



HAL
open science

Spécification d'exigences physico-physiologiques en ingénierie d'un système support de maintenance aéronautique

Romain Lieber

► **To cite this version:**

Romain Lieber. Spécification d'exigences physico-physiologiques en ingénierie d'un système support de maintenance aéronautique. Automatique / Robotique. Université de Lorraine, 2013. Français. NNT: . tel-01750451v2

HAL Id: tel-01750451

<https://theses.hal.science/tel-01750451v2>

Submitted on 5 Feb 2019

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

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

Spécification d'exigences physico-physiologiques en ingénierie d'un système support de maintenance aéronautique

THESE

présentée et soutenue publiquement le 06/11/2013
pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Lorraine
(mention Automatique, Traitement du Signal et des Images, Génie Informatique)

par
Romain Lieber

Composition du Jury

Président : François Pérès, Professeur, LGP, ENIT Tarbes

Rapporteurs : Pierre Chauvet, Professeur, IMA, Université d'Angers
Bernard Riera, Professeur, CReSTIC, Université de Reims

Examineurs : Jean-Marc Dupont, Docteur, Consultant société So-Innov
Didier Fass, Docteur, LORIA, Université de Lorraine
Dominique Mery, Professeur, LORIA, Université de Lorraine, (Co-directeur de thèse)
Gérard Morel, Professeur, CRAN, Université de Lorraine, (Directeur de thèse)

Invité : Jean-Luc Marty, Ingénieur, EADS/ASTRIUM (Encadrant CIFRE)

Remerciements

Voilà, nous y sommes. Après une aventure de 5 années, j'y suis finalement arrivé. Ceci n'a pas été une aventure des plus reposantes. Je suis fier d'avoir réussi à faire face à certains moments de doutes et de difficultés, et de pouvoir défendre mes travaux et ainsi valoriser mon investissement personnel. Je ne pouvais pas abandonner.

Alors quels enseignements puis-je retirer de cette expérience de vie à part entière ? Ce projet a fait évoluer beaucoup d'aspects de mon comportement. Il m'a fourni un certain nombre d'outils rationnels et pratiques que je mets en œuvre tous les jours dans ma vie professionnelle et qui me permettent de progresser, moyennant une petite adaptation du fait des spécificités du contexte industriel dans lequel j'évolue à présent. Il m'a endurci et permis de mettre en défaut une position qui, face aux difficultés d'un projet pluridisciplinaire, se range derrière le « *à l'impossible nul n'est tenu* ». En voulant trouver, on trouve finalement. Evidemment, en faisant des sacrifices ou, plus communément parlant, des *compromis*. Mais n'est ce pas là une constante de vie. Je ne pense pas, personnellement, que *l'on puisse avoir sans rien*. Il faut bien sûr savoir fixer des limites personnelles, avec lesquelles j'ai pas mal joué durant cette thèse (*rires*). Cet état d'esprit est un élément nécessaire mais non suffisant. L'environnement dans lequel j'aurai été placé pour réaliser ce projet, notamment sur les deux dernières années, aura assurément joué un rôle.

Cette prise de recul est essentielle. Elle n'est bien sûr pas complète, il me reste encore un bout de chemin à faire, des expériences à vivre et des gens à rencontrer et remercier. Je prendrai un peu plus la mesure des choses dans quelque temps. Je peux néanmoins, dès à présent, adresser mes remerciements aux personnes avec qui j'ai pu échanger et vivre au cours de cette thèse. Tout d'abord, je remercie François Pérès, Bernard Riera et Pierre Chauvet, d'avoir accepté de juger mes travaux de recherche. Ce fut un honneur que d'avoir pu être évalué par eux. Je tiens à remercier particulièrement mon directeur de thèse, Gérard Morel, qui a su me faire partager sa passion et son exigence scientifique et professionnelle quel que soit la phase du projet. Son ouverture d'esprit m'a permis de plus facilement m'approprier le domaine de l'ingénierie système et de réaliser les ponts avec ma formation initiale. Je remercie Jean-Marc Dupont et Jean-Luc Marty pour nos échanges réguliers et nos réflexions au cours des dernières années de thèse. Je remercie mon co-directeur de thèse, Dominique Mery, et les membres de l'équipe MOSEL ayant collaboré avec nous. Ensuite, je tiens à remercier l'ensemble des membres du laboratoire CRAN, et notamment ceux passés par le 6^{ème} étage. J'y ai rencontré des personnes qui sont maintenant des amis. Enfin, les personnes les plus proches de moi et celles avec qui j'ai passé du temps depuis 2008 : ma famille de sang, ma famille d'alliance (« *ens hi deixem la pell* »), mes meilleurs amis ainsi que mes héros. Ces personnes ont, chacune à leur manière, été patientes et su m'apporter un soutien approprié quand il fallait que je m'enferme. Les autres, qu'ils n'y pensent même pas.

Table des matières

REMERCIEMENTS	5
TABLE DES MATIERES	7
AUTORISATION DE CONFIDENTIALITE DU MEMOIRE DE THESE	11
ABREVIATIONS	13
INTRODUCTION	15
1. CONTEXTE OPERATIONNEL ET D'INGENIERIE D'UN SYSTEME SUPPORT DE MAINTENANCE AERONAUTIQUE.....	23
1.1. CONTEXTE OPERATIONNEL : FACTEURS HUMAINS EN MAINTENANCE AERONAUTIQUE.....	25
1.1.1. <i>Les opérations de maintenance aéronautique.....</i>	25
1.1.1.1. Spécificités des opérations de maintenance aéronautique.....	25
1.1.1.2. Erreurs humaines en opérations de maintenance.....	29
1.1.1.3. Conclusion : Les opérations d'installation au centre des incidents opérationnels	31
1.1.2. <i>Le cas opérationnel de la fermeture verrouillée d'un capot moteur suite à l'installation d'un équipement</i>	31
1.1.2.1. Les capots moteur et le système de fermeture ET verrouillage	32
1.1.2.2. Spécification technique de la procédure de fermeture ET verrouillage	33
1.1.2.3. Spécification homme-machine de la procédure de Fermeture ET Verrouillage.....	36
1.1.2.4. Conclusion : la forte contingence des opérations de maintenance à l'égard du contexte	38
1.1.3. <i>Conclusion : les opérations de maintenance vues comme un système homme-machine support de maintenance aéronautique</i>	38
1.2. CONTEXTE METHODOLOGIQUE : ORGANISATION DE L'INGENIERIE D'UN SYSTEME SUPPORT DE MAINTENANCE	40
1.2.1. <i>Artefacts essentiels d'ingénierie système</i>	40
1.2.1.1. Processus de développement produit.....	40
1.2.1.2. Ingénierie basée sur les exigences.....	42
1.2.1.3. Conclusion : l'opérabilité, domaine de l'ingénierie du système support de maintenance aéronautique au cours du PDP	45
1.2.2. <i>Facteurs humains pris en compte au cours du cycle de vie produit</i>	46
1.2.2.1. Conception centrée sur les facteurs humains en maintenance.....	46
1.2.2.2. Les facteurs humains analysés au cours du cycle de vie : cas de l'antenne.....	47
1.2.2.1.1. En production	48
1.2.2.1.2. En exploitation.....	49
1.2.2.3. Conclusion : Les facteurs humains physiologiques n'alimentent pas suffisamment le processus d'ingénierie.....	51
1.2.3. <i>Conclusion : les facteurs humains en maintenance considérés de manière a posteriori au cours du processus de spécification</i>	51
1.3. CONCLUSION : LA NATURE DICHOTOMIQUE DU PROCESSUS DE SPECIFICATION ENTRE DOMAINES DU TECHNIQUE ET DES FACTEURS HUMAINS	53
2. SPECIFICATION FONCTIONNELLE D'UNE INTERACTION PHYSICO-PHYSIOLOGIQUE DE PERCEPTION VISUELLE	55
2.1. SPECIFICATION FONCTIONNELLE D'UNE INTERACTION DE PERCEPTION VISUELLE BASEE SUR LA THEORIE ECOLOGIQUE DE LA PERCEPTION.....	58
2.1.1. <i>Interaction homme-environnement.....</i>	58
2.1.2. <i>Le rôle clé de l'action dans le processus perceptif.....</i>	60
2.1.3. <i>La perception directe</i>	61

2.1.4.	<i>Les affordances</i>	62
2.1.5.	<i>Discussion : Des mises en œuvre du concept d'affordance</i>	65
2.1.5.1.	Ergonomie et conception : les affordances comme support de la performance humaine	65
2.1.5.2.	Intelligence artificielle et robotique : les affordances comme support de modélisation du couplage multimodale perception-action chez les automates	67
2.1.6.	<i>Conclusion : l'interaction homme-machine, siège de communications symboliques</i>	69
2.2.	SPECIFICATION FONCTIONNELLE D'UNE INTERACTION DE PERCEPTION VISUELLE BASEE SUR UN CADRE INTEGRATIF EN PHYSIOLOGIE.....	70
2.2.1.	<i>Physiologie de la perception et de l'action</i>	71
2.2.2.	<i>La théorie mathématique de la physiologie intégrative</i>	74
2.2.3.	<i>L'interaction fonctionnelle : atome élémentaire du processus physiologique</i>	76
2.2.4.	<i>L'interaction fonctionnelle de perception visuelle et les conditions de propagation du produit physiologique</i>	78
2.2.4.1.	L'interaction fonctionnelle de perception visuelle vue comme un Thyristor	78
2.2.4.2.	Modèles computationnels et mesures physiologiques	79
2.2.5.	<i>Conclusion : Le flux lumineux, objet interface de l'interaction de perception visuelle entre la Fovéa de l'œil et le Latch</i>	80
2.3.	CONCLUSION : L'INTERACTION HOMME-MACHINE CONTINGENTE A LA BONNE STIMULATION PHYSICO-PHYSIOLOGIQUE EMISE PAR LA SOURCE TECHNIQUE	83
3.	INTEGRATION D'EXIGENCES PHYSICO-PHYSIOLOGIQUES EN INGENIERIE D'UN SYSTEME SUPPORT DE MAINTENANCE AERONAUTIQUE	85
3.1.	CO-SPECIFICATION D'EXIGENCES PHYSICO-PHYSIOLOGIQUES DE L'INTERACTION DE PERCEPTION VISUELLE	87
3.1.1.	<i>Processus de co-spécification d'un système homme-machine</i>	87
3.1.1.1.	L'approche des Problem Frames	87
3.1.1.2.	Notre interprétation pour le processus de spécification d'un système homme-machine en ingénierie système.....	91
3.1.2.	<i>Révision d'un scénario plausible de co-spécification d'exigences physico-physiologiques d'une interaction de perception visuelle</i>	95
3.1.2.1.	Présentation du scénario plausible de co-spécification	95
3.1.2.2.	Spécification système centrée opérabilité – premier niveau d'itération	97
3.1.2.3.	Spécification système centrée humain – deuxième niveau d'itération.....	99
3.1.2.4.	Spécification système centrée machine – deuxième niveau d'itération	101
3.1.2.5.	Vérification de l'exigence système centrée opérabilité ITH _{LL}	102
3.1.3.	<i>Conclusion : L'intégration des facteurs humains physiologiques par la co-spécification d'exigences physico-physiologiques mesurables de l'interaction homme-machine</i>	103
3.2.	PROPOSITION D'UNE ORGANISATION D'INGENIERIE D'UN SYSTEME _{HOMME-MACHINE} SUPPORT DE MAINTENANCE AERONAUTIQUE.....	105
3.2.1.	<i>Organisation des relations d'interopération au cœur du processus de co-spécification</i>	105
3.2.2.	<i>Impact pour l'opérabilité et le domaine des architectes intégrateurs : proposition du rôle d'architecte du composant principal humain</i>	109
3.2.2.1.	Evolution organisationnelle de l'équipe architecte intégrateur, pilote de deux canaux de spécification.....	109
3.2.2.2.	Evolution des rôles et responsabilités de l'équipe architecte intégrateur	110
3.2.3.	<i>Conclusion : le processus de spécification d'un système homme-machine, compromis entre exigences méthodologiques et cycle-projet</i>	112
3.3.	CONCLUSION : UN CADRE INTEGRATIF POUR L'INGENIERIE BASEE SUR DES MODELES D'UN SYSTEME HOMME-MACHINE SUPPORT DE MAINTENANCE AERONAUTIQUE	113
	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	115
4.	ANNEXES	119

ANNEXE 1 : NIAM/ORM.....	119
ANNEXE 2 : INGENIERIE ET MODELISATION SYSTEME	125
<i>Présentation générale de l'ingénierie système</i>	125
<i>SysML : System Modelling Language</i>	127
ANNEXE 3 : DEVELOPPEMENTS LIES A L'EXIGENCE K_{LL1} (DUPONT ET AL., 2012).....	130
ANNEXE 4 : DEVELOPPEMENTS LIES A L'EXIGENCE M_{LL2} (DUPONT ET AL., 2012).....	132
ANNEXE 5 : DEVELOPPEMENTS LIES AUX EXIGENCES D'ALIGNEMENT VISUEL K_{LL2} ET K_{LL3} (DUPONT ET AL., 2012).....	135
ANNEXE 6 : DIAGRAMME DES EXIGENCES SYSTEME ITH_{LL}	140
ANNEXE 7 : PERCEPTION DE DEUX SIGNAUX SENSORIELS DANS LE CADRE D'UNE TACHE INTENTIONNELLE (MERY ET AL., 2012) .	141
5. GLOSSAIRE	143
ARTEFACT	143
CORTEX COGNITIF.....	143
INGENIERIE SYSTEME BASEE SUR LES MODELES.....	143
INGENIERIE ET MODELISATION DES SYSTEMES COMPLEXES	144
INVARIANT PERCEPTIF	145
MODE OPTATIF ET MODE INDICATIF	146
PHYSIOLOGICALISATION ET PHYSICALISATION.....	146
SIGNIFIANT-SIGNIFIE	146
SPECIFICATION SYSTEME	147
LISTE DES FIGURES	149
BIBLIOGRAPHIE	157

Autorisation de confidentialité du mémoire de thèse



Nancy, le 23 septembre 2013.

