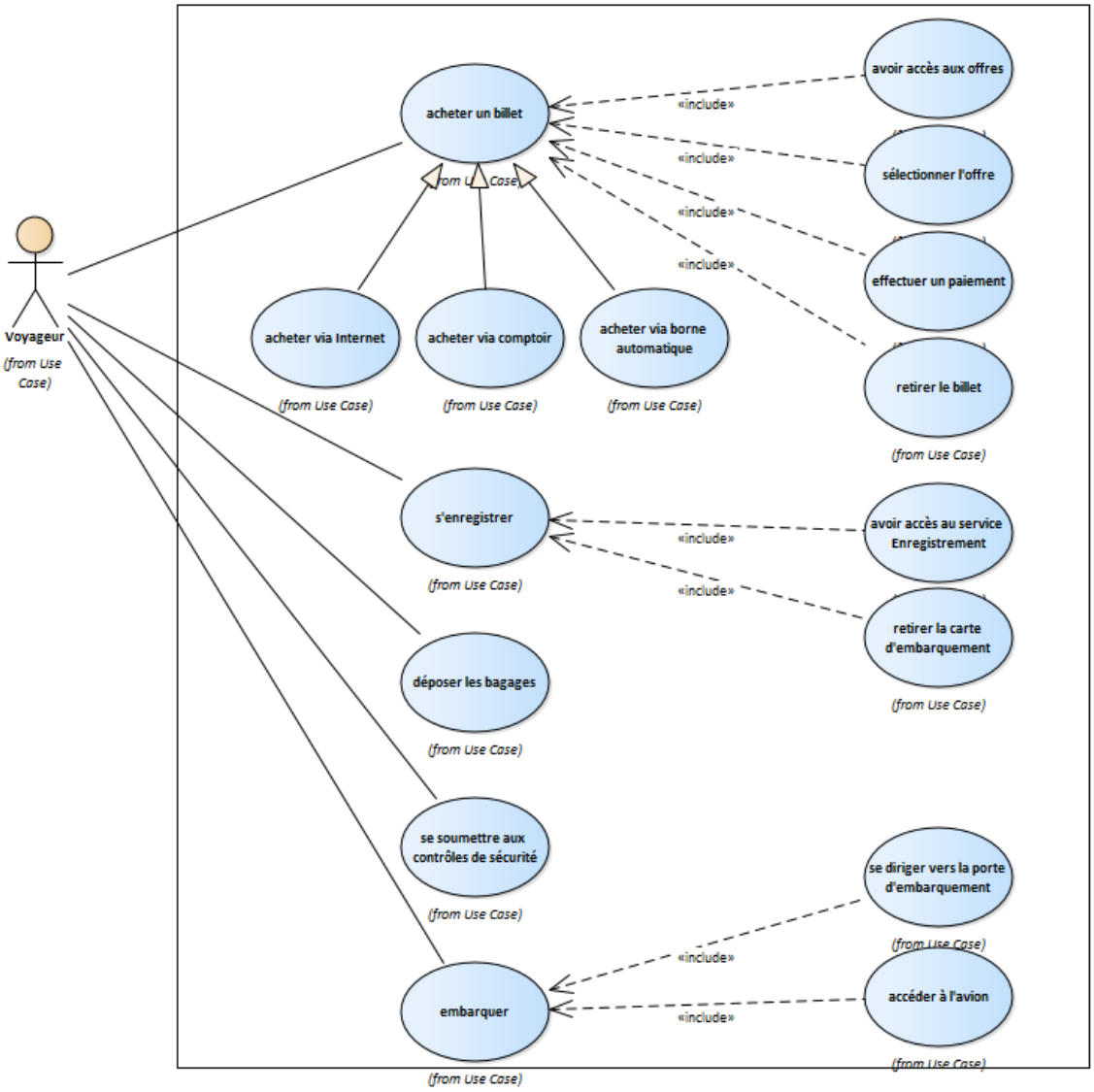
#3 - Le voyageur arrive à la borne qui ne fonctionne pas, une personne de l'aéroport l'aiguille vers une zone internet où il achète son billet en ligne via le smartphone et peut ainsi embarquer rapidement

Participant HTA-P2

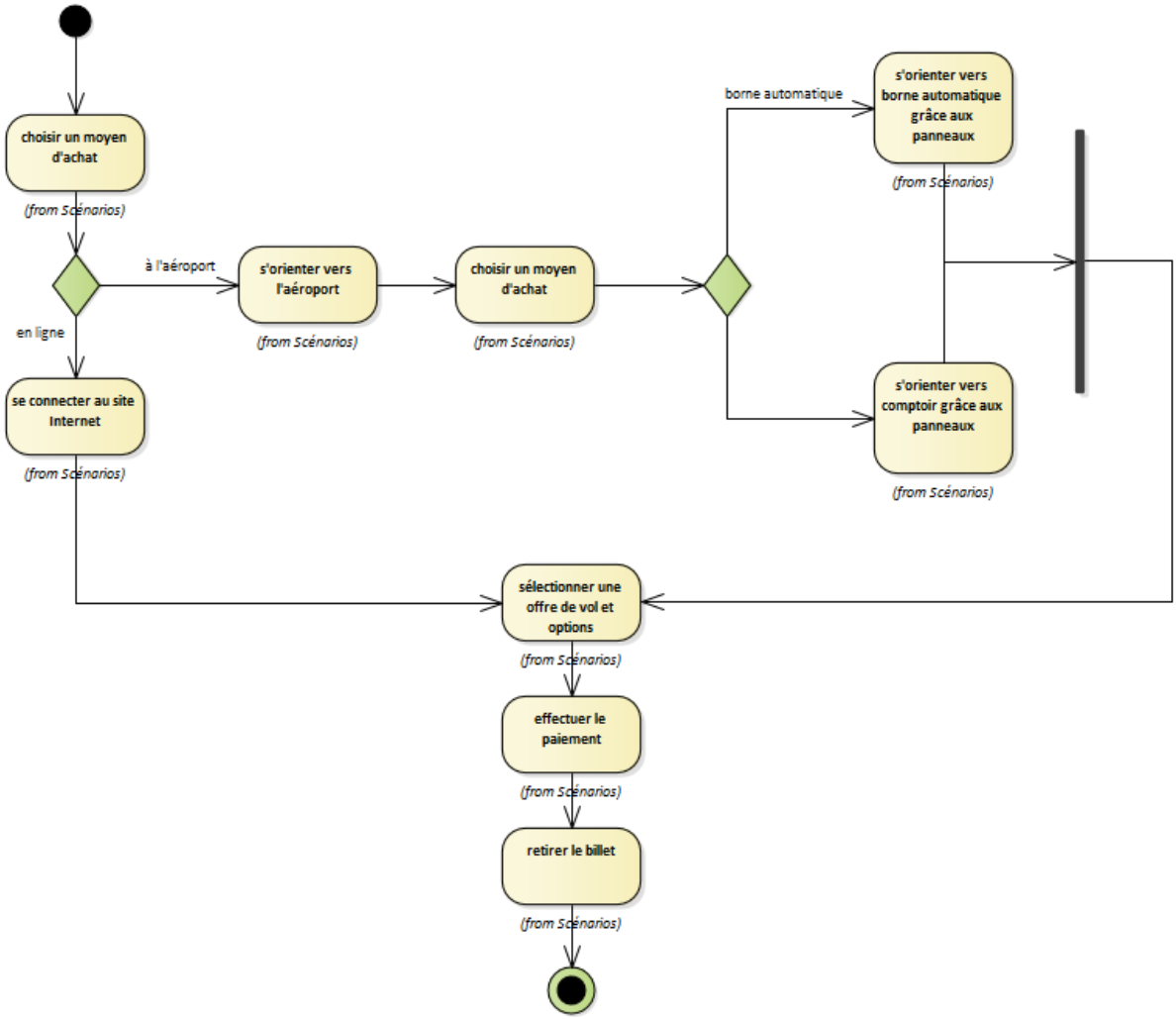
Exigences HTA-P2



Cas d'utilisation HTA-P2



Scénarios HTA-P2



Scénarios dégradés HTA-P2

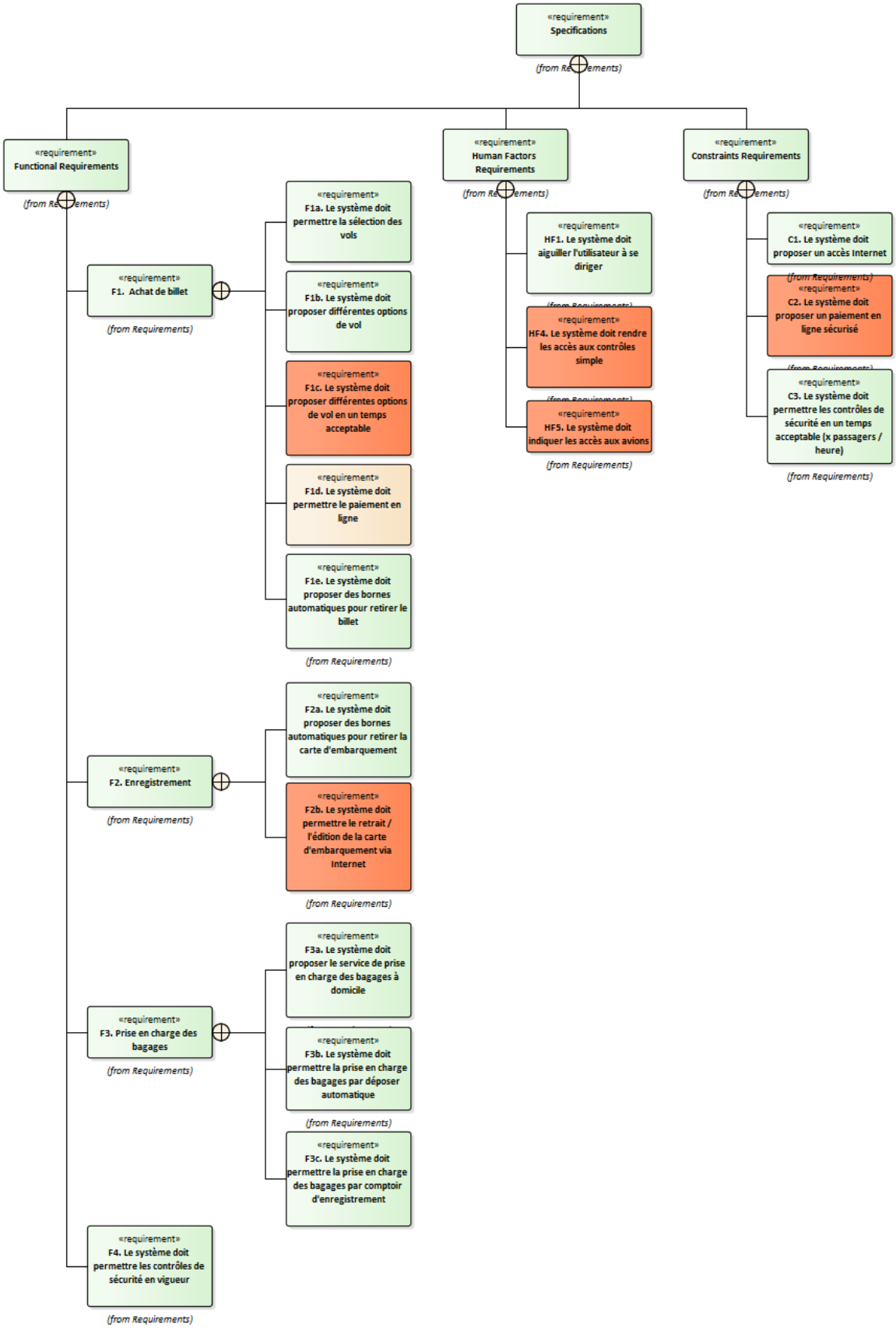
Scénarios dégradés

1/ L'utilisateur souhaite acheter son billet à la borne automatique ou comptoir. Cependant, il ne retrouve pas les services dans l'aéroport. Il décide de demander à quelqu'un au kiosque ou via son téléphone