DIRECTION DE LA RECHERCHE ET DE LA VALORISATION
PM/MI/EB/2013-09/N° 129

Monsieur Gérard MOREL
Monsieur Dominique MERY
CRAN – LORIA
Campus Sciences

Objet : Demande de confidentialité de thèse.

Messieurs,

Vous avez sollicité de l'Université une demande de confidentialité du mémoire de thèse de Monsieur Romain LIBIER, pour une durée de 5 ans.

Après étude de votre demande auprès de notre service juridique, je vous accorde la confidentialité du manuscrit de thèse, pour une durée de 5 ans, soit jusqu'au 6 novembre 2018.

Je vous prie d'agréer, Messieurs, l'expression de mes sentiments les meilleurs.

Pour le Président et par délégation,
La Vice-Présidente du Conseil Scientifique


Clotilde BOULANGER

Copie à :

- Bureau de Gestion des Etudes Doctorales
- Monsieur Stephen CONNELLY - Airbus

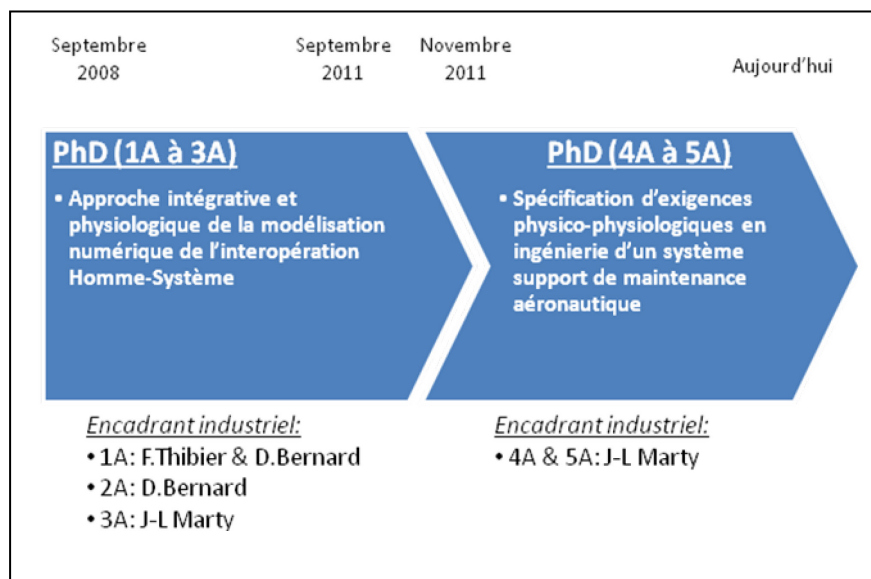
UNIVERSITÉ DE LORRAINE
34 COURS LÉOPOLD - CS 20234
54052 NANCY CEDEX
TEL. 03 83 50 62 00
CONTACT@UN-LORRAINE.FR
WWW.UN-LORRAINE.FR

Abréviations

AFIS = Association Française d'Ingénierie Système
AMM = Aircraft Maintenance Manual
AS = Architecte Système
ASH = Architecte Système Humain
AST = Architecte Système Technique
BST = Bureau de la Sécurité des Transports (Canada)
CAA = Civil Aviation Authority (UK)
CE = Chef d'Equipe
CMO = Chef de Maintenance Opérationnelle
CP = Composante Physiologique
CT = Composante Technique
DTP = Données Technico-Physiologiques
EASA = European Aviation Safety Agency
EP = Espace Problème
ES = Espace Solution
FAA = Federal Aviation Administration
FH ou **HF** = Facteurs Humains ou Human Factors
HFIM = Human Factors In Maintenance
INCOSE = International Council of Systems Engineering
IS = Ingénierie Système
ISBM = Ingénierie Système Basée sur les Modèles
LNB = Langage Naturel Binaire
LPPA = Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action
MEL = Minimum Equipment List
MTIP = Mathematical Theory of Integrative Physiology
NIAM = Nijssen Information Analysis Method
ORM = Object-Role Modelling
PDP = Product Development Process ou Processus de Développement Produit
PF = Problem Frame
TEA = Technicien d'Entretien Aéronautique
TAT = Turn Around Time
TPP = Transformation Physico-Physiologique
SysML = Systems Modelling Language

Introduction

Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse ont été réalisés dans le cadre d'une convention CIFRE n°393/2008 entre le département d'opérabilité d'Airbus Opérations, le Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN-UMR CNRS 7039) et le Laboratoire Lorrain d'Informatique et ses Applications (LORIA-UMR CNRS 7503). Cette convention a fait suite à deux collaborations réalisées précédemment au travers de mon stage de fin d'étude du Master « Sciences Cognitives et Applications » de l'Université de Nancy2 suivi d'un poste d'ingénieur de recherche contractuel me préparant à l'amélioration de l'intégration des facteurs humains en ingénierie d'un système de maintenance.



Chronologie des collaborations au cours de la thèse

A l'origine de ces collaborations, une analyse a posteriori d'un ensemble de constats d'incidents en phase d'exploitation des aéronefs (« In-Service Occurrence ») a mis en avant des défaillances au niveau de l'interopération entre les équipements techniques à maintenir et les opérateurs humains de maintenance. Dans la mesure où ces défaillances n'étaient pas clairement imputables au domaine technique, il s'est avéré pertinent d'initier des travaux de thèse quant à l'apport potentiel d'une « approche intégrative et physiologique de la modélisation numérique de l'interopération **Homme-Système** » pour en étudier la dimension **Facteurs Humains**. Des travaux antérieurs (Fass, 2002) ont en effet montré l'intérêt de la « Théorie Mathématique de la Physiologie Intégrative (MTIP) » de (Chauvet, 1993) pour modéliser l'interaction individu-environnement (au cœur de cette problématique) comme un tout physiologique, notamment pour l'aide au geste technique en réalité virtuelle (Figure 0-1). Nous avons exploré dans un premier temps cette voie d'intégration homme-machine (Fass & Lieber, 2009) (Lieber & Fass, 2011) dans l'objectif

d'améliorer les capacités des mannequins numériques d'un point de vue facteurs humains physiologiques en phase de « design ».

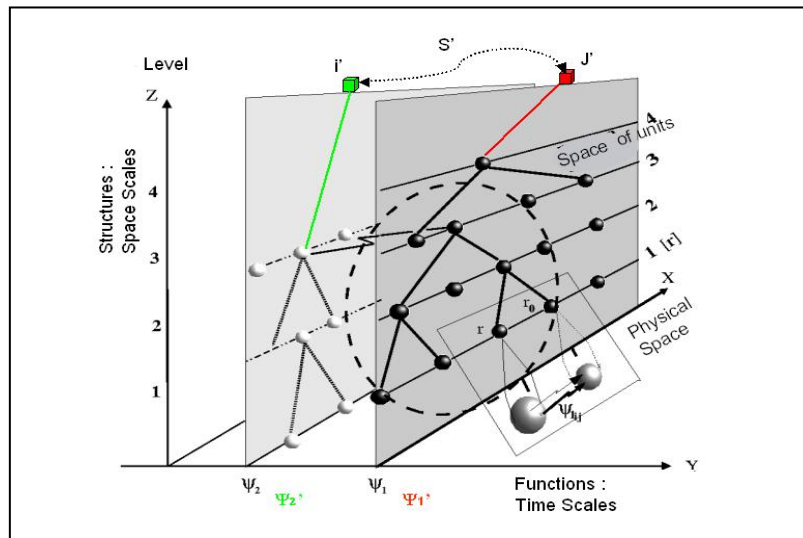


Figure 0-1 - Représentation dans le formalisme de la MTIP du couplage d'une "boucle sensorimotrice artificielle" (rouge et verte) avec un système biologique (Fass, 2006)

Cependant, il s'est avéré que les fondements de la MTIP, bien que pertinents pour construire des modèles explicatifs voire computationnels (Bennani, 2011) par des spécialistes, ne permettaient pas de construire les représentations physiologiques essentielles pour faciliter la collaboration multidisciplinaire requise par un processus d'Ingénierie Système Basée sur des Modèles (ISBM), en l'occurrence de processus physiologiques. Nous avons alors exploré la possibilité de spécifier des exigences physiologiques dans un langage de modélisation système, en l'occurrence « SysML » en tant que standard de facto, pour couvrir les trois dimensions d'une spécification en Ingénierie Système (Lieber et al., 2013) (Figure 0-2).

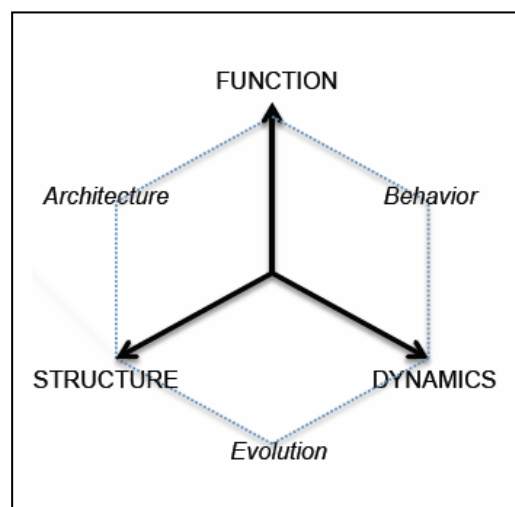
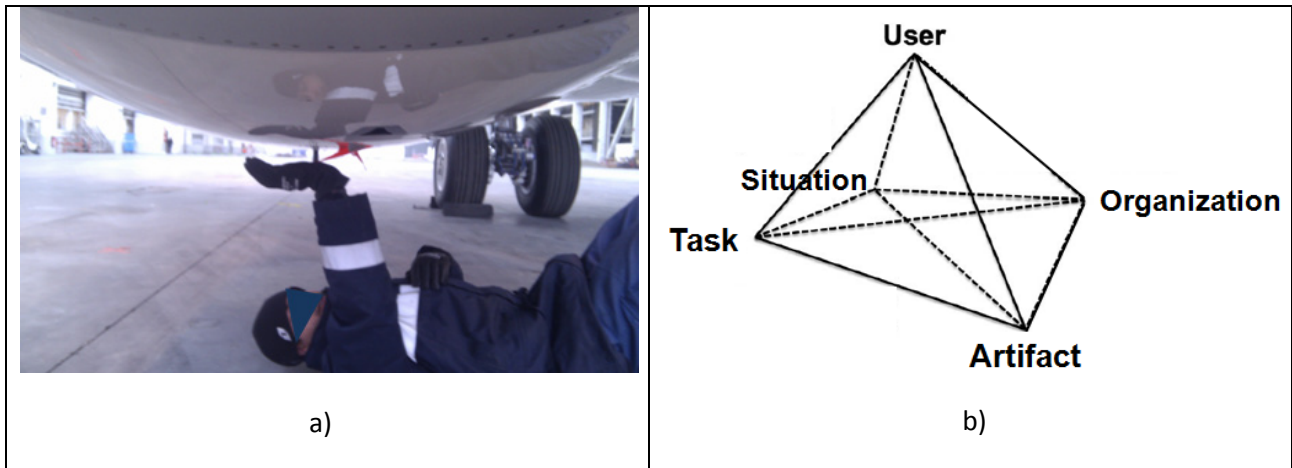


Figure 0-2 - Représentation Intégrative des éléments essentiels de modélisation d'un système biologique et d'un système artificiel (Lieber & Fass, 2011)

Une des qualités essentielles d'une exigence en spécification système est d'être mesurable, c'est-à-dire d'être couverte par un plan de vérification et validation avec des plages de réglage définies (Fanmuy, 2012). Cet aspect quantitatif de mesurabilité nous est apparu essentiel à l'amélioration de la prise en compte des facteurs humains en Ingénierie Système et nous a ainsi contraints à nous limiter à une situation de référence particulière de maintenance pour laquelle nous disposons de retours d'expérience (Figure 0-3a).



Plus précisément, notre situation opérationnelle de référence, présentée en détails en **Chapitre 1**, est celle du contrôle de la fermeture verrouillée d'un capot moteur par un opérateur de maintenance à la suite du remplacement d'un équipement. Cette situation peut être appréhendée comme un système homme-machine (Figure 0-3b) dont la performance résulte de la prise en compte en conception d'un certain nombre de facteurs de l'interaction homme-machine que (Boy, 2011) définit au travers de son modèle AUTOS.

Dans ce modèle, la performance du système homme-machine est appréhendée par le couplage entre plusieurs facteurs tels que :

- « Machine Factors » : ces facteurs sont associés au pôle A (pour « **Artifact** ») et sont de nature « *Hardware* » (analogique) et « *Software* » (numérique)
- « Human Factors » : ces facteurs sont associés au pôle U (pour « **User** ») et sont de nature *physique* (anthropométriques et biomécaniques), *physiologique* (ex : fatigue), *cognitif* (ex : décision, apprentissage) ou *social* (ex : conventions et normes sociales).

- « Interaction Factors » : ces facteurs sont associés aux trois pôles T-O-S (pour « **T**ask », « **O**rganization » et « **S**ituation ») et sont sous-divisés en facteurs de la *Tâche* (la procédure à exécuter), *Organisationnels* (la coopération/coordination entre les différents agents impliqués dans l'utilisation de l'artefact) et *Situationnels* (les contextes variables d'utilisation de l'artefact par l'utilisateur).
- Les relations entre les domaines (les nœuds du graphe) définissent des « *Human-Machine Interaction issues* » à appréhender en conception : (U-T) *Task and activity analysis* ; (T-A) *Information requirement and Technology limitations* ; (A-U) *Ergonomics and Training* ; (U-O) *Social issues* ; (T-O) *Role and Job analysis* ; (A-O) *Emergence and Evolution* ; (A-S) *Usability and Usefulness* ; (U-S) *Situation awareness* ; (T-S) *Situated actions* ; (O-S) *Cooperation/Coordination*.