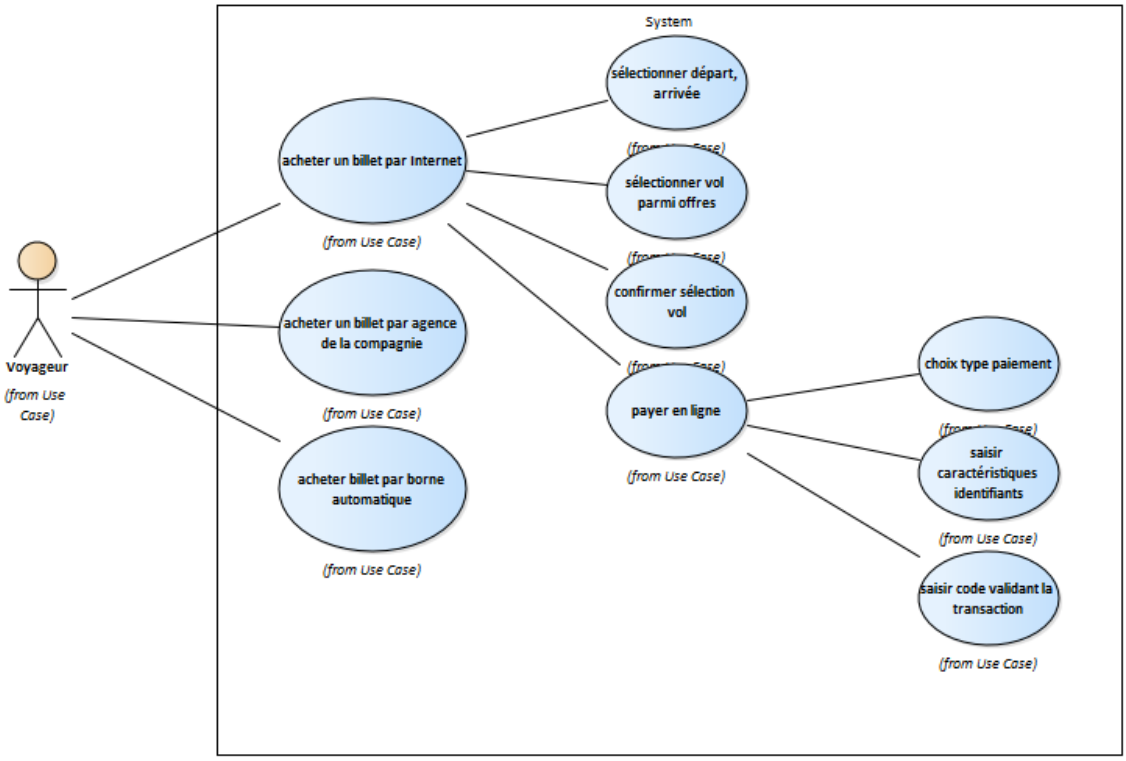
2/ L'utilisateur n'arrive pas à régler son achat, il peut réessayer avec un autre moyen de paiement

Participant HTA-P3

Exigences HTA-P3

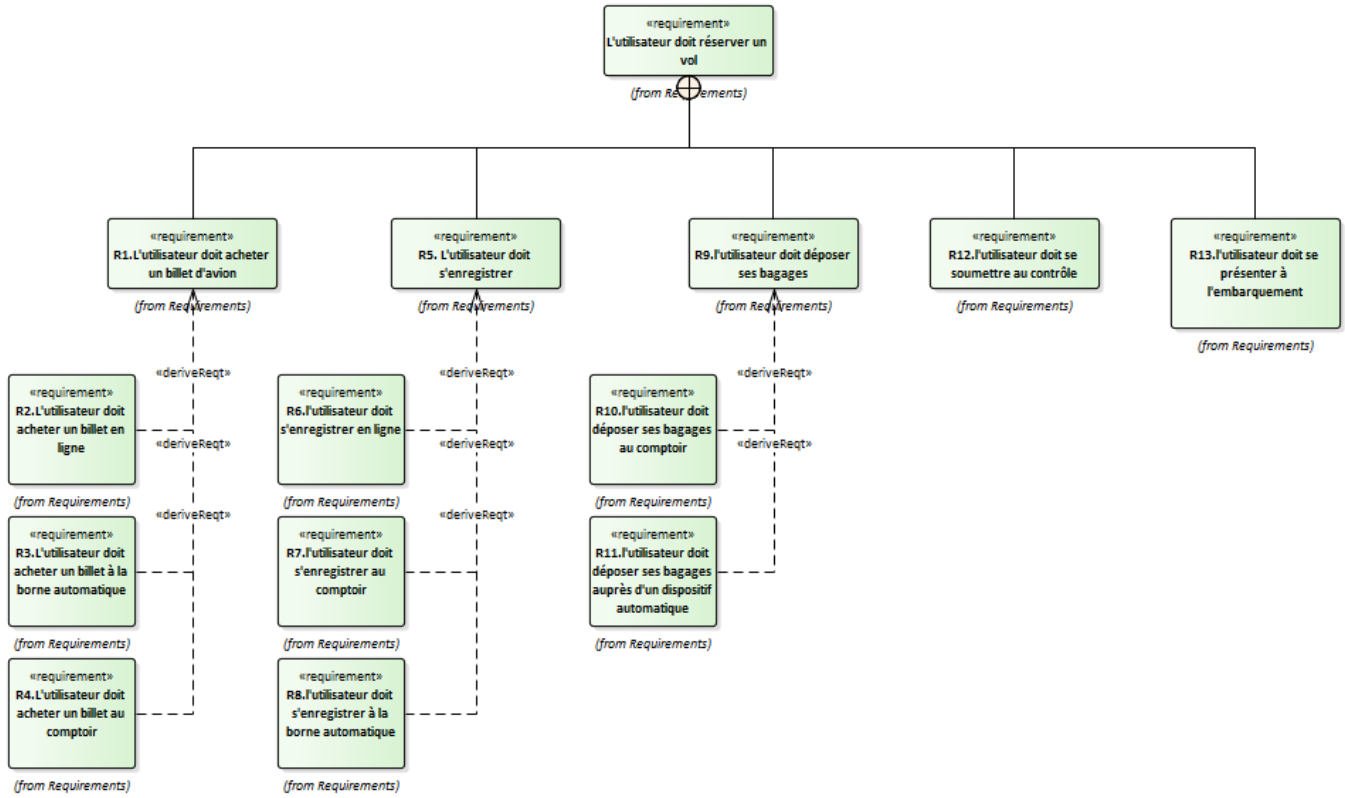


Cas d’utilisation HTA-P3

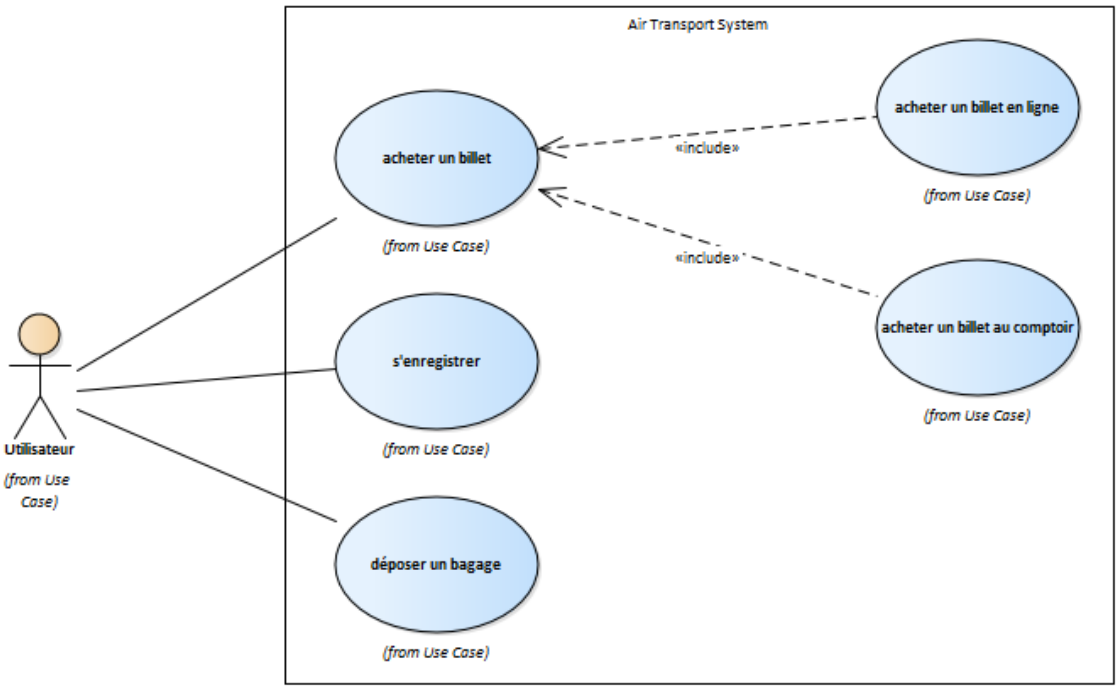


Participant HTA-P4

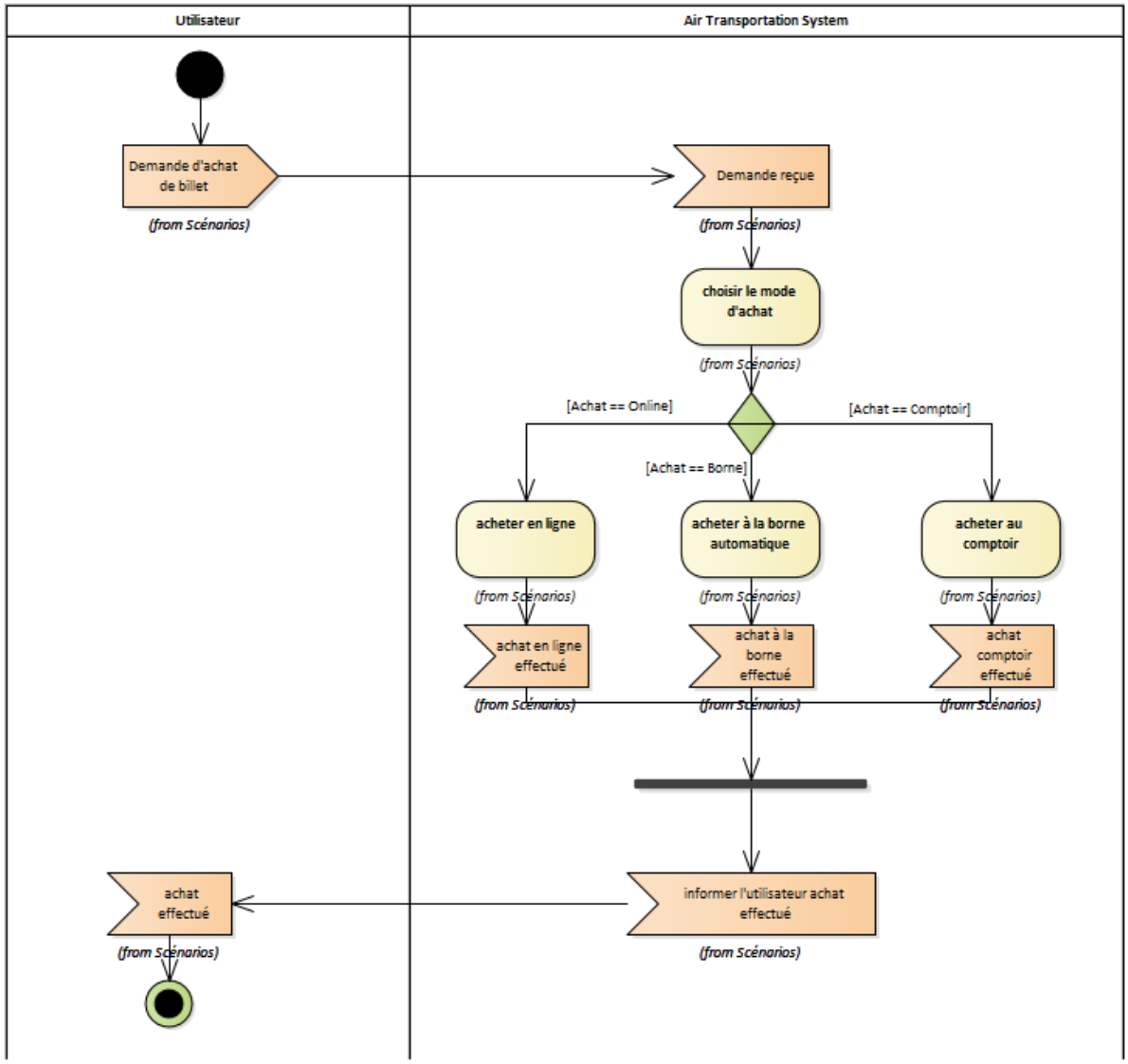
Exigences HTA-P4



Cas d'utilisation HTA-P4

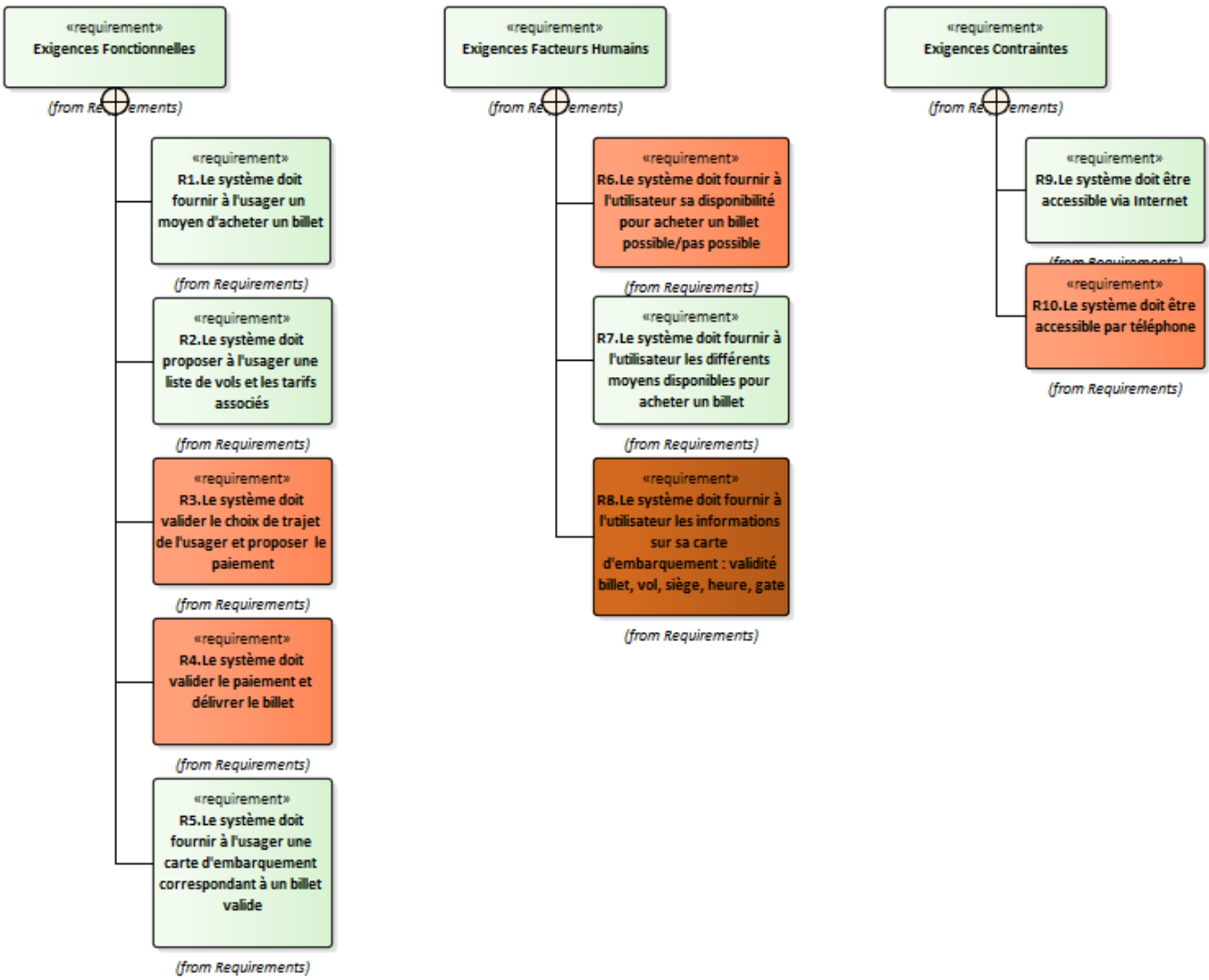


Scénarios HTA-P4

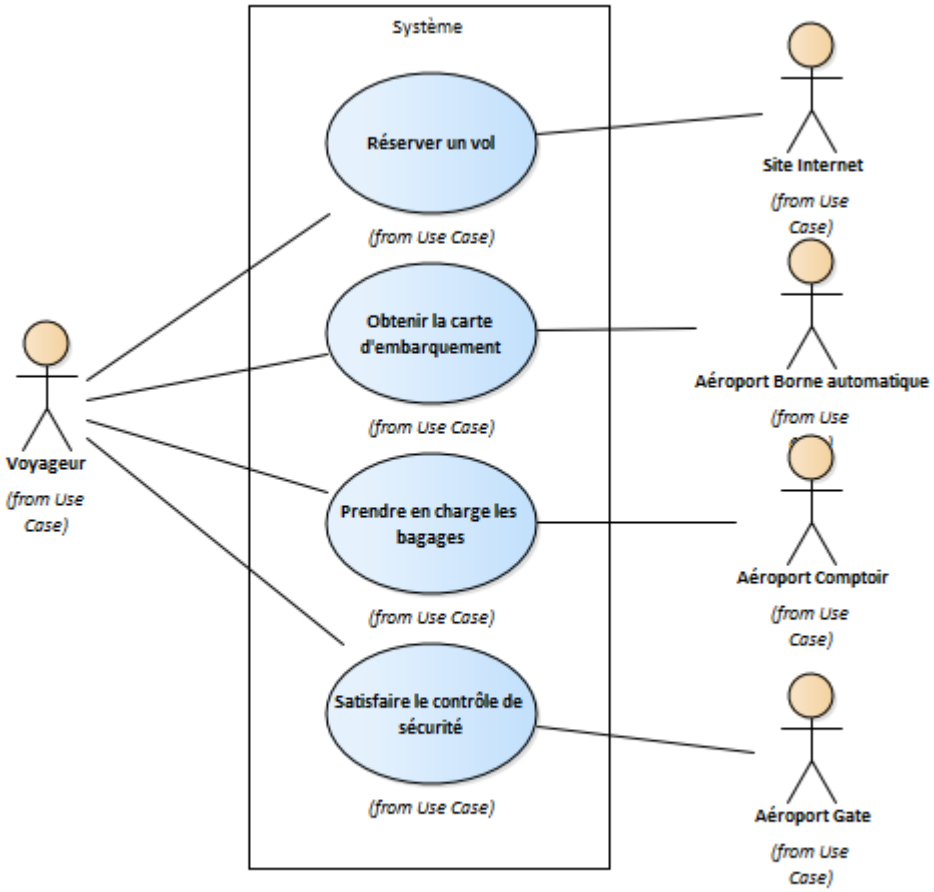


Participant HTA-P5

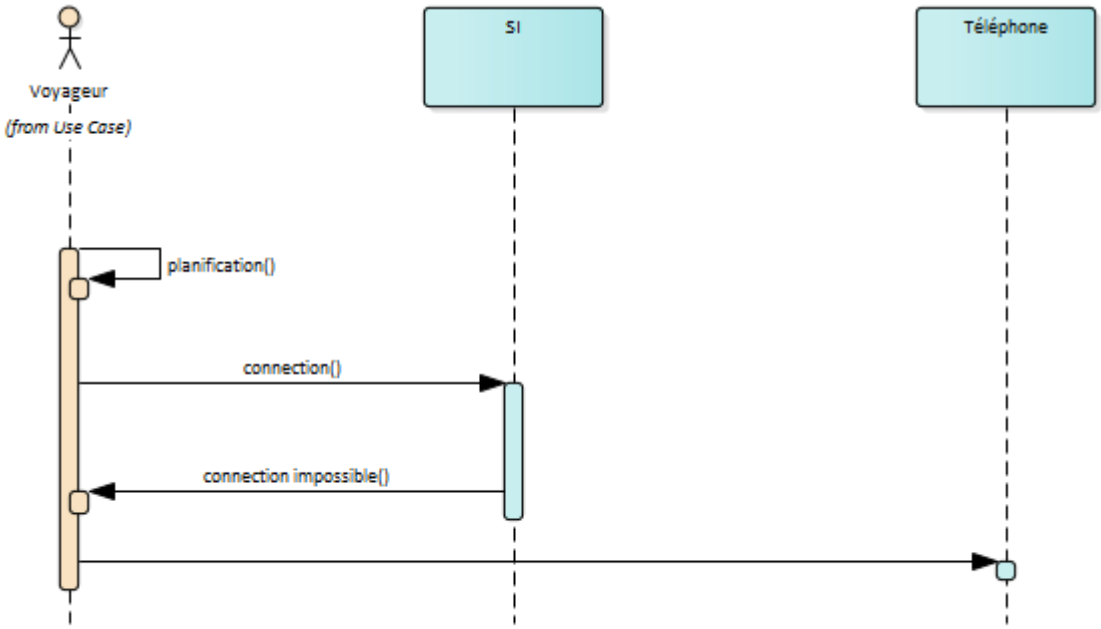
Exigences HTA-P5

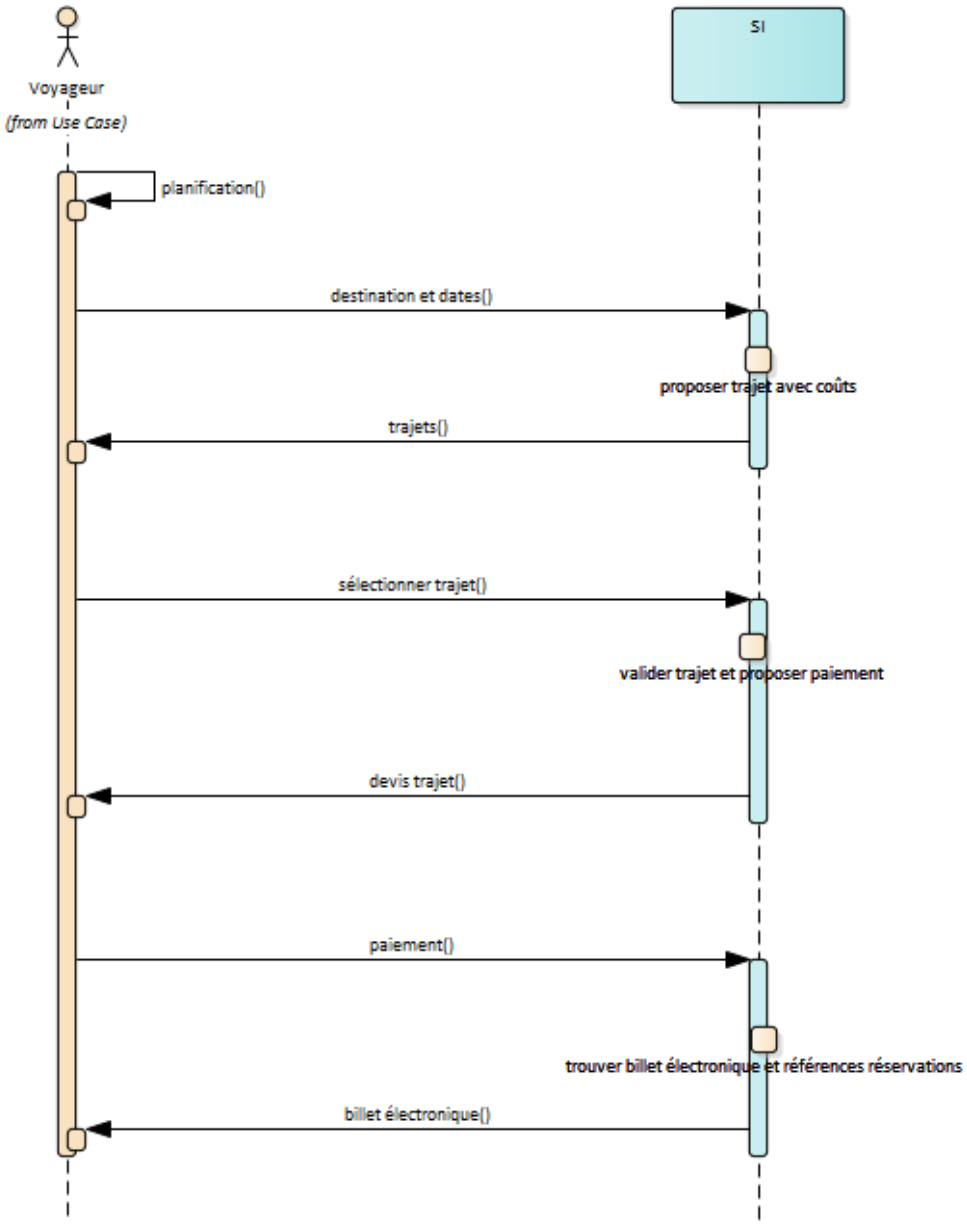


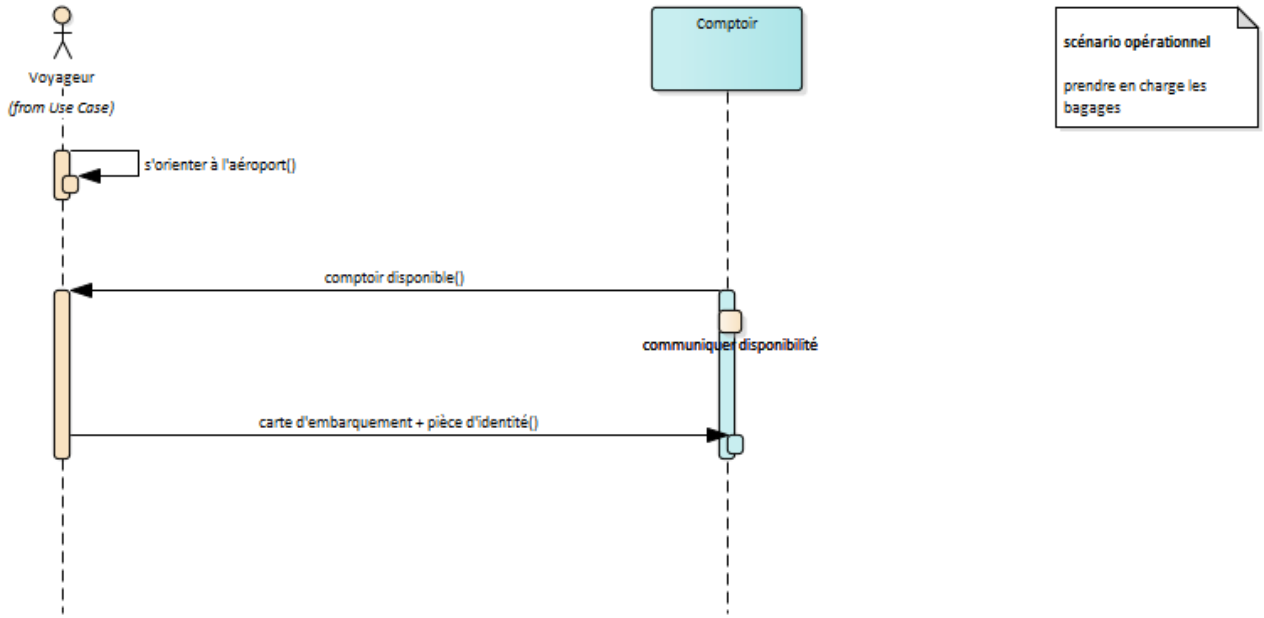
Cas d'utilisation HTA-P5

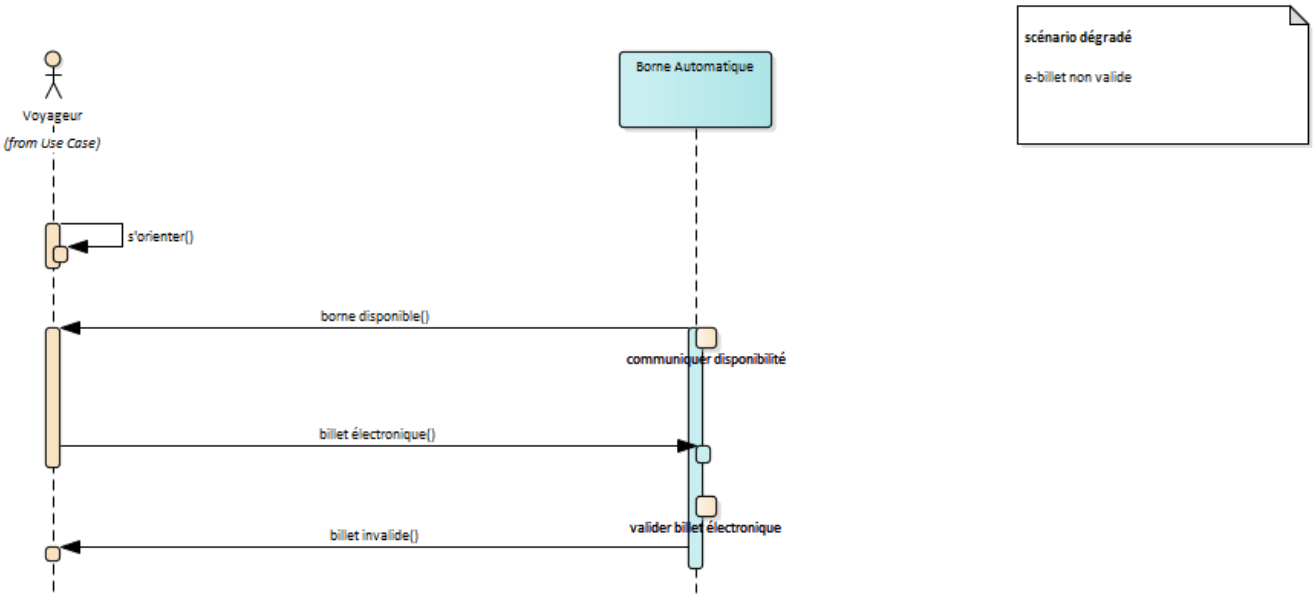


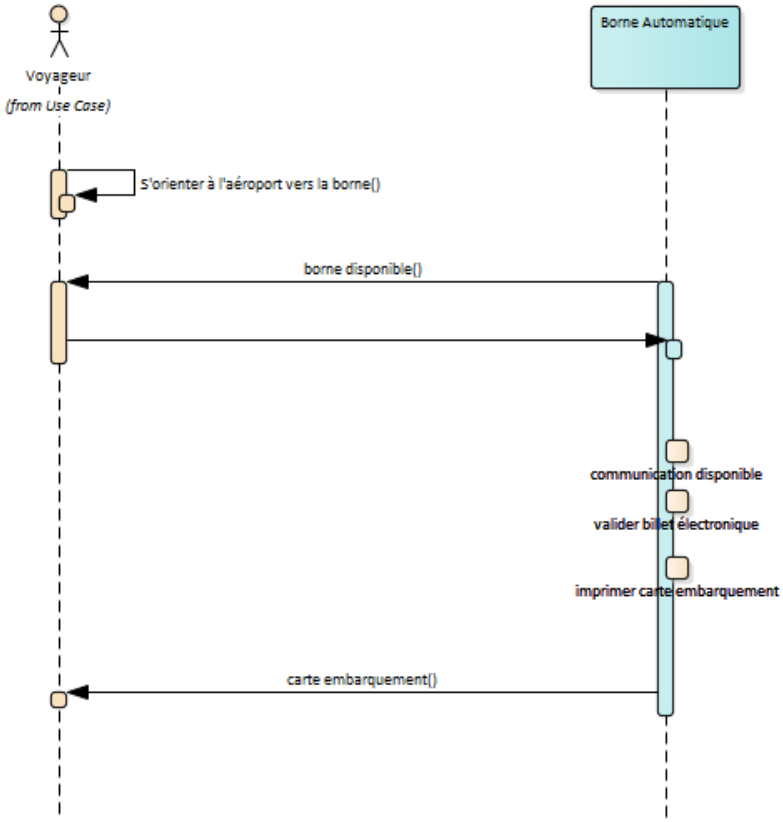
Scénarios HTA-P5




Voyageur
(from Use Case)
SI
planification()
destination et dates()
proposer trajet avec coûts
trajets()
sélectionner trajet()
valider trajet et proposer paiement
devis trajet()
paiement()
trouver billet électronique et références réservations
billet électronique()


Voyageur
(from Use Case)
Comptoir
scénario opérationnel
prendre en charge les bagages
s'orienter à l'aéroport()
comptoir disponible()
communiquer disponibilité
carte d'embarquement + pièce d'identité()


Voyageur
(from Use Case)
Borne Automatique
scénario dégradé
e-billet non valide
s'orienter()
borne disponible()
communiquer disponibilité
billet électronique()
valider billet électronique
billet invalide()