Dans nos travaux, et relativement à notre situation d'intérêt, nous ne couvrirons pas l'ensemble des dimensions de l'interaction homme-machine définies par les relations entre les différents domaines du modèle. Nous nous concentrerons uniquement sur la dimension **A**(rtifact) – **U**(ser) en explorant l'interaction des processus physiques liés à l'artefact (le mécanisme de fermeture **et** verrouillage) et des processus physiologiques liés à l'utilisateur (l'opérateur de maintenance).

Ainsi, en **Chapitre 2** de ce mémoire, nous étudions l'interaction homme-machine tout d'abord sous l'angle de la théorie des *affordances* développée par (Gibson, 1977) et de ses interprétations ultérieures, afin de montrer que cette interaction est siège de communications symboliques 'affordées' par les propriétés physiques et physiologiques des objets en interaction dans une **Situation** (contexte) donnée.

Nous approfondissons ensuite la nature physiologique de cette communication en nous appuyant sur les travaux de (Berthoz, 2012) et de (Chauvet, 1993) pour comprendre les mécanismes physiologiques de propagation des interactions de perception-décision-action :

$$\Psi_{LL}$$

$$\text{Source}_{LL} \Rightarrow \text{Puits}_{LL}$$

Le résultat majeur de cette étude est de montrer la contingence de cette interaction à la bonne stimulation physico-physiologique d'un « Puits » biologique (**U**ser) à partir d'une « Source » physique externe telle que le mécanisme de fermeture **et** verrouillage (**A**rtifact). Nous mettons ainsi en évidence une condition nécessaire pour spécifier une exigence mesurable '**U-A**' de perception-action, bien que non suffisante du point de vue des « Interaction Factors » '**T-O-S**' (Milot et al., 2012) pour spécifier l'ensemble des modalités d'interaction.

Compte tenu des postulats établis sur le fonctionnement des processus physiologiques mis en évidence dans le chapitre 2 ainsi que des données disponibles en l'état des connaissances en physiologie/biologie intégrative, nous limitons notre étude en première partie du **chapitre 3** de notre mémoire à la spécification d'une interaction physico-physiologique visuelle, représentant l'une des modalités d'interaction sur notre Situation de référence.

Relativement à notre hypothèse d'amélioration de l'intégration des facteurs humains physiologiques par la spécification d'exigences mesurables, nous rationalisons ce processus de spécification en interprétant le cadre de modélisation de systèmes sociotechniques proposé par (Hall & Rapanotti, 2005) étendant celui originel des « Problem Frames » en génie informatique (Gunter et al., 2000). En cela, à ce facteur d'échelle réduit de spécification d'une interaction homme-machine, nous contribuons à améliorer la synergie entre « Systems Engineering » et « Human Engineering » (Boy, 2013).

Relativement à cela, nous nous plaçons dans une démarche de révision d'un scénario de spécification plausible relatif à notre situation d'intérêt et montrons, en partie 3.1.2, la possibilité de spécifier dans un environnement « SysML¹ » des exigences physico-physiologiques de perception satisfaisant les exigences opérationnelles liées à la remise en conditions opérationnelles.

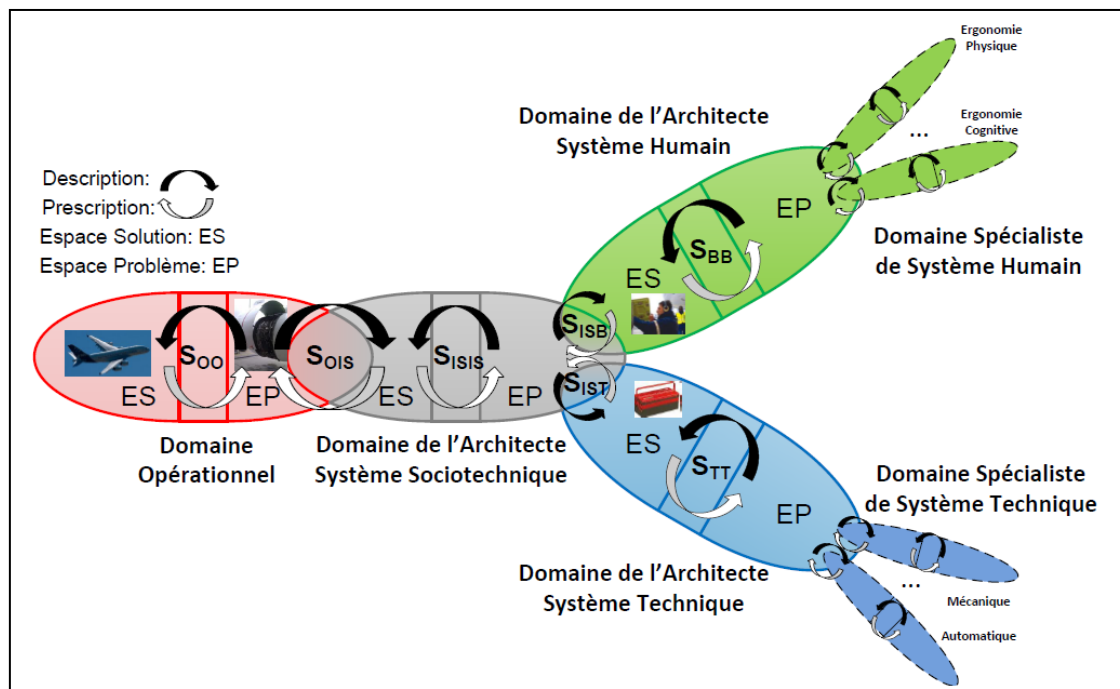


Figure 0-4 - Proposition d'une organisation d'ingénierie d'un système homme-machine support de maintenance. La spécification d'un tel système consiste en la mise en œuvre de relations d'interopération de description-préscription notées S, entre les espaces problème (EP) et solution (ES) intra et inter domaines ; adapté de (Bouffaron, 2012).

¹ <http://www.sysml.org/>

Cette spécification d'exigences physico-physiologiques met ainsi en évidence diverses interopérations entre le domaine technique et le domaine **facteurs humains** mais aussi au sein même de ce dernier domaine. Ces interopérations soulignent la nature collaborative du processus d'ingénierie d'un système homme-machine, à l'instar de ce que nous avons vécu au sein de ce projet collaboratif, et nous amène à nous interroger sur son mode d'organisation dans la deuxième partie de ce **chapitre 3**.

Nous formulons alors des recommandations pour mettre en perspective de l'actuelle prise en compte des facteurs humains en maintenance dans l'ingénierie système, une proposition d'organisation en Architecte Système (AS), Architecte Système Technique (AST) et Architecte Système Humain (ASH) pour mieux prendre en compte la dimension multi-échelles (Kuras, 2006) d'un système support de maintenance (Figure 0-4).

En conclusion de ce mémoire, nous soulignons le caractère très exploratoire de nos travaux et de leurs résultats. Ils permettent cependant, y compris de façon formative, de montrer que la synergie entre domaines techniques et facteurs humains est très largement perfectible, dès lors qu'on considère a priori le système homme-machine comme un TOUT à spécifier en tant que tel avant d'en allouer les fonctionnalités sur des composantes techniques et humaines.

La bibliographie de ce mémoire ne fait que renforcer la difficulté multidisciplinaire de ce type d'étude en Ingénierie Système.

Des annexes complètent ce mémoire, d'une part pour présenter « Object Role Modeling » support de la spécification 'U-A' en chapitre 2, et d'autre part pour présenter le langage de modélisation système standard (SysML) et les développements des modèles mathématiques essentiels à la compréhension de la spécification SysML en chapitre 3 qui ont fait l'objet d'un rapport confidentiel en deux parties (Dupont et al., 2012) (Mery et al., 2012).

Remarque : Ce mémoire comporte 3 chapitres. Chaque chapitre est divisé en trois parties (2 parties de développement et 1 partie de conclusion du chapitre). Nous identifions ci-dessous les liens entre les différents éléments de notre démarche de recherche abductive au travers du code couleur dans (Figure 0-5).

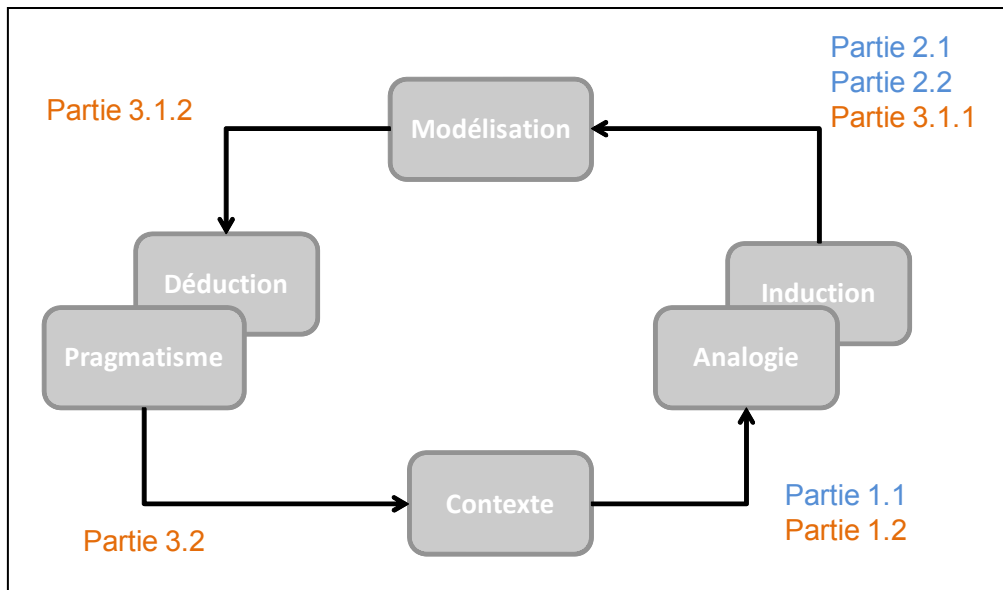


Figure 0-5 -Démarche du projet de thèse et Organisation du mémoire – le chapitre 1 est le chapitre de construction de la problématique où nous abordons le Système à Faire (partie 1.1) et le Système Pour Faire (1.2); le chapitre 2 est un développement détaillé relativement à la partie 1.1; le chapitre 3 est un développement détaillé (jusqu'à la proposition) relativement à la partie 1.2.

1. Contexte opérationnel et d'ingénierie d'un système support de maintenance aéronautique

Les performances opérationnelles d'un avion dépendent à la fois de la performance de ses composants principaux mais également de celle de ses systèmes de support tels que la maintenance. Cette dernière organise l'ensemble des actions techniques, administratives et de management durant la phase d'exploitation de l'avion, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir sa mission. Les actions techniques correspondent aux opérations de maintenance à proprement parler, c'est-à-dire mettant en jeu à la fois des éléments humains (opérateurs de maintenance) et des éléments techniques (procédures et outils) pour maintenir un système avion.

La maintenance opérationnelle doit être la plus performante possible pour assurer la remise en conditions opérationnelles de l'appareil. Or, aujourd'hui, on dénombre un certain nombre d'incidents survenus en phase d'exploitation par les compagnies aériennes d'aéronefs qui peuvent être directement liés à des problèmes de performance des opérations de maintenance. Plus précisément, l'origine de ces incidents peut être expliquée par des facteurs humains, appelés aussi erreurs humaines, liés aux opérations de maintenance s'étant déroulées antérieurement.

Bien qu'un certain nombre d'exigences, que nous représentons sous la forme d'un diagramme d'exigence en (Figure 1-1), soient prises en compte dès la phase d'ingénierie pour anticiper ces problèmes opérationnels, il n'en demeure pas moins que l'intégration des facteurs humains en maintenance reste encore perfectible, malgré les efforts réalisés, du fait du caractère « difficilement prévisible » du comportement humain.

Ainsi, dans ce chapitre 1, nous proposons de présenter plus en détails les opérations de maintenance d'un avion ainsi que les types d'erreurs humaines ayant été commises. Pour cela, nous proposons une analyse basée sur des retours d'incidents en service et explicitons ces faits au travers de la présentation d'un incident récurrent en opérations des aéronefs. Ceci nous amène ensuite à nous interroger sur les processus d'ingénierie mis en place pour concevoir ces opérations de maintenance ainsi qu'à souligner la manière dont les facteurs humains sont intégrés.