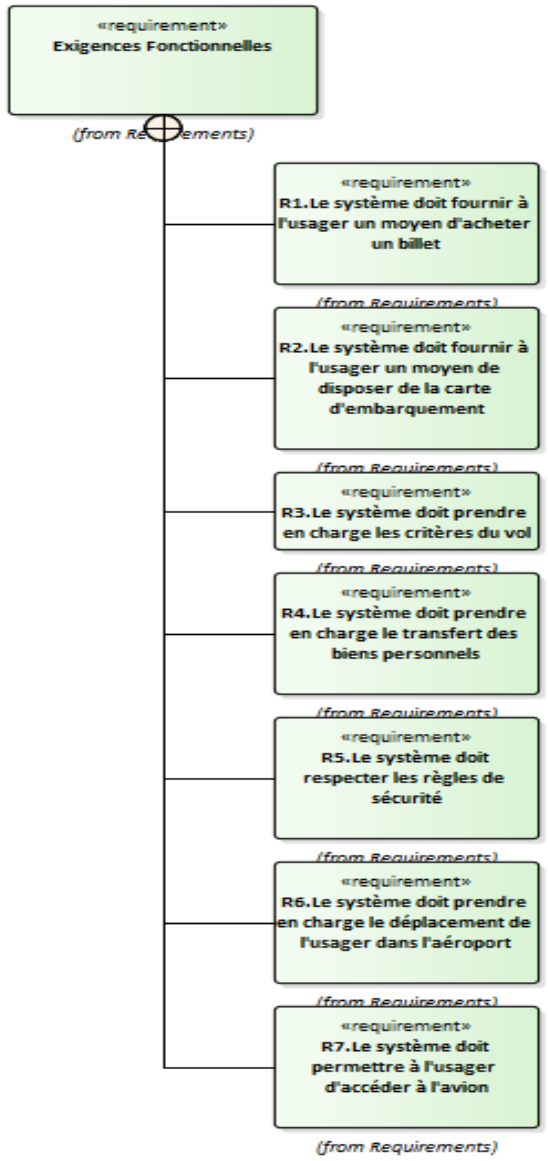


scénario opérationnel

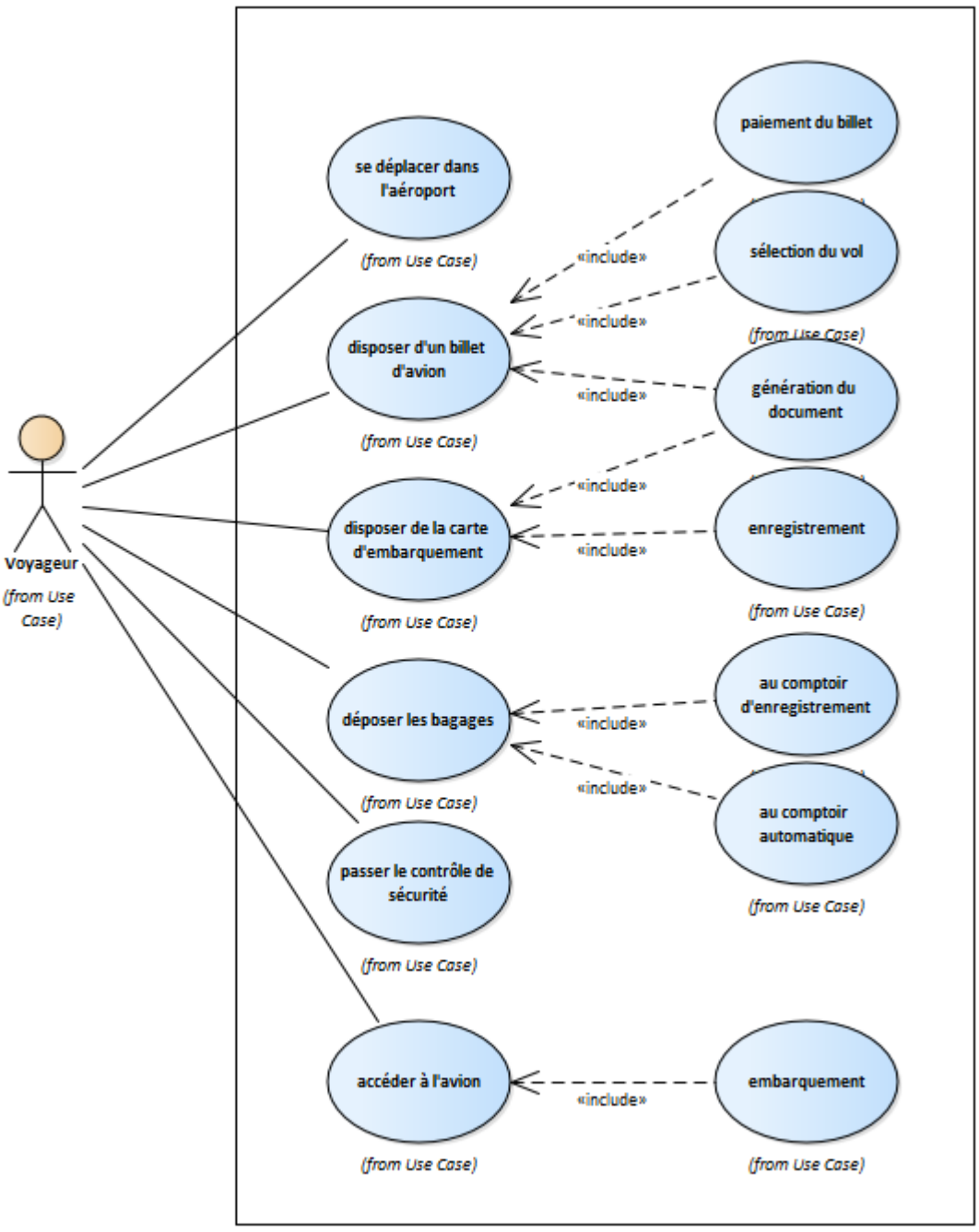
disposer de la carte d'embarquement

Participant WDA-P1

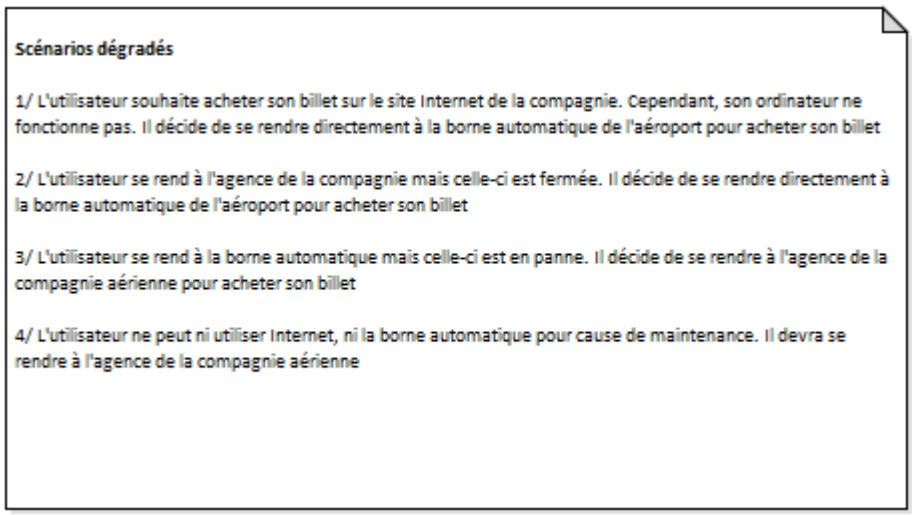
Exigences WDA-P1



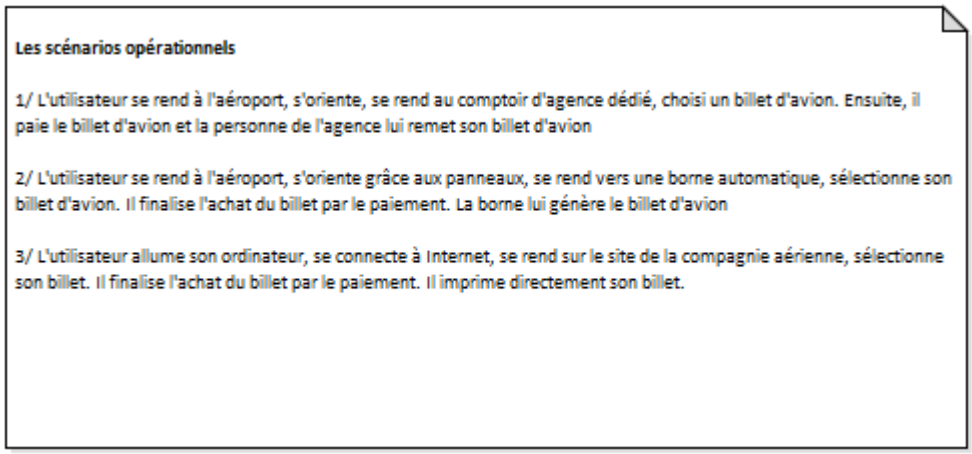
Cas d’utilisation WDA-P1



Scénarios nominaux WDA-P1

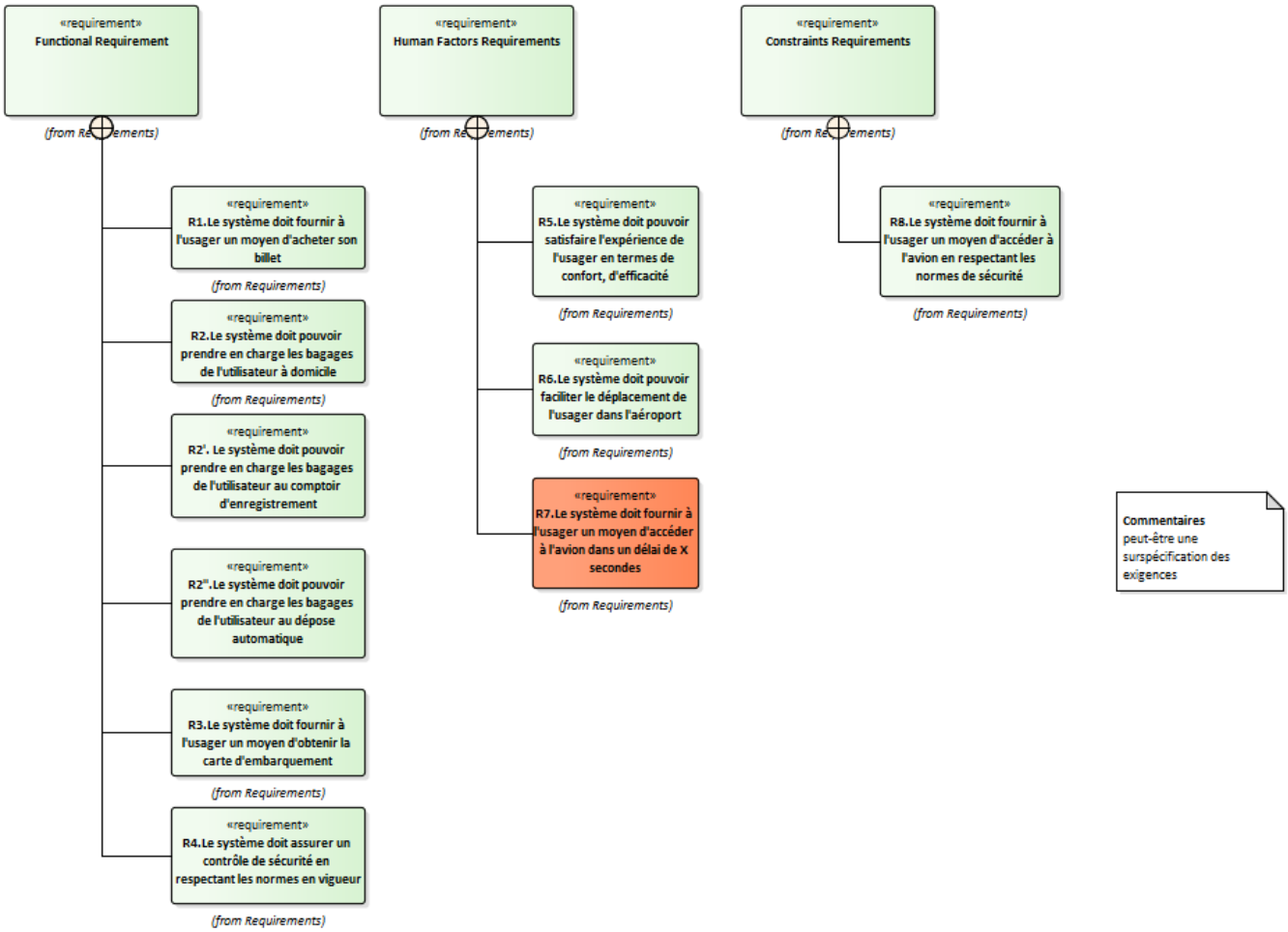


Scénarios dégradés WDA-P1

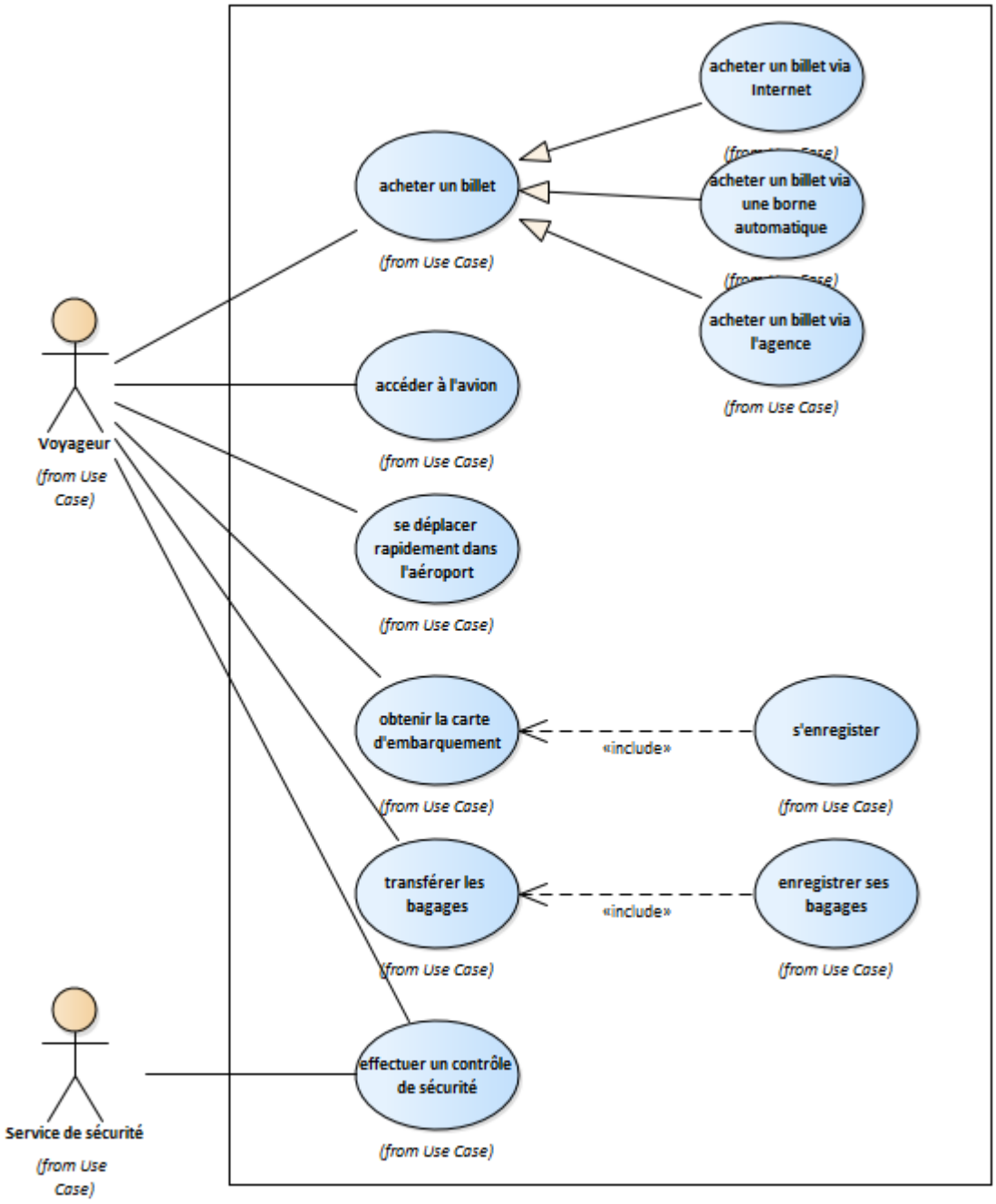


Participant WDA-P2

Exigences WDA-P2



Cas d'utilisation WDA-P2



Scénarios nominaux WDA-P2

Scénarios opérationnels

1/ L'usager est à domicile, se connecte à Internet et effectue un achat en ligne pour son billet d'avion. Il reàoit le .pdf et imprime le billet

2/ L'usager souhaite acheter son billet d'avion, il se rend à une agence de compagnie, demande les propositions de vols et achète son billet d'avion

3/ L'usager souhaite acheter son billet d'avion, ...

Scénarios dégradés WDA-P3

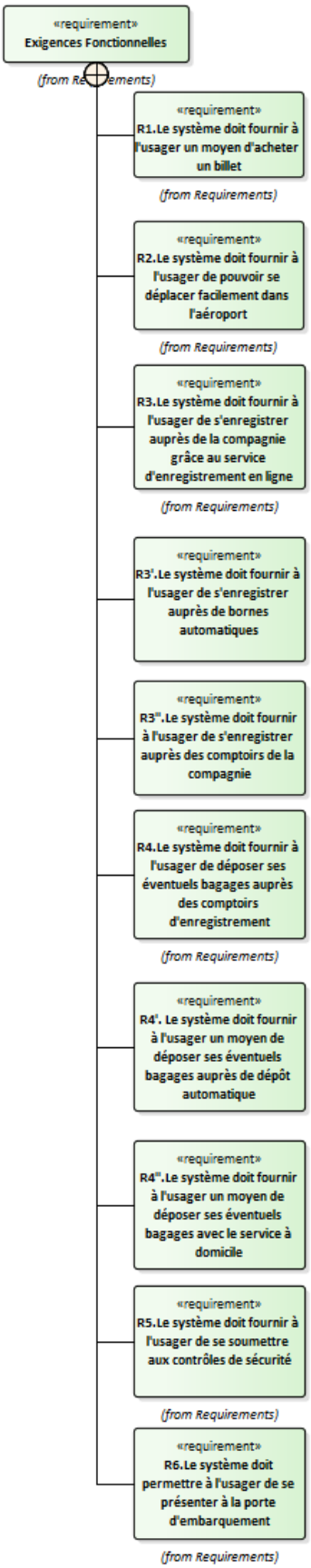
Scénarios dégradés

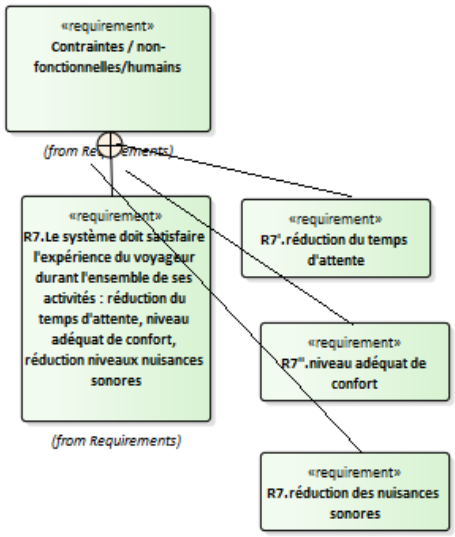
1/ L'utilisateur souhaite acheter son billet d'avion sur Internet. Cependant, il y a une coupure de réseau. Il décide donc d'acheter son billet via une borne automatique.

2/ L'utilisateur souhaite acheter son billet sur les bornes automatiques. Les bornes sont hors service dû à une dégradation des équipements. Il se dirige vers l'agence de la compagnie

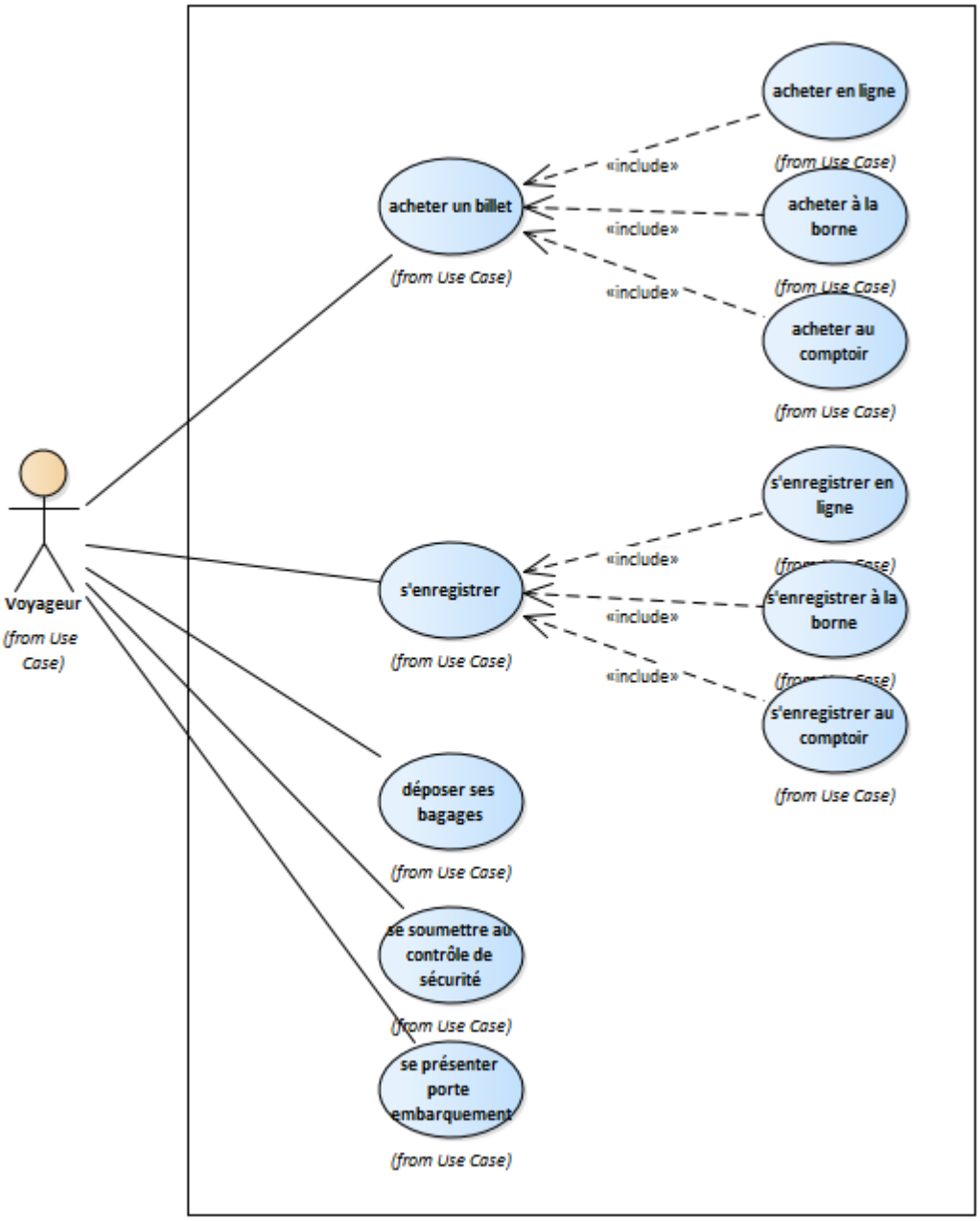
Participant WDA-P3

Exigences WDA-P3





Cas d’utilisation WDA-P3



Scénarios nominaux WDA-P3

Scénarios fonctionnels

1/ L'usager est à domicile, et achète son billet d'avion en ligne via le site Internet de la compagnie

2/ L'usager se rend à l'aéroport, va au kiosque d'information et demande la localisation de la borne automatique la plus proche pour acheter son billet d'avion

3/ Voir exemple

Scénarios dégradés WDA-P3

Scénarios dégradés

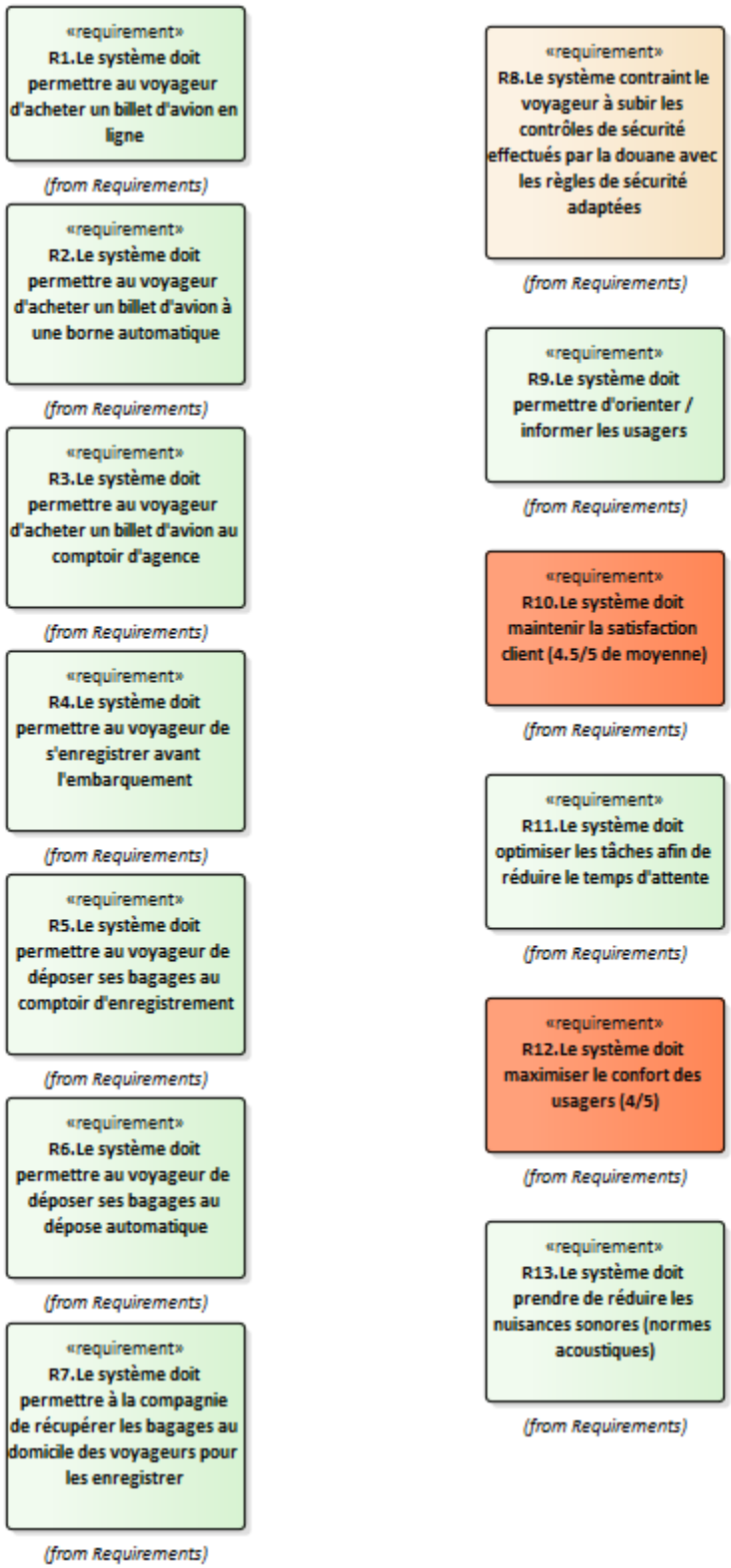
1/ L'utilisateur souhaite acheter son billet à une borne automatique de l'aéroport. Cependant, il constate que l'appareil est défectueux et il est pressé. Il décide alors de se rendre au comptoir de l'agence de la compagnie aérienne

2/ L'utilisateur souhaite acheter son billet à une borne automatique. Cependant, aucun panneau n'indique la présence d'une borne. Il décide donc d'acheter son billet au comptoir de l'agence de la compagnie aérienne

3/ L'utilisateur souhaite acheter son billet en ligne. Cependant, site Internet défectueux -> achat à la borne

Participant WDA-P4

Exigences WDA-P4



Cas d’utilisation WDA-P4

Scénarios nominaux WDA-P4

Scénarios Opérationnels

1/ Acheter un billet sur Internet
Contexte : Le voyageur est connecté sur un ordinateur ou sur un téléphone portable. Il a ses éléments d'identification avec lui.
Objectifs : Le billet est choisi, avec un vol, un niveau de service, éventuellement avec sa carte de fidélité, la transaction finale est enregistrée, il a un preuve d'achat

2/ Acheter un billet au comptoir
Contexte : au comptoir avec ses éléments d'identification
Objectifs : le billet est choisi, vol / niveau de service, moyen de paiement (liqe, CB, autre) et facture / preuve d'achat

3/ Acheter un billet sur une borne automatique
idem sauf moyen de paiement

1/ L'usager se connecte au site, recherche un vol sur la base de critères personnels, trouver un billet correspondant, le sélectionne, le paye et récupère une preuve d'achat

2/ L'usager se rend à l'aéroport, s'oriente grâce aux panneaux et aux points d'information jusqu'au comptoir, demande un vol selon ses critères, se voit proposer plusieurs vols, choisi le bon, paie, recupère une preuve et part s'enregistrer