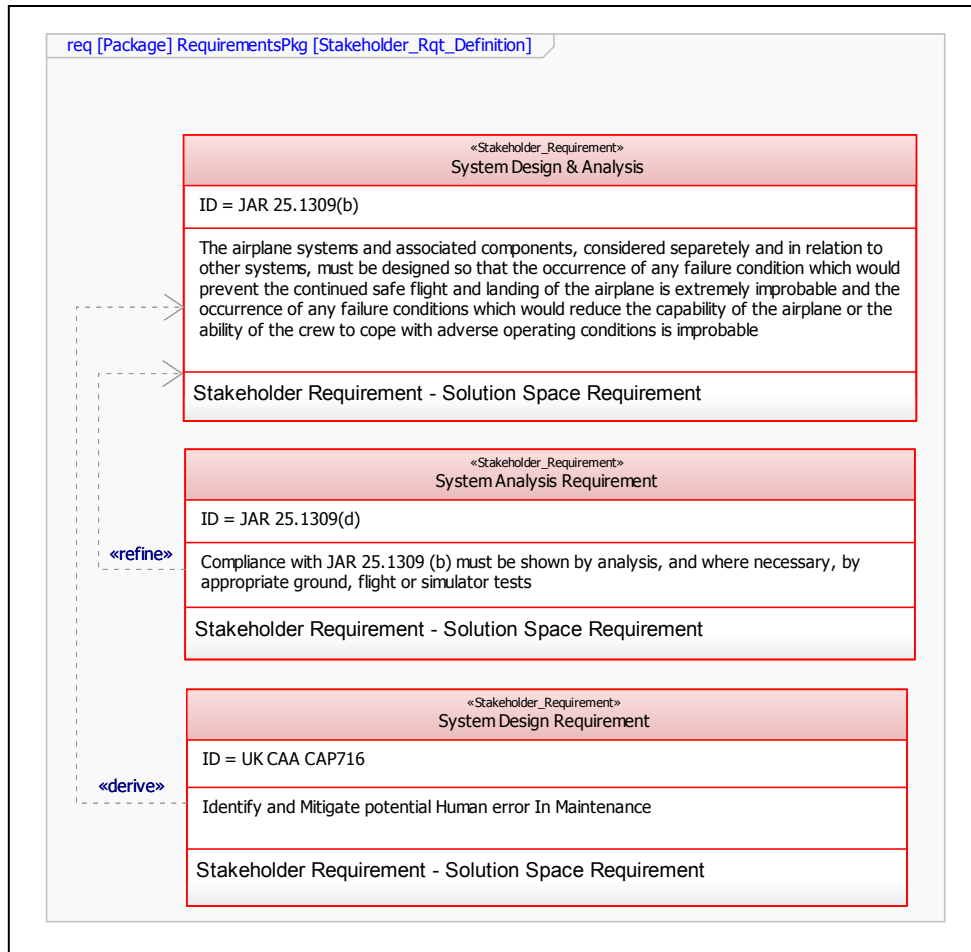


Figure 1-1 - Diagramme des exigences réglementaires liées à la gestion et la prise en compte des erreurs humaines de maintenance établies par les autorités de certification du transport aérien (EASA & FAA)

1.1. Contexte opérationnel : facteurs humains en maintenance aéronautique

Dans cette partie, l'objectif est de présenter ce que sont les opérations de maintenance dans un contexte aéronautique et ce qu'elles impliquent de la part des intervenants humains. Nous proposons également, sur la base d'un ensemble de résultats d'analyse d'incidents en service (« *in service occurrence* »), d'identifier les zones d'améliorations prioritaires liées aux opérations de maintenance pour garantir le niveau de performance opérationnelle attendu et satisfaire les exigences réglementaires précédemment présentées.

1.1.1. Les opérations de maintenance aéronautique

L'objectif sous-jacent aux opérations de maintenance d'un aéronef est de remettre ce dernier en conditions opérationnelles de vol, afin qu'il puisse réaliser sa mission principale, à savoir *transporter en toute sécurité des passagers*. Ces opérations sont de plusieurs types et sont réalisées dans des conditions environnementales variables.

1.1.1.1. Spécificités des opérations de maintenance aéronautique

Les opérations de maintenance aéronautique peuvent être catégorisées génériquement en deux types : les opérations de maintenance programmée et les opérations de maintenance non programmée encore appelées maintenance d'escale (Cameron, 2002).

Opérations de maintenance programmée

Celles-ci correspondent à des opérations de vérifications périodiques, d'entretien et de remise en état, qui sont fixées à l'avance relativement à la durée de vie des équipements (Figure 1-2). Ces opérations peuvent survenir soit au bout d'un nombre d'heures de vol prédéfinies, soit à l'occasion d'une butée calendaire. Elles suivent un même processus qui débute par la réception de l'avion à la date prévue de maintenance, puis par la planification et la répartition des tâches, et enfin par la réalisation de ces dernières et l'inspection finale donnant lieu à la signature du « *release* » de l'avion (« Aircraft Certificate of Release to Service and Maintenance Statement »).

Plus précisément, on distingue 4 grands types de maintenance programmée qui sont réglementés par les grandes autorités de réglementation du transport aérien (FAA pour les Etats-Unis, EASA pour l'Europe) :

- « Check A » : Ce type d'opérations est réalisé en moyenne toutes les 650 heures ou 300 cycles². Il requiert entre 20 heures et 50 heures de travail manuel et est habituellement réalisé durant la nuit sur le tarmac de l'aéroport ou en hangar.
- « Check B » : Ce type d'opération est réalisé tous les 4 à 6 mois et requiert environ 150 heures de travail manuel sur 2-3 jours dans un hangar.
- « Check C » : Ce type d'opération est réalisé tous les 15 à 21 mois ou au bout du nombre d'heure spécifique spécifiées par le fabricant. Ce type d'opération est réalisé en hangar et plus particulièrement à la base principale à laquelle l'avion appartient.
- « Check D » : Ce type d'opération est réalisé tous les 5 ans. Il s'agit d'opérations de maintenance couvrant la totalité des systèmes et fonctions de l'avion. Il requiert jusqu'à 50000 heures de travail manuel et peut durer jusqu'à deux mois et est réalisé à la base principale (« main base »).



Figure 1-2 - Opérations de maintenance programmée

Opérations de maintenance non-programmée

Celles-ci correspondent aux opérations de maintenance quotidiennes (« daily maintenance »), à une fréquence plus élevée que les précédentes, et comprennent à la fois les opérations en ligne (maintenance en ligne) telles que l'inspection, le remplacement de pièces inspectées usées, l'ajustement et le calibrage d'équipements ou parties mécaniques, voir le nettoyage. Il peut s'agir aussi d'opérations de maintenance plus conséquentes liées à

² Un cycle correspond à un couple « décollage-atterrissage »

la panne non-prévue d'un équipement ne pouvant être placé sous « Minimum Equipment List » (MEL), obligeant à réaliser l'opération de maintenance nécessaire en ligne : c'est-à-dire au cours du « Turn Around Time » (TAT) se définissant comme l'intervalle de temps entre l'immobilisation de l'avion (à l'atterrissage) et sa prochaine utilisation (décollage). Ce type d'opérations se réalise la plupart du temps à l'aire de stationnement de l'avion (Figure 1-3).

Lorsque la panne non-prévue impacte significativement la navigabilité de l'avion, les opérations de maintenance sont réalisées sur une zone dédiée sur le tarmac à l'écart du trafic de l'aérodrome, voire en hangar.



Figure 1-3 -Opérations de maintenance non-programmée en ligne

En conclusion, l'ensemble de ces opérations de maintenance (les deux types) sont reportées dans les manuels de maintenance, encore appelés « Logbook », qui contiennent les informations sur la nature des opérations ayant été effectuées. Ces manuels peuvent être soumis à l'approbation des autorités de tutelle et les informations qu'ils contiennent sont contrôlées par chaque compagnie aérienne.

Formation et qualification des opérateurs

Les opérations de maintenance, et par conséquent les différentes tâches qui les composent, ne peuvent être réalisées que par un personnel formé et qualifié, en accord avec les réglementations en vigueur établies par les autorités de certification en charge du contrôle des activités aéronautiques (ex : EASA-EC2042/2003 ou EASA Maintenance Organisation Part 145).

La formation concerne le sujet des différents métiers impliqués dans les opérations de maintenance. On y trouve des métiers de gestion et vérification/validation (chef d'équipe,

coordinateur de la maintenance opérationnelle), ainsi que les opérateurs de maintenance³ à proprement parlé (c'est à cette catégorie d'intervenant que nous nous intéresserons). Parmi ces opérateurs, on peut distinguer deux grandes compétences : les mécaniciens aéronautiques, encore appelés techniciens d'entretien aéronautique, pouvant être spécialisés par rapport aux différentes natures de systèmes techniques à opérer, et les électroniciens-électriciens aéronautiques. La formation des personnels relève du périmètre de la compagnie aérienne, lorsqu'elle détient les ressources humaines effectuant la maintenance, ou des sociétés de prestation auxquelles cette dernière peut faire appel.

La qualification quant à elle concerne la certification d'un niveau d'autonomie et de responsabilités pour exercer et opérer au sein du domaine des opérations aéronautiques sur un type d'appareil donné (ex : Single Aisle, Long Range, Double Deck). Ces certifications définissent entre autres les conditions d'utilisation et le périmètre de validité des licences de maintenance délivrées aux opérateurs. La réglementation EASA définit ainsi quatre catégories de licences de maintenance correspondant à des niveaux de capacités minimum requises en regard de la responsabilité propre aux tâches et actions pouvant être réalisées :

- **catégorie A** : autorise son détenteur à délivrer des certificats de remise en service après des opérations de maintenance en ligne programmées mineures et des rectifications de défauts simples.
- **catégorie B1** : autorise son détenteur à délivrer des certificats de remise en service après des opérations de maintenance comprenant celles sur les moteurs et les systèmes mécaniques et électriques, ainsi que celles de remplacement d'un élément avionique n'exigeant que des tests simples pour démontrer son bon fonctionnement.
- **catégorie B2** : autorise son détenteur à délivrer des certificats de remise en service après des opérations de maintenance sur des systèmes avioniques et électriques.
- **catégorie C** : autorise son détenteur à délivrer des certificats de remise en service après des opérations de maintenance en « main base », c'est-à-dire des opérations lourdes réalisées principalement en hangar.

Cette présentation des deux types d'opérations de maintenance met en avant les différentes contraintes temporelles et environnementales de la maintenance aéronautique qui amènent in fine les opérateurs à devoir agir et s'adapter à des contextes différents et variables favorisant ainsi les possibilités de commettre des erreurs de maintenance quel que soit leur niveau de formation et de qualification.

³ Métiers de la maintenance des aéronefs sur <http://www.aeronautique.ac-versailles.fr/spip.php?rubrique11>

1.1.1.2. Erreurs humaines en opérations de maintenance

Nous proposons dans cette partie de présenter la problématique des erreurs humaines et de partager les résultats d'une analyse (a posteriori) d'incidents en service qui nous permettent de mieux cibler les éléments critiques des opérations de maintenance (quel que soit le type).

Erreurs humaines

Les erreurs humaines en maintenance peuvent se définir comme des défaillances dans la réalisation d'une tâche spécifique pouvant conduire à la perturbation d'un programme d'opérations ou engendrer un dommage sur un composant (Dhillon, 2006). Plus précisément, ces défaillances traduisent une situation anormale, en opposition à une situation attendue nominale, qui est soit détectée par l'opérateur humain, dans ce cas l'erreur est un facteur de renforcement de l'apprentissage, ou soit non détectée, dans ce cas elle passe inaperçue et l'opérateur n'envisage alors aucune action corrective. C'est cette deuxième dimension de l'erreur qui pose aujourd'hui problème notamment en maintenance aéronautique.

La réalisation d'une erreur humaine serait la conséquence de l'atteinte de la fiabilité humaine, définie comme la capacité d'un opérateur humain à réaliser une tâche avec succès à n'importe quelle phase de fonctionnement d'un système sur un intervalle de temps donné (Nicolet et al., 1989), par des événements internes ou externes à celui-ci. Les événements internes à l'opérateur correspondent à son niveau de motivation dans le travail, à son état physiologique et psychologique (sur ou sous-charge mentale) ou à son manque de connaissance (savoir-faire restreint). Les événements externes sont ceux qui sont liés aux caractéristiques de la tâche à réaliser (régularité, fréquence), du procédé opéré ou encore de l'environnement de travail.

Dans la partie suivante, nous faisons état des types d'erreurs de maintenance caractérisant la situation en termes de proportion d'incidents due à des erreurs humaines.

Analyse des erreurs humaines en maintenance

Cette analyse est basée sur des retours de compagnies aériennes clientes ayant répondu aux questionnaires mis en place par Airbus en 2006 et dont les résultats détaillés sont présentés dans (Airbus, 2006).

Un premier niveau d'analyse permet de répartir les différentes erreurs de maintenance en fonction de la nature des opérations effectuées. Le constat, présenté dans la (Figure 1-4), montre que les tâches d'installation sont les plus incriminées. Ce premier résultat peut s'expliquer de manière générique par le fait qu'à la dépose d'un équipement, il y a une

manière physique de le démonter alors qu'à la repose ou nouvelle installation les possibilités physiques sont plus nombreuses malgré l'utilisation de procédures.

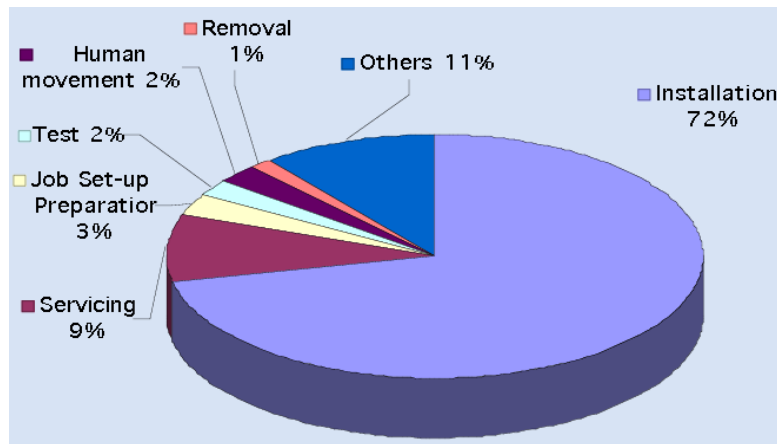


Figure 1-4 - Répartition des erreurs de maintenance selon le type d'opérations de maintenance (Airbus, 2006)

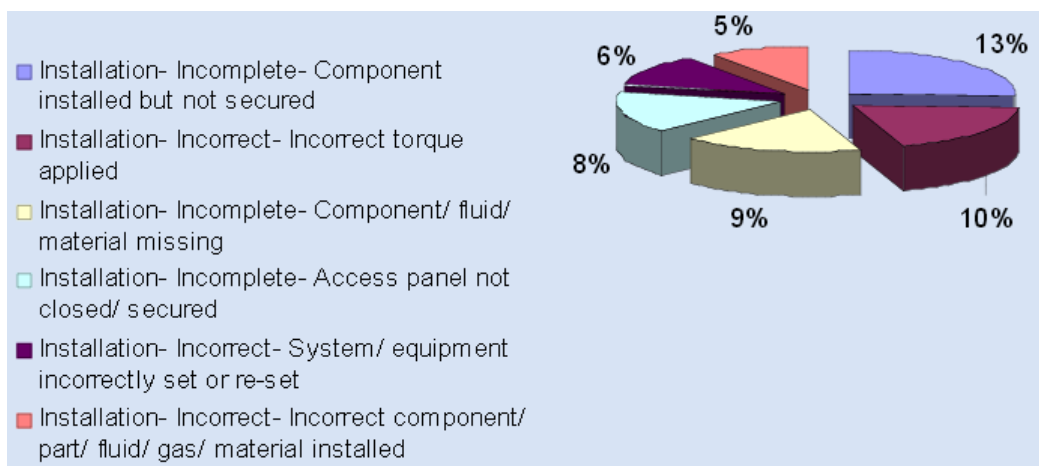


Figure 1-5 - Catégorisation des types d'erreurs de maintenance pour les opérations d'installation (Airbus, 2006)

Un deuxième niveau d'analyse, cette fois-ci centré sur les opérations d'installation, permet de catégoriser au sein de cette famille d'opérations les types d'erreurs de maintenance (Figure 1-5). Le constat porte avant tout sur des installations défectueuses (« incomplete/incorrect installation »). Ces types d'installations correspondent à celles qui ne respectent pas le standard défini pour le fonctionnement nominal et optimal d'un équipement : mauvaise orientation ou mauvais positionnement. Ce type d'erreurs peut également être regroupé avec les installations incomplètes qui correspondent au fait qu'une opération d'installation ne s'est pas réalisée jusqu'au bout (ex : inspection visuelle finale manquante).

1.1.1.3. Conclusion : Les opérations d'installation au centre des incidents opérationnels

Les résultats présentés ci-dessus montrent que l'intérêt doit, en premier lieu, se porter sur les opérations d'installation pour améliorer significativement les performances opérationnelles de l'avion. En effet, comme souligne (Reason et al., 2006), les opérations de repose/ré-installation/remontage sont plus vulnérables à l'erreur car elles induisent davantage de charge cognitive (mémorisation et attention) augmentant la probabilité d'erreurs. Par exemple (Figure 1-6), il n'existe qu'une seule manière de démonter les écrous d'un boulon (l'un après l'autre) alors que pour les remonter il faut plus de ressources cognitives pour assurer le remontage dans l'ordre.

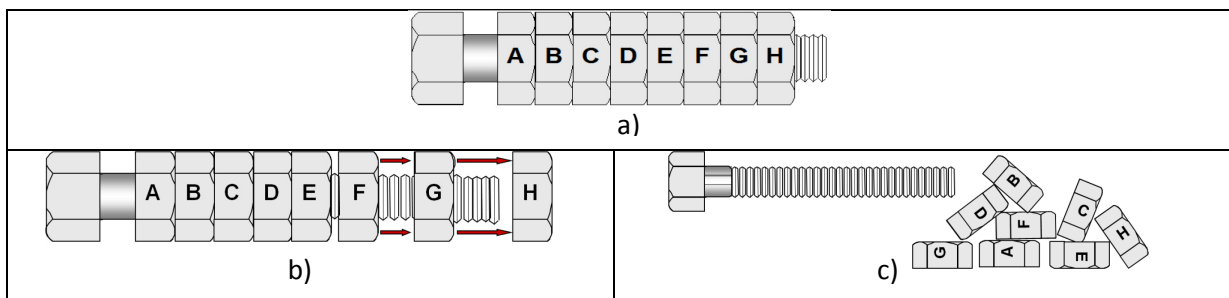


Figure 1-6 – a) l'objectif à atteindre ; (b) une seule manière de démonter et (c) plusieurs manières de remonter les écrous

Par ailleurs, ces résultats restent cohérents avec une analyse antérieure menée par (Boeing, 1994) montrant bien que ce type de problème opérationnel est partagé quel que soit le type d'appareil. Ceci renforce également l'intérêt de se préoccuper à plus grande échelle de ce sujet, pour éventuellement faire évoluer les exigences réglementaires. Dans la partie suivante, nous nous intéresserons à un cas particulier d'opérations dans le cadre des tâches d'installation incomplètes pour lequel on dénombre plusieurs incidents en exploitation.

1.1.2. Le cas opérationnel de la fermeture verrouillée d'un capot moteur suite à l'installation d'un équipement

Nous présentons ci-après le cas d'étude qui nous servira de fil conducteur tout au long de ce mémoire. Il s'agit de la vérification et validation par divers opérateurs de terrain d'une exigence opérationnelle de Fermeture et Verrouillage (notée R_{LL}) d'un capot moteur lors de la clôture d'une intervention de maintenance et d'une inspection pour remise en condition opérationnelle de vol (Figure 1-7).

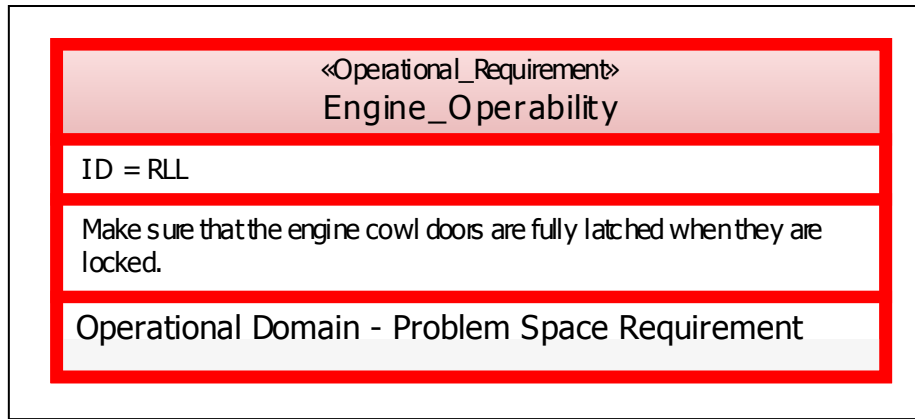


Figure 1-7 - Exigence Opérationnelle R_{LL}

Divers retours d'expérience à l'issue de rapports d'incidents en vol après des opérations de maintenance au sol (Rapport BST, 2000) ont conduit à spécifier de nouvelles exigences opérationnelles par le constructeur de l'avion ou à mettre en œuvre des recommandations complémentaires par les exploitants (REC_{LL}) (Figure 1-8).

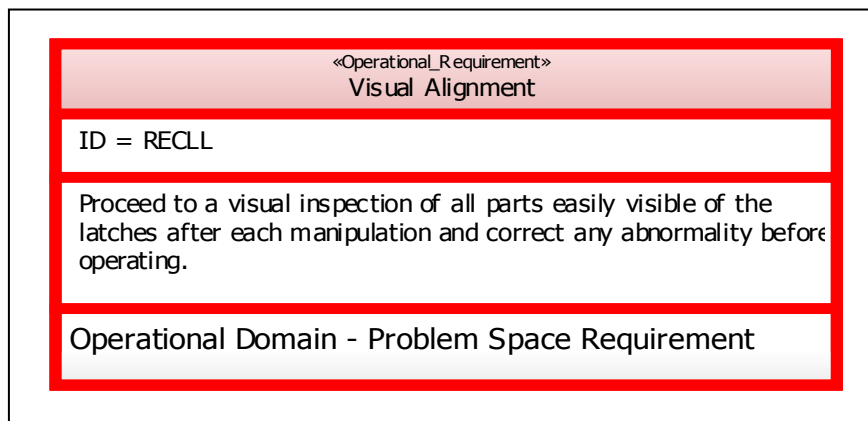


Figure 1-8 - Recommandations complémentaires REC_{LL} sous forme d'exigence

1.1.2.1. Les capots moteur et le système de fermeture ET verrouillage

Un capot est un panneau en composite habillant le moteur, dont la fonction est de protéger et de faciliter l'accès à certains éléments du moteur. Il est composé de deux parties mobiles symétriques, s'ouvrant de bas en haut (Figure 1-9). En position nominale, les deux parties sont rapprochées l'une de l'autre grâce à un système de fermeture **et** verrouillage, et sont à ras avec les parties fixes du moteur (contraintes aérodynamiques).

La mauvaise fermeture **et** verrouillage des capots, suite par exemple au changement d'une conduite d'huile moteur, peut engendrer en vol une résistance à l'air causant la perte de

certaines parties du capot. La tâche de fermeture des capots ne nécessite pas d'outillage particulier. Elle fait suite à une première action d'ouverture des capots durant laquelle l'opérateur doit déverrouiller manuellement (avec ou sans gants) le système d'ouverture-fermeture (Figure 1-10).

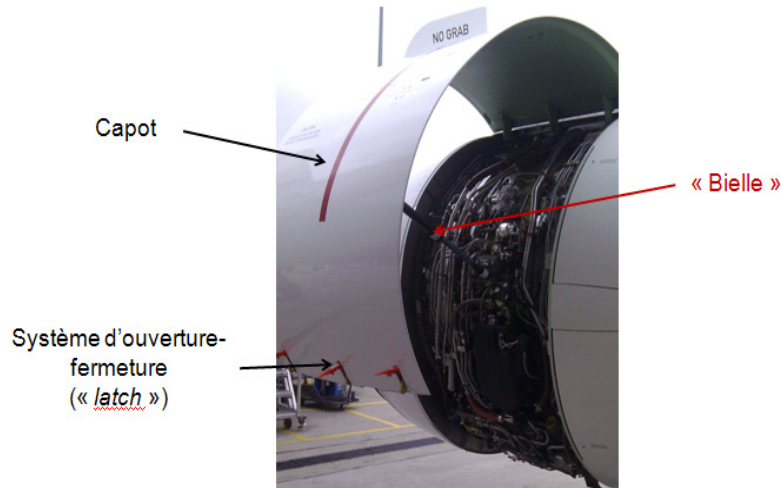


Figure 1-9 - Capot moteur d'un avion au sol

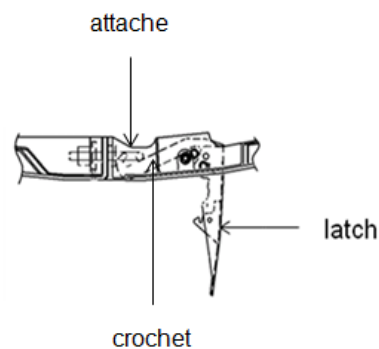


Figure 1-10 - Vue latérale schématique du système et mécanisme de fermeture et verrouillage

Le déverrouillage a pour objectif de retirer le crochet situé sur le capot extérieur, de l'attache située sur le capot intérieur (vers le fuselage). Nous décrivons la procédure associée à cette tâche dans la partie suivante.

1.1.2.2. Spécification technique de la procédure de fermeture ET verrouillage

Le mécanisme de fermeture et verrouillage est conçu pour être manipulé par un Technicien d'Entretien Aéronautique (TEA) qui s'appuie sur un document papier (Figure 1-11) afin de réaliser les tâches qui lui sont affectées, par exemple le remplacement d'une conduite d'huile dans le cas du rapport BST.

Ce document, appelé aussi procédure, contient non seulement une description textuelle et schématique de l'ensemble des actions à réaliser pour remplacer le composant (partie 4 des procédures « 4. *Procedure* ») mais également celles pour ouvrir les capots (partie 3 de la procédure de remplacement de la conduite « 3. *Job set-up* »), renvoyant à une procédure spécifique d'ouverture des capots qui est structurée de la même manière et les fermer (partie 5 de la procédure de remplacement de la conduite « 5. *Close-Up* »), renvoyant à la procédure spécifique de fermeture des capots.

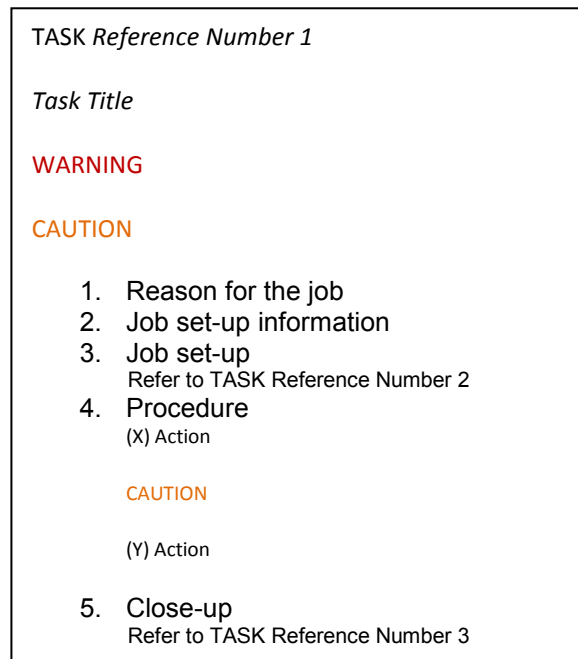


Figure 1-11 - Structuration d'une procédure de maintenance

Ces procédures décrivent la mise en œuvre ou « contextualisation » de l'enchaînement idéal des actions à opérer selon (Figure 1-12).