Scénarios dégradés WDA-P4

Scénarios dégradés

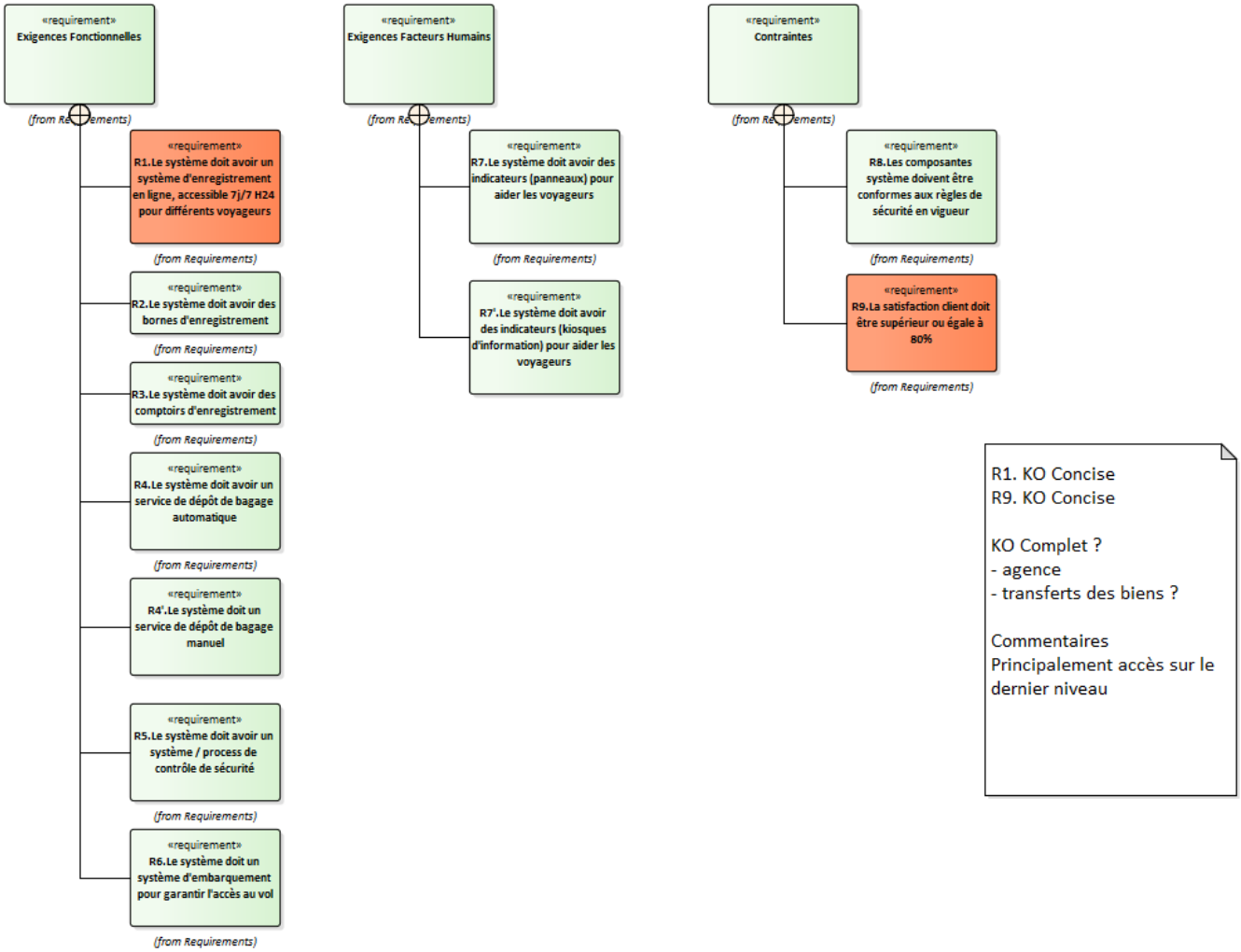
Sur Internet
1/ Le voyageur est en train d'acheter sur Internet, mais il a une déconnection réseau
2/ Le voyageur est en train d'acheter sur Internet mais le paiement ne fonctionne pas
3/ pas de preuve d'achat
4/ pas de vol correspondant demandé

A la borne
5/ Pas de vols correspondant aux critères
6/ Le voyageur renverse son café sur la borne
7/ Le voyageur se fait voler sa carte bleue au moment du paiement

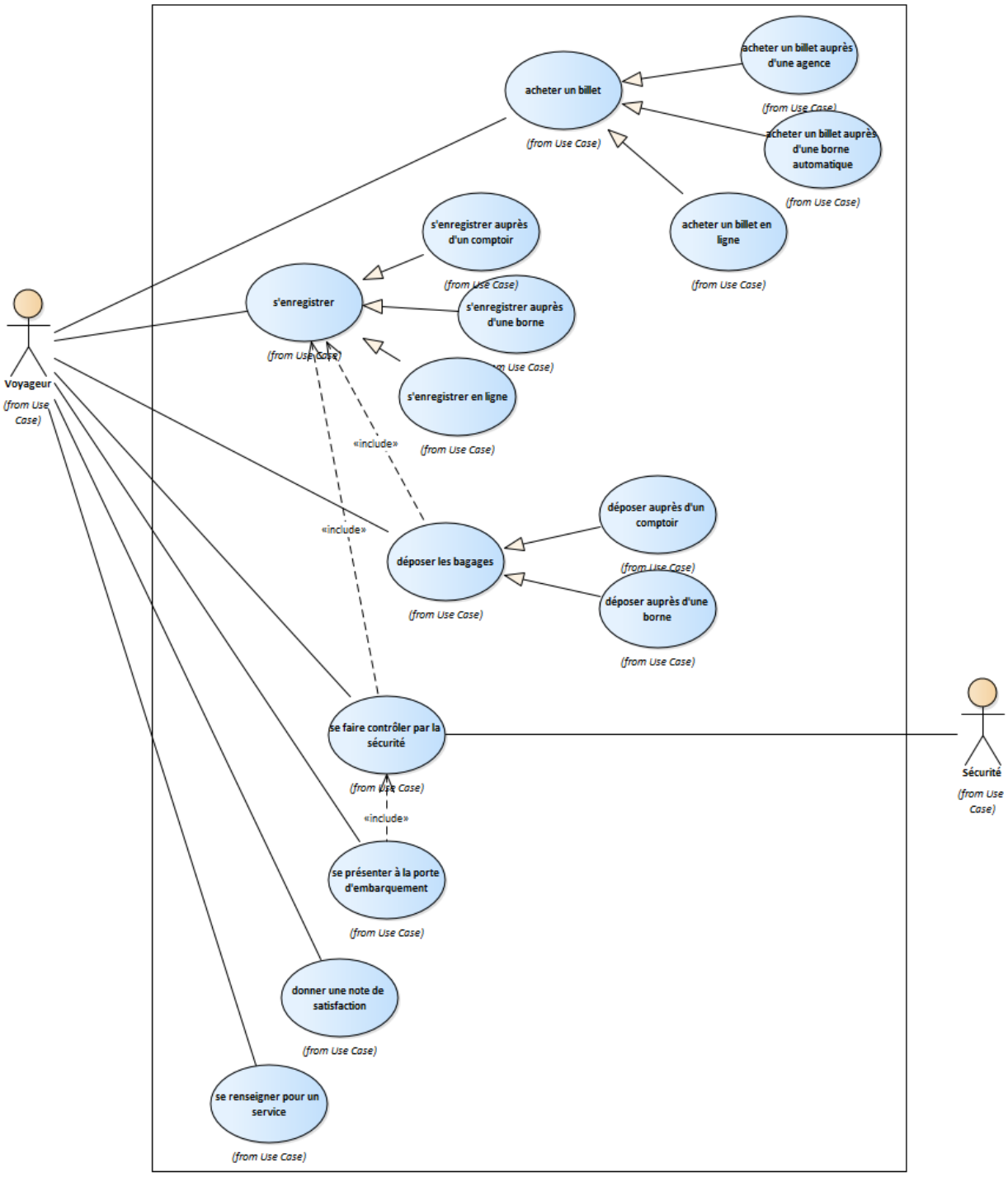
Au comptoir
8/ Les documents d'identification sont caduques
9/ La personne est handicapée et n'arrive pas à atteindre le comptoir faute de moyens mis en oeuvre par l'aéroport

Participant WDA-P5

Exigences WDA-P5



Cas d’utilisation WDA-P5



Scénarios nominaux WDA-P5

Scénarios Dégradés

1/ Le voyageur est interdit bancaire, il ne peut pas payer son billet

2/ Confusion dans la base de données d'enregistrement : le voyageur ne peut pas être enregistré pour X raisons

3/ Trop d'attente pour déposer au comptoir, le voyageur va à la borne. La borne automatique ne marche pas, le voyageur retourne au comptoir

4/ Un des panneaux est ambigu, le voyageur s'est perdu et rate son vol

5/ Le voyageur est un terroriste et ne passe pas le contrôle de sécurité

6/ Le voyageur a acheté son billet à la borne automatique, mais celui-ci ne se génère pas

Scénarios dégradés WDA-P5

Scénarios opérationnels

1, 2, 3/ Le voyageur prépare son vol, il va acheter un billet en ligne / dans une agence / sur une borne automatique

4/ Une fois muni de son billet, le voyageur se "balade" dans l'aéroport. Il est aidé par les panneaux ou les kiosques d'information. Il arrive vers un comptoir ou une borne pour s'enregistrer sur un son vol. Sinon, il s'est déjà enregistré en ligne. Il récupère ainsi sa carte d'embarquement

5/ Si le voyageur a des bagages, il les dépose au comptoir (où il peut également s'enregistrer) ou les déposer automatiquement dans un point dépôt automatique (aidé par les services d'indication)

6/ Une fois muni de sa carte d'embarquement, il va vers la porte d'embarquement (aidé par les services d'indication)

7/ Avant d'arriver vers la porte d'embarquement, le voyageur passe les contrôles de sécurité

8/ Une fois à la porte, le voyageur attend pour prendre l'avion

V.1.14. Évaluation des formations

Données HTA :

QCM formation	P1	P2	P3	P4	P5	MOYENNE	ECARTYPE
Résultats	7/9	6,5/9	7/9	6/9	8,5/9		
	15,6/20	14,4/20	15,6/20	13,3/20	18,9/20	15,6	2

Données WDA :

QCM formation	P1	P2	P3	P4	P5	MOYENNE	ECARTYPE
Résultats	13/13	11,5/13	12,75/13	11,5/13	11/13		
	20/20	17,7/20	19,6/20	17,7/20	16,9/20	18,4/20	1,34

V.1.15. Temps d'exécution et sensation de réussite

Données HTA :

Temps execution	P1	P2	P3	P4	P5	MOYENNE	ECARTYPE	MOYENNE (sans P3)	ECARTYPE (sans P3)
Ex1	14'18 (858 sec)	8'30 (510 sec)	29'45 (1785 ec)	11'39 (699 sec)	4'15 (255 sec)	13'42 (821 sec)	9'44 (584)	9'41 (581 sec)	4'19 (259)
Ex2	10'18 (618 sec)	9'08 (548 sec)	8' (480 sec)	5'19 (319 sec)	2'20 (140 sec)	7'01 (421 sec)	3'12 (192)	6'46 (406 sec)	3'39 (219)
Ex3	5'37 (337 sec)	9'00 (540 sec)	0'	16'34 (994 sec)	20'06 (1206 sec	10'15 (615 sec)	8'08 (488 se	12'48 (768 sec)	6'40 (400)
Ex4	5'13 (313 sec)	6'25 (385 sec)	0'	3'41 (221 sec)	8'57 (537 sec)	4'51 (291 sec)	3'20 (200)	6'04 (364 sec)	2'13 (133)

Sensation réussite	P1	P2	P3	P4	P5	MOYENNE	ECARTYPE	MOYENNE (sans P3)	ECARTYPE (sans P3)
Ex1	80%	100%	0%	100%	100%	76%	43%	95%	10%
Ex2	100%	100%	0%	100%	100%	80%	45%	100%	0%
Ex3	100%	100%	0%	80%	60%	68%	41%	85%	19%
Ex4	100%	100%	0%	100%	100%	80%	45%	100%	0%

Données WDA :

Temps execution	P1	P2	P3	P4	P5	MOYENNE	ECARTYPE
Ex1	14'53 (893 sec)	13'25 (805 sec)	17'30 (1050 sec)	11'54 (714 sec)	8'10 (490sec)	13'10 (790 sec)	3'29 (209)
Ex2	11'44 (704 sec)	11'15 (675 sec)	6'50 (410 sec)	6'02 (362 sec)	7'30 (450 sec)	8'40 (520 sec)	2'32 (158)
Ex3	9'16 (556 sec)	7'15 (435 sec)	6'00 (360 sec)	14'17 (857 sec)	11'05 (665 sec)	9'35 (575 sec)	3'16 (196)
Ex4	7'46 (466 sec)	8'45 (525 sec)	8'40 (520 sec)	7'22 (442 sec)	8'13 (493 sec)	8'09 (489 sec)	0'35 (35)

Sensation réussite	P1	P2	P3	P4	P5	MOYENNE	ECARTYPE
Ex1	90%	100%	80%	100%	100%	94%	9%
Ex2	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0%
Ex3	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0%
Ex4	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0%