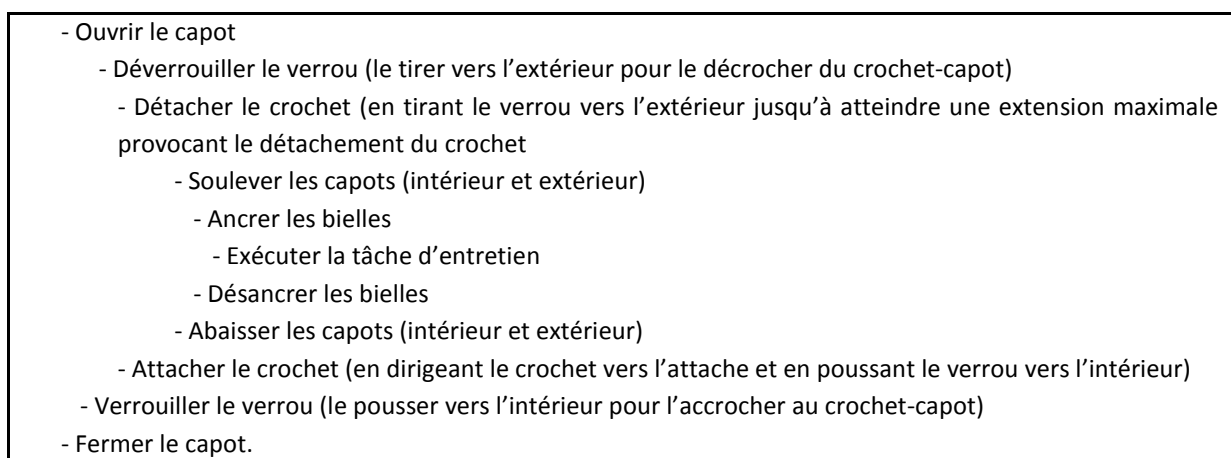


Figure 1-12 - Séquence formelle de Fermeture et Verrouillage (adaptation de la méthode KOD (Vogel, 1988))

Le mécanisme de fermeture et verrouillage satisfait la spécification technique de Fermeture **et** Verrouillage « Latch **and** Lock » (Verries, 2010), à la condition que le « contrôleur Humain » soit capable de s'assurer que les verrous sont bien enfoncés **et** à ras avec la surface des capots (Figure 1-13) dans des conditions opératoires variées en fournissant l'énergie physiologique requise (pré-actionnement) tout en maintenant son attention sur les tâches à effectuer pour la procédure ciblée ainsi que sur celles des procédures d'ouverture et de fermeture des capots.

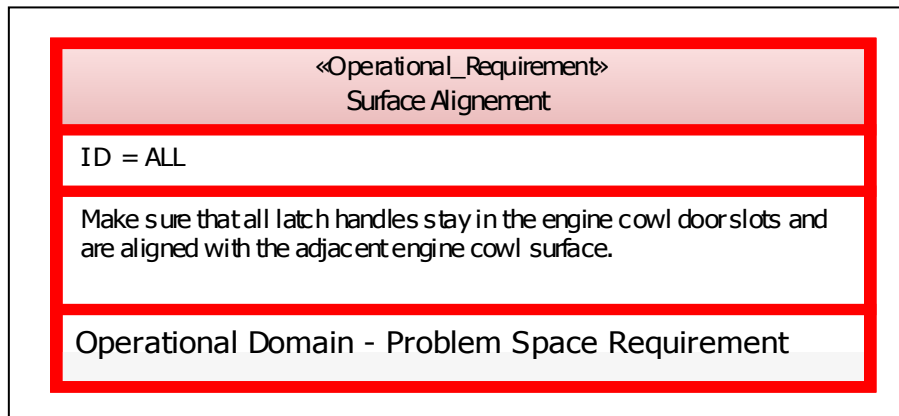


Figure 1-13 - Exigence de contrôle de d'alignement des verrous avec la surface des capots

Remarque : Relativement à ce fait de deux signaux à contrôler, nous avons étudié formellement la question du nombre de signaux qu'un observateur doit et peut percevoir, et présentons les résultats en Annexe 7.

Ainsi, les procédures d'ouverture et de fermeture des capots sont imbriquées dans celles du remplacement du composant (conduite d'huile). Chaque procédure possède par ailleurs ses propres avertissements (WARNING et CAUTION), qui représentent autant de précautions à prendre au cours de la réalisation de la tâche spécifique. Dans notre cas, on dénombre une dizaine de ces labels qui sont soit posés en préambule de la procédure, soit intercalés chronologiquement entre deux actions de la procédure. Ces avertissements portent à la fois sur la sécurité de l'opérateur et de l'avion.

L'objectif sous-jacent à la structuration de la procédure et la présence des messages d'avertissement est d'assurer le retour en conditions opérationnelles de l'avion en satisfaisant l'exigence R_{LL}. On peut cependant s'interroger sur la charge cognitive qu'ils induisent.

1.1.2.3. Spécification homme-machine de la procédure de Fermeture ET Verrouillage

Cette vérification s'effectue en pratique dans un contexte sociotechnique d'interactions (Figure 1-14) du technicien d'entretien (TEA) avec un chef d'équipe (CE) et un coordinateur de maintenance et d'opérations (CMO), qui vont appliquer les procédures de vérification de R_{LL} par des inspections complémentaires et/ou un rapport. En outre, il semble toléré que cette procédure ne soit pas entièrement satisfaite par un TEA lors d'interventions multiples sur le même appareil, ce qui justifie qu'elle doit être in-fine satisfaite par le chef d'équipe.

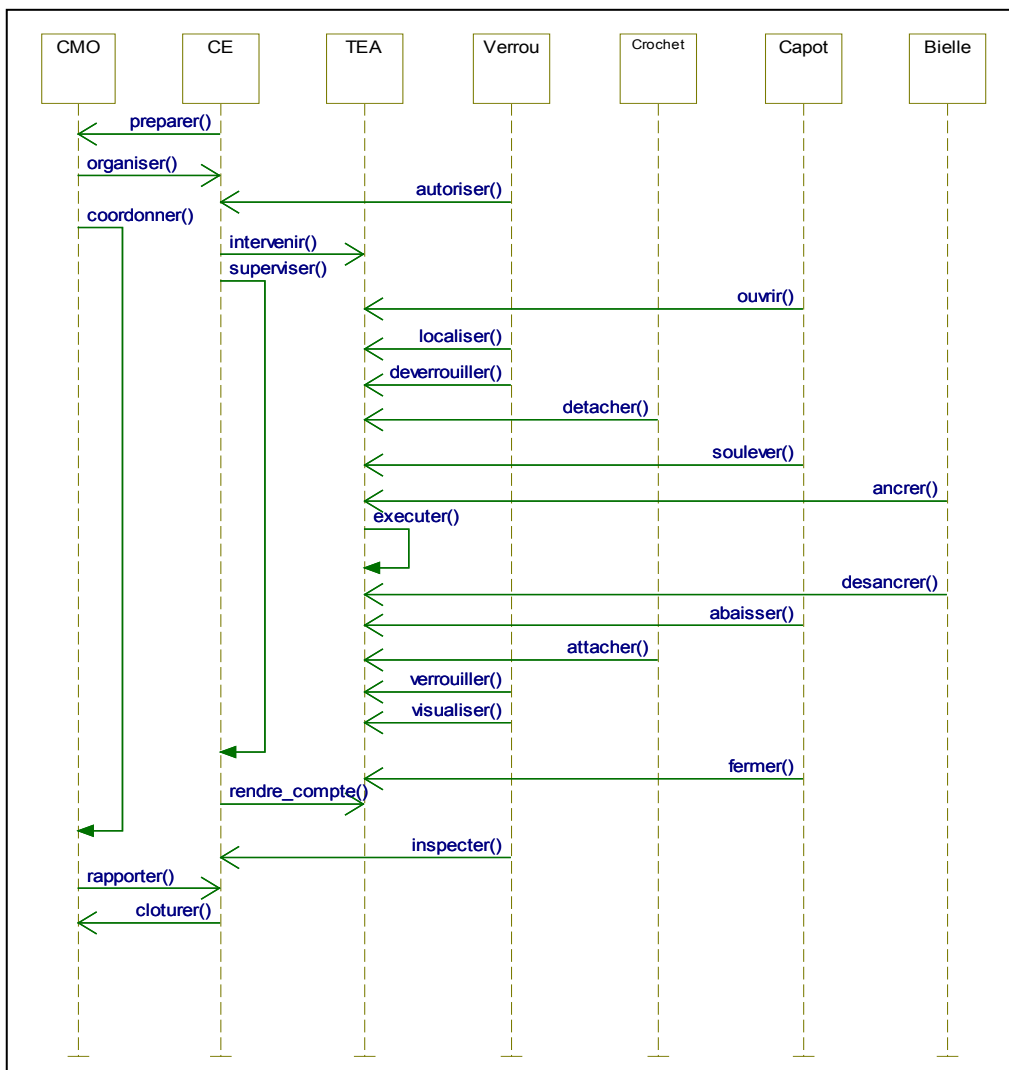


Figure 1-14 - Scénario opérationnel de Fermeture et Verrouillage d'un capot-moteur en opération de maintenance aéronautique, basé sur (Rapport BST)

Divers rapports d'incidents montrent aussi que cette situation peut encore être complexifiée par des changements d'équipes entraînant une nouvelle exigence opérationnelle en retour d'expérience (REX_{LL}) pour le TEA (Figure 1-15).

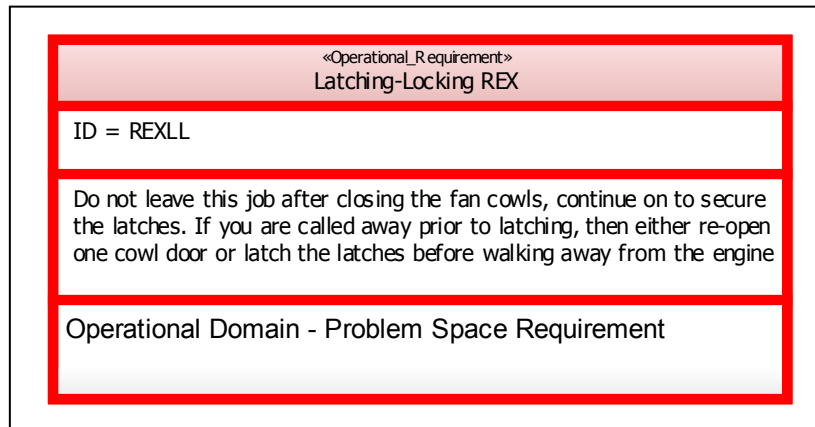
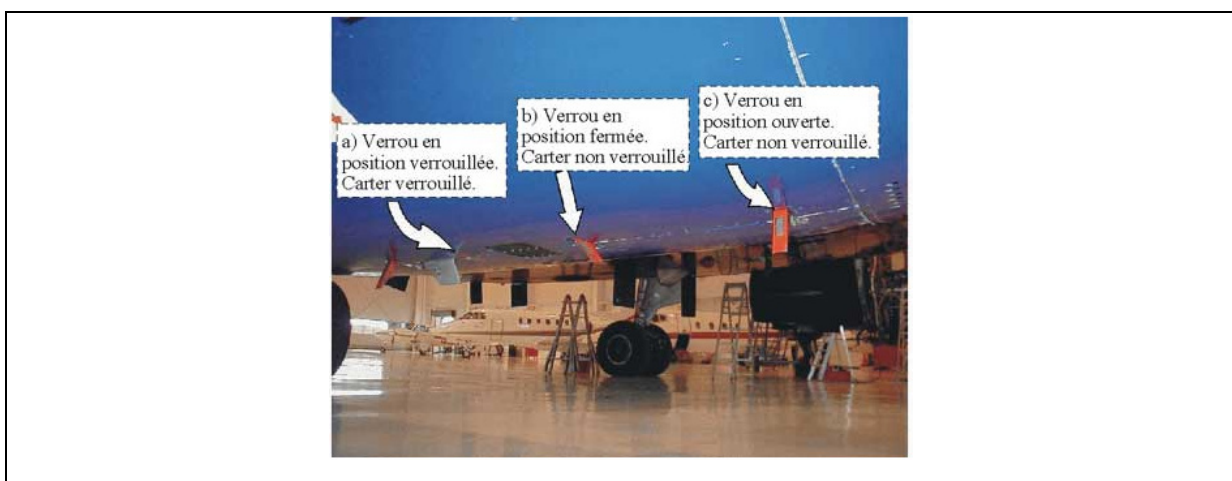


Figure 1-15 - Retour d'expérience REX_{LL} sous forme d'exigence

Enfin, malgré un effort important de rédaction des procédures en anglais simplifié et d'ajout de Warning et Caution, la difficulté de garantir opérationnellement ces exigences amène diverses recommandations pour satisfaire cette exigence «Latch **and** Lock» par perception :

- visuelle d'une « absence » d'un signal de couleur orange peint sur chaque verrou (fonction «Latch») (Figure 1-16).
- tactile du «bon» affleurement des capots intérieurs et extérieurs (fonction « Lock »)



Les capots moteurs possèdent plusieurs verrous qui se ferment sous le réacteur. Les portes des capots sont lourdes et conçues de manière à ce que, lorsqu'elles pendent sans support, elles se joignent bord à bord, donnant l'impression qu'elles sont verrouillées même si elles ne le sont pas. Normalement, les verrous peuvent se trouver dans les trois positions suivantes : a) verrous complètement verrouillés et ne dépassant pas sous les capots; b) verrous fermés, mais non verrouillés. Dans ce cas, les verrous dépassent d'environ un pouce sous les

*capots. Il s'agit de la position normale des verrous après l'ouverture des capots par le personnel de maintenance, et ce, jusqu'à ce que les verrous soient verrouillés de nouveau; c) verrous complètement ouverts et déverrouillés. Il s'agit d'une situation temporaire qui survient après le déverrouillage des capots. Un verrou complètement ouvert dépasse d'environ **quatre pouces** sous les capots (BST Rapport)*

Figure 1-16 - Contrôle par perception d'un signal visuel orange de l'état de Fermé **et** Verrouillé d'un capot moteur (Rapport BST)

L'incidence d'une «bonne» perception de ces «avertisseurs sensoriels» par les parties prenantes concernées est une des conditions vitales pour vérifier R_{LL} et valider la remise en condition opérationnelle de vol de l'avion.

1.1.2.4. Conclusion : la forte contingence des opérations de maintenance à l'égard du contexte

Cette présentation structurée d'une opération de maintenance permet de montrer que les conditions opératoires de la vérification et validation de l'état fermé **et** verrouillé des capots sont, mise à part les questions de formation et de qualification des opérateurs, très sensibles au contexte sociotechnique de maintenance ainsi qu'au type d'appareil. Ce constat peut être plus largement étendu à l'ensemble des opérations de maintenance. En effet, elles sont amenées à se dérouler n'importe où et n'importe quand, selon des organisations particulières bien que réglementées augmentant les chances de survenue d'erreurs humaines.

Ce constat invite, par ailleurs, à envisager leur conception d'une manière plus agile (Ruault, 2011), au sens de l'ingénierie des systèmes résilients (Hollnagel, 2006), ou en cherchant à adapter pour ce type de contexte, l'approche de conception sûre de fonctionnement proposée par (Riera, 2012), définie à l'origine pour des contextes moins variables, visant à filtrer, à l'aide de contraintes logiques en synthèse de la commande, le mauvais usage du système technique conduit par un opérateur humain.

1.1.3. Conclusion : les opérations de maintenance vues comme un système homme-machine support de maintenance aéronautique

Les spécificités et caractéristiques des opérations de maintenance décrites dans cette première partie du chapitre 1 nous amènent à appréhender in fine notre situation particulière d'intérêt comme un système support de maintenance aéronautique.

En effet, une opération de maintenance peut être appréhendée, d'un point de vue structurel, comme un ensemble **intégré** et **en interaction** de Produits (techniques) à maintenir, de Personnes (opérateurs de maintenance) et de Procédures (« AMM procedure ») que ces derniers appliquent pour satisfaire le besoin opérationnel exprimé : c'est-à-dire, le retour en conditions opérationnelles de l'appareil [basé sur la définition « S=3PI » de (Wippler, 2011)].

Définition : Système [d'après (Wippler, 2011) basé sur (De Rosnay, 1975-499B)]

S = 3PI

« Un système, de manière structurelle ou physique, est un ensemble **intégré** et **en interaction** de Produits/Personnes/Procédures qui fournissent ensemble une capacité à satisfaire un besoin exprimé par un environnement ».

Cependant, nous pensons que la notion de système est trop générale relativement à notre étude et préférons la particulariser en système homme-machine afin de souligner que le système de maintenance est constitué d'hommes (objets naturels) et de machines (objets artificiels) et ainsi que son comportement est basé sur les synergies résultantes des interactions entre ces constituants de nature différente. La notion d'interaction entre les constituants hommes et machines (couplée à celle d'intégration) représente ainsi l'objet central de la conception de tel système et entre autres de celle d'un système homme-machine support de maintenance aéronautique.

Cette vision du système de maintenance amène à s'intéresser aux « tenants et aboutissants » (notre traduction du terme anglais « issues ») de la conception de l'interaction homme-machine que (Boy, 2011) appréhende au travers du couplage entre des facteurs de la machine, des facteurs humains et des facteurs d'interaction (voir introduction de ce mémoire). Concernant notre cas d'étude d'intérêt de l'interaction homme-machine dans le cadre de la tâche (T) de fermeture verrouillée des capots moteur, les « Machine Factors » de l'artefact (A) d'intérêt sont de type hardware et plus précisément signal (par exemple, le signal de couleur orange peint sur les verrous), et les « Human Factors » de l'utilisateur (U), par exemple le TEA, sont de types physiques (ex : la posture), physiologiques (ex : les seuils de perception, la fatigue) et cognitifs (apprentissage du contrôle d'un objet marqué en orange) dans des situations (S) fortement contextualisées.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la présentation de la manière dont les facteurs humains d'un système support de maintenance aéronautique sont pris en compte en ingénierie système.

1.2. Contexte méthodologique : organisation de l'ingénierie d'un système support de maintenance

Dans cette partie, l'objectif est de présenter la manière dont les facteurs humains en maintenance sont intégrés en ingénierie d'un système support. Pour cela, nous présentons tout d'abord les artefacts* essentiels de l'ingénierie système, puis nous faisons le lien avec les différentes analyses facteurs humains alimentant, au cours du cycle de vie système, le processus de développement produit (PDP) défini par rapport à l'organisation de notre entreprise d'accueil.

1.2.1. Artefacts essentiels d'ingénierie système

Les référentiels d'ingénierie système utilisés comme base pour la mise en place des pratiques et méthodes de l'IS sont :

- ARP4754A (Standard SAE): « *Certification Considerations for Highly-Integrated or Complex Aircraft Systems* » - *Certification and product assurance process*
- EIA-632 (1999) : « *Processes for Engineering a System* »
- ISO/IEC 15288 (2008) : « *Systems and software engineering - System life cycle processes* »

Ces référentiels ont servi de base pour la définition d'un processus de développement produit prenant en compte les spécificités de l'organisation des différents domaines de compétences impliqués dans la conception d'un aéronef, notamment au travers du concept clés de « Building Block » fourni par la norme (EIA-632, 1999).

1.2.1.1. Processus de développement produit

Concept de Building Block

Le concept central de l'ingénierie système au cœur du processus de développement produit est celui de « Building Block ». Cette notion, définie dans l'encadré ci-dessous, couvre celle de « System » traditionnellement utilisée en « Systems Engineering ». Elle est utilisée actuellement pour représenter exhaustivement les objets ou produits émergeant du cycle de conception.

Définition: The system consists of both the **end products** to be used by an acquirer for an intended purpose and the set of **enabling products** that enable the creation, realization, and use of an end product, or an aggregation of end products.

Cette définition fait clairement apparaître le lien entre les éléments du système principal avion (« end product ») et les éléments des systèmes contributeurs (« enabling products »). Parmi ces systèmes contributeurs, on retrouve l'ensemble des produits relatifs aux différentes phases du cycle de vie de l'avion dont les éléments de soutien (« support products ») (Figure 1-17).

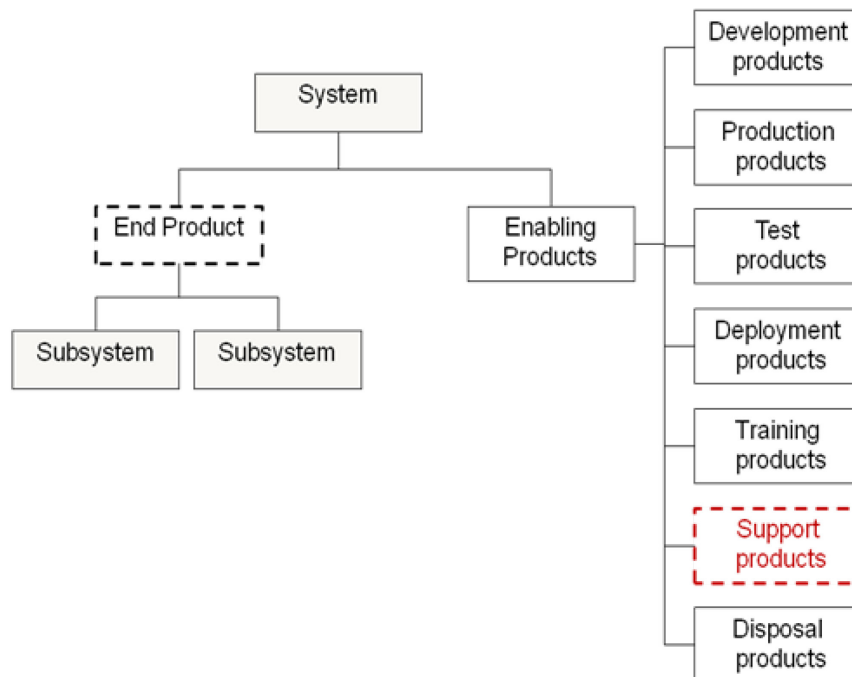


Figure 1-17 - Concept de Building Block (EIA 632, 1999) - La définition de ce concept est récursive. Pour chaque produit, pouvant être appréhendé au travers du Building Block, on retrouve la même décomposition.

L'ingénierie du système de maintenance consiste à s'intéresser à la relation entre le « end-product », représentant l'objet à maintenir, et un sous-ensemble des produits de support que peuvent représenter les produits de maintenance : opérateurs de maintenance (compétences et connaissances), outils et procédures de maintenance.

Le développement produit, une activité collaborative et itérative entre domaines

La conception du système de maintenance est une activité collaborative et itérative entre les différentes parties prenantes impliquées dans la conception du système principal. Dans le cadre de notre contexte industriel, elle se caractérise par une combinaison de :

- **savoir-faire techniques** variés tels que la structure (en. Airframe), les systèmes⁴ (en. System), le fuselage (en. Fuselage), les moteurs (en. Power plant), les trains d'atterrissage (en. Landing Gear), les ailes (en. Wing), le fuselage arrière et l'empennage (en. Rear fuselage and Empennage), l'électricité (en. Electricity), les systèmes d'information (en. Information system), les outillages et les procédures
- **savoir-faire « opérationnels »** tels que l'opérabilité, la sûreté (en. Safety), et la sécurité (en. Security).

Tous ces savoir-faire représentent autant de sources potentielles d'exigences à chaque niveau de décomposition du système avion : Programme, Avion, Composant, Sous-composant et Equipement.

La conception repose également sur :

- Un processus de certification, pour démontrer que les solutions proposées sont conformes aux exigences **de certification** fixées par les autorités (référence au diagramme d'exigences réglementaires en introduction de ce chapitre).
- Un processus de maturité, pour s'assurer que les performances de fiabilité, de disponibilité et de maintenabilité satisferont le besoin client.

Dans ce cadre, la conception du système de maintenance est appréhendée au travers du savoir-faire opérationnel (et transverse) qu'est l'Opérabilité et se focalise sur la co-conception des relations entre les « end products » (système principal et ses constituants) et les produits de maintenance associés. Nous revenons sur cet aspect dans la partie 1.2.2. Dans la partie suivante, nous proposons de préciser les éléments du PDP.

1.2.1.2. Ingénierie basée sur les exigences

Nous proposons dans cette partie de présenter et de définir les éléments génériques appuyant la mise en œuvre de l'ingénierie système basée sur les exigences.

Nous invitons le lecteur à se référer à l'annexe 2 de ce mémoire ainsi qu'aux éléments du glossaire pour plus de détails sur l'ingénierie système.

⁴ Ici, Système fait référence à une partie de l'organisation de l'ingénierie chez Airbus qui se focalise sur les systèmes embarqués de l'avion (problèmes de masse, de fiabilité opérationnelle (« Operational Reliability »), de coût de maintenance (DMC) et d'énergie (power)).

Besoins

Définition : Requirements (Airbus, 2008)

A requirement is an expression of a customer need, captured from internal and external customers. It formalises a relationship between the customer and the supplier by **identifying a deliverable needed by the customer(s)** and to be produced by the supplier(s). From the beginning, the author should clearly identify what is the expected deliverable(s) and how he will **verify** it (Design Verification and Product Verification).

Cette définition du terme anglais « Requirement » traduit celle du terme français Besoins. En effet, un « Requirement » est appréhendé comme un livrable ou fourniture (un service) attendu par un client dans son environnement d'exploitation, devant être produit par un « fournisseur de solution ». Ce terme est aussi bien valable pour un client externe au système (ex : compagnies aériennes), que pour un client interne au système (ex : un niveau de décomposition supérieur ou inférieur, un sous-système).

Dans le sens de la définition ci-dessus, un besoin est une formulation structurée et claire de ce que le client désire ou des services qu'il attend. Il est exprimé sous la forme d'un texte pouvant être appuyé par des graphiques ou tableaux. Il est référencé dans un document de besoin représentant les charges pour lesquelles le fournisseur doit apporter une solution.

Spécifications

Dans le contexte d'une entreprise internationale utilisant l'anglais comme langue de référence, et afin de maintenir une stricte séparation entre le domaine du problème (le besoin) et celui de la solution (exigence), l'utilisation du terme anglais « Specification » est privilégié pour traduire le terme d'exigence système. La spécification est alors appréhendée comme la traduction du besoin décrit par le client, sous la forme de fonctions que le système doit réaliser et d'attributs qu'il doit posséder (aspect non fonctionnel). Elle constitue le point d'entrée pour les activités de conception aux différents niveaux de décomposition du système (Figure 1-18).

Définition : Specification (norme ARP4754)

A collection of requirements which, when taken together, constitute the criteria that define **the functions and attributes of a system or an item.**

Les spécifications font partie des référentiels de conception et possèdent des caractéristiques intrinsèques telles que la source, les moyens de vérification et validation ainsi qu'une justification ou « rationale ».

Remarque : Dans la norme ARP4754, on peut constater un recoupement des définitions des termes « Requirement » (traduisant le Besoin) et « Specification » alors que nous montrons en partie 3.1.1 de ce mémoire qu'ils doivent être clairement séparés pour permettre entre autre la traçabilité et la Vérification & Validation.