V.1.16. Résultats des questionnaires NASA-TLX

Données HTA :

NASA-TLX	P1	P2	P3	P4	P5	TOTAL	MOYENNE	ECARTYPE
Q1	55	40	40	10	30	175	35	16,58312395
Q2	25	65	5	5	10	110	22	25,3968502
Q3	55	80	75	85	50	345	69	15,5724115
Q4	55	55	65	55	25	255	51	15,16575089
Q5	50	35	75	20	40	220	44	20,43281674
Q6	30	60	65	10	25	190	38	23,61143791

Données WDA :

NASA-TLX	P1	P2	P3	P4	P5	TOTAL	MOYENNE	ECARTYPE
Q1	70	20	50	40	60	240	48	19,2353841
Q2	15	10	10	10	10	55	11	2,23606798
Q3	70	75	50	50	60	305	61	11,4017543
Q4	50	40	70	40	45	245	49	12,4498996
Q5	40	50	75	30	40	235	47	17,175564
Q6	55	50	75	15	30	225	45	23,1840462

V.1.17. Résultats des questionnaires TAM

Légende : 1 = pas d'accord ; 7 = d'accord

Données HTA :

TAM	P1	P2	P3	P4	P5	TOTAL	MOYENNE	ECARTYPE
Q1	6	6	6	6	6	30	6	0
Q2	6	5	6	6	7	30	6	0,707106781
Q3	4	6	4	6	7	27	5,4	1,341640786
Q4	6	5	5	4	3	23	4,6	1,140175425
Q5	3	5	6	7	3	24	4,8	1,788854382
Q6	4	6	4	7	7	28	5,6	1,516575089
Q7	6	5	5	7	6	29	5,8	0,836660027
Q8	6	6	5	7	6	30	6	0,707106781
Q9	2	2	4	6	2	16	3,2	1,788854382
Q10	6	6	6	7	7	32	6,4	0,547722558
Q11	6	6	6	7	6	31	6,2	0,447213595
Q12	6	7	5	7	7	32	6,4	0,894427191
Q13	3	6	6	6	7	28	5,6	1,516575089
Q14	6	7	6	7	7	33	6,6	0,547722558
Q15	6	2	3	5	2	18	3,6	1,816590212
Q16	4	6	3	6	2	21	4,2	1,788854382

Données WDA :

TAM	P1	P2	P3	P4	P5	TOTAL	MOYENNE	ECARTYPE
Q1	6	5	5	5	6	27	5,4	0,54772256
Q2	4	5	5	5	5	24	4,8	0,4472136
Q3	6	6	4	2	6	24	4,8	1,78885438
Q4	4	5	2	2	4	17	3,4	1,34164079
Q5	7	3	7	5	2	24	4,8	2,28035085
Q6	5	5	5	5	5	25	5	0
Q7	5	4	5	5	6	25	5	0,70710678
Q8	4	5	6	5	6	26	5,2	0,83666003
Q9	6	4	6	1	4	21	4,2	2,04939015
Q10	4	6	5	6	6	27	5,4	0,89442719
Q11	7	5	5	6	5	28	5,6	0,89442719
Q12	4	4	3	2	6	19	3,8	1,4832397
Q13	6	4	6	4	6	26	5,2	1,09544512
Q14	5	6	5	2	4	22	4,4	1,51657509
Q15	6	2	6	2	2	18	3,6	2,19089023
Q16	6	1	2	2	2	13	2,6	1,94935887

V.1.18. Résultats des questionnaires SUS

Légende : 1 = pas d'accord ; 5 = d'accord

Données HTA :

SUS	P1	P2	P3	P4	P5	TOTAL	MOYENNE	ECARTYPE
Q1	3	3	2	3	4	15	3	0,707106781
Q2	1	1	1	2	2	7	1,4	0,547722558
Q3	5	4	4	4	5	22	4,4	0,547722558
Q4	1	1	4	1	1	8	1,6	1,341640786
Q5	4	5	2	5	5	21	4,2	1,303840481
Q6	1	1	1	1	2	6	1,2	0,447213595
Q7	7	5	4	5	4	25	5	1,224744871
Q8	1	2	3	2	1	9	1,8	0,836660027
Q9	3	4	2	5	5	19	3,8	1,303840481
Q10	1	1	3	3	1	9	1,8	1,095445115

Données WDA :

SUS	P1	P2	P3	P4	P5	TOTAL	MOYENNE	ECARTYPE
Q1	2	4	2	2	4	14	2,8	1,09544512
Q2	3	3	4	1	2	13	2,6	1,14017543
Q3	4	5	3	4	5	21	4,2	0,83666003
Q4	3	2	3	1	2	11	2,2	0,83666003
Q5	2	4	3	3	3	15	3	0,70710678
Q6	3	4	3	1	1	12	2,4	1,34164079
Q7	4	4	5	5	5	23	4,6	0,54772256
Q8	3	2	4	1	1	11	2,2	1,30384048
Q9	3	4	1	3	4	15	3	1,22474487
Q10	2	2	1	1	1	7	1,4	0,54772256

V.1.19. Explication du test Mann-Whitney

Nous avons choisi de tester nos résultats avec le test de Mann-Whitney pour les raisons suivantes :

- Nos 2 groupes de participants sont indépendants
- Le nombre de participants est faible : 5 participants par groupe
- Nous ne pouvons pas savoir si les variables suivent une loi normale (trop peu de participants)

Il nous fallait donc un test non paramétrique pour 2 échantillons indépendants : le test de Mann-Whitney.

Nous allons présenter des étapes de calcul pour le test Mann-Whitney pour le SUS. Ensuite, nous donnerons directement sous forme de tableaux les résultats de ce test pour les autres questionnaires.

Voici les résultats des scores pour le SUS pour les 2 groupes de participants :

	HTA	WDA
P1	95	55
P2	90	72,5
P3	57,5	50
P4	85	82,5
P5	92,5	87,5

1ère étape : Formulation de l'hypothèse :

H0 : les 2 distributions sont identiques

2ème étape : Interclassement des valeurs des 2 groupes

Il faut classer les valeurs par rang et faire la somme des rangs par groupe, on obtient :

Valeur	HTA	WDA
50		1
55		2
57,5	3	
72,5		4
82,5		5
85	6	
87,5		7
90	8	
92,5	9	
95	10	
Somme des rangs	$S_{(HTA)}$=36	$S_{(WDA)}$=19

S'il y a 2 valeurs égales, par exemple 2 et 3, on leur donne le rang 2,5

S'il y a 3 valeurs égales, par exemple 3, 4 et 5, on leur donne à chacun le rang 5

3ème étape : Calculer les valeurs $U_{(HTA)}$ et $U_{(WDA)}$, selon les équations suivantes :

$U_{(HTA)} = (nb_{HTA} * nb_{WDA}) + [nb_{HTA}*(nb_{HTA} +1)]/2 – S_{(HTA)}$

$U_{(WDA)} = (nb_{HTA} * nb_{WDA}) + [nb_{WDA}*(nb_{WDA} +1)]/2 – S_{(WDA)}$

Avec $nb_{HTA} = 5$ et $nb_{WDA} = 5$

$U_{(HTA)} = 5*5 + (5*6)/2 – 36$ et $U_{(WDA)} =5*5 + (5*6)/2 – 19$

$U_{(HTA)} = 4$ et $U_{(WDA)} = 21$

4ème étape : Comparaison avec la valeur de la table de Mann-Whitney. La statistique $U_{HTA,WDA}$ de Mann-Whitney correspond à la valeur la plus petite de $U_{(HTA)}$ et de $U_{(WDA)}$.

La table de Mann-Whitney nous fournit la valeur critique, appelée U_C :

n_2	α	n_1																	
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
3	.05	--	0	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8
	.01	--	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	2	2	2	3	3
4	.05	--	0	1	2	3	4	4	5	6	7	8	9	10	11	11	12	13	14
	.01	--	--	0	0	0	1	1	2	2	3	3	4	5	5	6	6	7	8
5	.05	0	1	2	3	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	17	18	19	20
	.01	--	--	0	1	1	2	3	4	5	6	7	7	8	9	10	11	12	13
6	.05	1	2	3	5	6	8	10	11	13	14	16	17	19	21	22	24	25	27
	.01	--	0	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	15	16	17	18
7	.05	1	3	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
	.01	--	0	1	3	4	6	7	9	10	12	13	15	16	18	19	21	22	24
	05	2	4	6	8	10	13	15	17	19	22	24	26	29	31	34	36	38	41

La valeur critique (pour un seuil $\alpha = 0,05$) pour notre cas est $U_C = 2$

5ème étape : Conclusion sur l'hypothèse de départ

La valeur minimale de $U_{HTA,WDA}$ est supérieure à U_C, cela permet de dire que les distributions des valeurs des 2 groupes sont identiques.

V.1.20. Test Mann-Whitney

H0 = la distribution des données est la même dans les deux groupes HTA et WDA

Pour la distribution : Ucritique = 2 et alpha = 0,05

Test NASA-TLX

Dimension	**Mentale**		**Physique**		**Temporelle**		**Performance**		**Effort**		**Frustration**	
Méthode	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA
U	7	18	12	13	17,5	5,5	16	9	11	14	10,5	14,5
Résultat	H0 vraie		H0 vraie		H0 vraie		H0 vraie		H0 vraie		H0 vraie	

Test TAM

Question	**Q1**		**Q2**		**Q3**		**Q4**		**Q5**		**Q6**		**Q7**		**Q8**	
Méthode	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA
U	2,5	22,5	2	23	10	15	6	19	12,5	12,5	10	15	6	19	6	19
Résultat	H0 vraie		H0 vraie		H0 vraie		H0 vraie		H0 vraie		H0 vraie		H0 vraie		H0 vraie	

Question	**Q9**		**Q10**		**Q11**		**Q12**		**Q13**		**Q14**		**Q15**		**Q16**	
Méthode	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA
U	16	9	4,5	20,5	6,5	18,5	1,5	23,5	9,5	15,5	1	24	12	13	5,5	19,5
Résultat	H0 vraie		H0 vraie		H0 vraie		H0 fausse		H0 vraie		H0 fausse		H0 vraie		H0 vraie	

Test SUS

Question	**Q1**		**Q2**		**Q3**		**Q4**		**Q5**	
Méthode	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA
U	10,5	14,5	20,5	4,5	11	14	18	7	5	20
Résultat	H0 vraie		H0 vraie		H0 vraie		H0 vraie		H0 vraie	

Question	**Q6**		**Q7**		**Q8**		**Q9**		**Q10**	
Méthode	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA
U	19	6	15	15	14,5	10,5	8	17	10,5	14,5
Résultat	H0 vraie		H0 vraie		H0 vraie		H0 vraie		H0 vraie	

Temps de réalisation

Avec les 10 participants

Question	**Exo1**		**Exo2**		**Exo3**		**Exo4**	
Méthode	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA
U	15	10	16	9	13	12	20	5
Résultat	H0 vraie		H0 vraie		H0 vraie		H0 vraie	

Sans le participant HTA-P3 (Ucritique = 1)

Question	**Exo1**		**Exo2**		**Exo3**		**Exo4**	
Méthode	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA	HTA	WDA
U	15	5	14	6	8	12	15	5
Résultat	H0 vraie		H0 vraie		H0 vraie		H0 vraie	

V.1.21. Test Spearman

Questionnaire TAM

Le test de Spearman permet de tester la relation entre les composants du questionnaire TAM : la perception de l'utilité (UP) et la perception de la facilité d'utilisation (FUP). Comme pour le test de Mann-Whitney (non paramétrique), le calcul ne porte pas sur les valeurs des mesures, mais sur leurs rangs attribués (suite au classement des valeurs) par ordre croissant.

HTA

			UP	**FUP**
Rho de Spearman	**UP**	**Coeff. de corrélation**	1,00	0,028
		Sig (bilatéral)		0,862
		N	40	40
	FUP	**Coeff. de corrélation**	0,28	1,00
		Sig (bilatéral)	0,862	
		N	40	40

WDA

			UP	**FUP**
Rho de Spearman	**UP**	**Coeff. de corrélation**	1,00	0,069
		Sig (bilatéral)		0,672
		N	40	40
	FUP	**Coeff. de corrélation**	0,069	1,00
		Sig (bilatéral)	0,672	
		N	40	40

On observe que pour les deux tableaux, les résultats ne sont pas significatifs (pour que ce soit significatif, le rho de Spearman doit être supérieur à 0,65). Cela implique les deux dimensions étudiées par le TAM : facilité d'utilisation perçue et utilité perçue sont indépendantes, il n'y a pas de corrélation entre ces variables