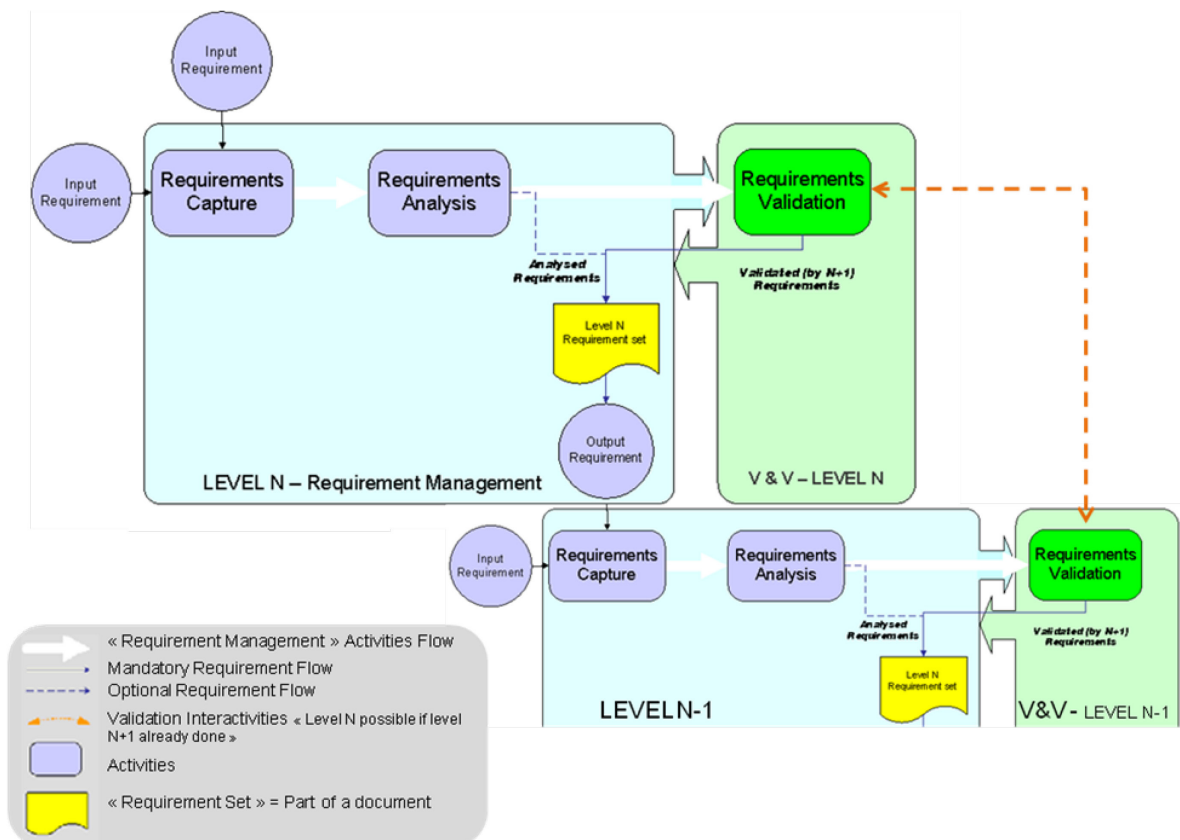


Figure 1-18 - Cascade des exigences entre les différents niveaux de décomposition système et les processus de V&V associés

Vérification & Validation

Définition : Design⁵/Product/Specification Verification (norme ARP4754)

Evaluation of implementation of Design/Product/Specification against requirements to determine that they have been met. In other words: Verification that the

⁵ i.e. Creation of an item from a set of requirements.

Design/Product/Specification (from equipment and sub-components up to the Aircraft) is compliant with (= satisfies) the relevant set of validated requirements.

De manière plus précise, la vérification correspond à la confirmation, par examen et collecte d'évidences objectives, que les spécifications à partir desquelles un système est construit sont satisfaites. Elle répond ainsi à la question : « A-t-on construit UN BON système ? ». Cette activité est réalisée par le concepteur de la solution (Dobre, 2010).

La validation, quant à elle, correspond à la confirmation, par examen et collecte d'évidences objectives, qu'un système (ou l'agrégation de systèmes) fonctionne comme attendu par le client dans son environnement opérationnel. Elle répond à la question : « A-t-on construit LE BON système ? ». Cette activité est réalisée par le client du niveau de décomposition système associé (Dobre, 2010).

Définition : Requirements Validation (norme ARP4754)

Activities to ensure that requirements are sufficiently correct and complete so that the product will meet upper level requirements and User Needs (ARP4754/ABD0200).

In other words: "VALIDATED" means that both levels have the same understanding and share the same objectives. However, compliance with these requirements is not considered at this stage.

1.2.1.3. Conclusion : l'opérabilité, domaine de l'ingénierie du système support de maintenance aéronautique au cours du PDP

Dans cette partie, nous avons présenté les artefacts essentiels de l'ingénierie des exigences ainsi que le rôle clé de l'opérabilité pour la prise en compte des aspects opérationnels au cours du PDP.

L'opérabilité peut se définir comme la capacité de garder un équipement ou un système dans des conditions de fonctionnement sûres et fiables, selon des exigences opérationnelles prédéfinies. Cette capacité recouvre 4 aspects: les opérations de pilotage de l'avion (flight crew), les opérations de maintenance de l'avion (maintainer), les opérations de cabine (cabin crew) et les opérations au sol (ground). L'existence d'une telle organisation se justifie par le besoin d'assurer que les savoir-faire techniques impliqués dans l'ingénierie tiennent compte de la réalité opérationnelle lors de la spécification.

Dans notre thèse, nous nous intéressons uniquement à l'aspect maintenance de l'opérabilité, c'est-à-dire à la relation entre le « end product » et les produits de

maintenance : opérateurs, outils et procédures de maintenance. L'opérabilité implique nécessairement de s'interroger sur la dimension facteurs humains de la situation d'intérêt. Nous nous interrogeons à présent sur la manière (méthodes et outils) dont les facteurs humains sont intégrés dans le processus de définition.

1.2.2. Facteurs humains pris en compte au cours du cycle de vie produit

Le processus de définition du système de maintenance consiste à prendre en compte les spécificités des actions techniques ou opérations de maintenance à réaliser sur un composant du système principal (logique d'enchaînement d'actions, caractéristiques du composant principal à maintenir), ainsi que les spécificités et contraintes des éléments permettant cette réalisation (dont les opérateurs de maintenance). Nous proposons dans cette partie de présenter l'intégration des « facteurs humains en maintenance » en ingénierie système.

1.2.2.1. Conception centrée sur les facteurs humains en maintenance

Airbus, et plus particulièrement le département « Operability », a mis en place une démarche de conception centrée sur les facteurs humains en maintenance (« *Human Factors In Maintenance* »). Les méthodes et processus associés sont présentés dans le document Airbus Policy 2574. Dans ce document, les facteurs humains sont définis de la manière suivante:

Définition : Human Factors

Human Factors is concerned with optimizing the relationship between people and their activities, including aspects of communication between individuals, individual behavior, and group behavior. This optimization is processed by the systematic application of human sciences, integrated within the framework of systems engineering. Its objective can be seen as effectiveness of the system, which includes safety and efficiency, and the well-being of the individual.

Cette définition est particularisée à la maintenance:

Définition : Human Factors in Maintenance

The objective of introducing Human Factors in Maintenance is to facilitate the maintenance task achievement, minimize the risks to aircraft flight safety and the Health

& Safety of maintenance personnel stemming from aircraft maintenance activities.

The primary means of achieving this objective is to integrate Human Factors in Maintenance principles from the initial phases of design of the aircraft, ground support equipment (GSE) and ground handling equipment (GH&S) to ensure that maintenance activities are well adapted to the maintenance personnel and the often challenging physical and operational environment in which they work. In addition, Human Factors in Maintenance principles also direct the provision of means to protect the aircraft from erroneous actions of the maintenance personnel, and to protect the maintenance personnel from hazards encountered during maintenance activities.

L'objectif est de faciliter la réalisation des tâches de maintenance ou d'assurer la performance du système de maintenance (en temps et en qualité), tout en minimisant les risques en termes de sûreté de fonctionnement du système principal (erreur de maintenance) et de sécurité des personnels de maintenance (Hygiène & Sécurité).

1.2.2.2. Les facteurs humains analysés au cours du cycle de vie : cas de l'antenne

Nous utilisons le cas de l'installation de la « Localizer Antenna » représentant un équipement pour lequel aucune défaillance technique d'origine humaine n'a été recensée jusqu'à présent.

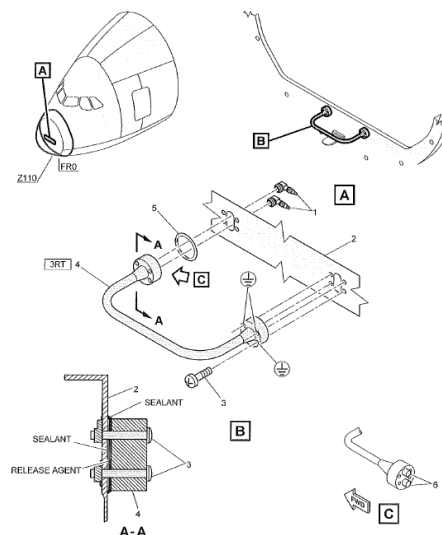


Figure 1-19 - Localizer antenna (réf. 3RT) et son environnement direct

L'antenne (Figure 1-19), en tant qu'équipement de l'avion, est caractérisée par plusieurs étapes de vie constituant son cycle de vie (Figure 1-20). Elle est conçue, réalisée et

fabriquée, montée, exploitée puis recyclée. L'objectif de la conception est d'arriver à anticiper les différentes contraintes liées à ces étapes de vie.

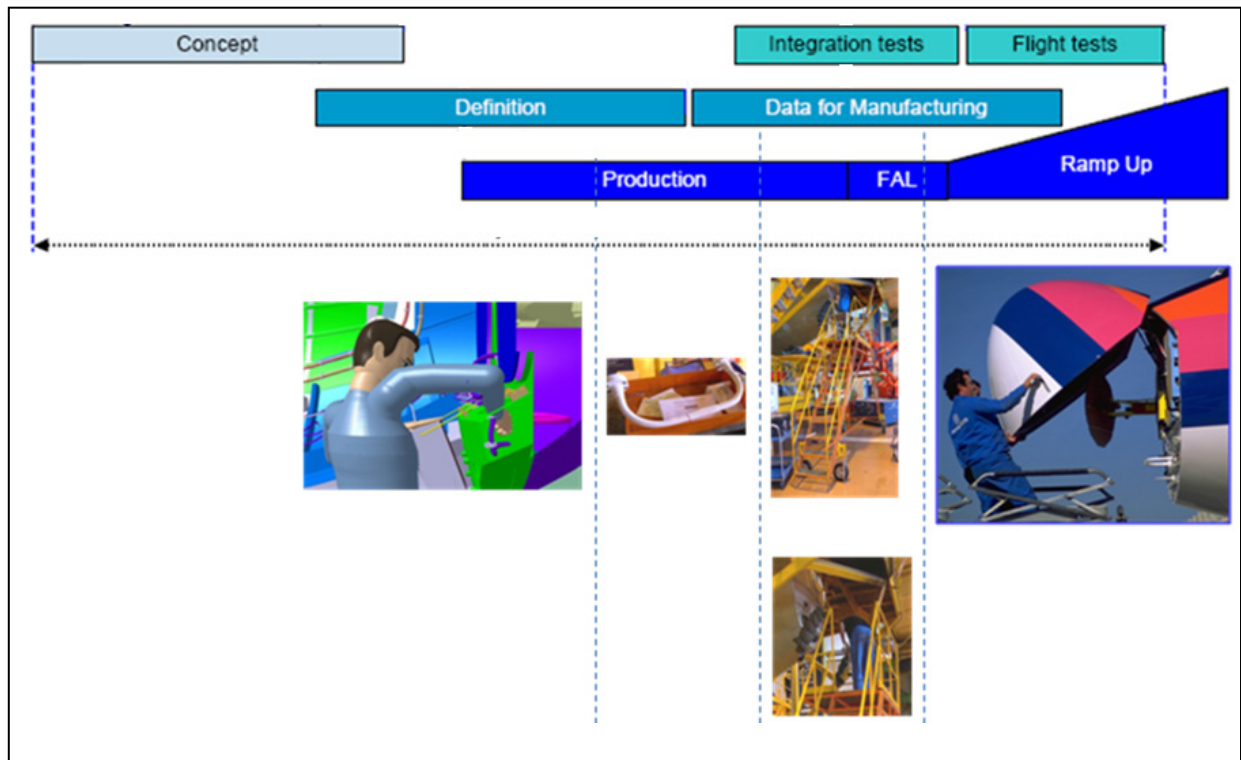


Figure 1-20 - Cycle de vie de l'antenne

L'installation de l'antenne peut intervenir dans deux cas de figure : son montage premier sur l'avion (en production) et dans le cas d'un remplacement en opérations (en exploitation). Nous nous intéressons aux facteurs humains analysés pour garantir que l'antenne est correctement installée.

1.2.1.1. En production

Pour la production, les analyses ne portent pas sur un équipement particulier mais sur des zones avion. Pour la zone dans laquelle l'antenne se trouve, on va chercher à analyser s'il y a des risques d'endommager l'antenne (ou tout autre équipement de la zone) ou des difficultés pour réaliser le travail en vérifiant **l'accessibilité visuelle (l'objet est-il présent dans le cône de vision ?) et motrice (l'objet est-il atteignable dans la zone ?)**. La plupart du temps, le mannequin numérique est utilisé pour visualiser ces critères facteurs humains en conception (Figure 1-21). Des observations réelles sur des situations similaires peuvent également être effectuées en complément.



Figure 1-21 - Mannequin numérique représentant l'opérateur de montage dans la zone de travail où se situe l'antenne

Nous n'irons pas plus en détails dans les différentes analyses qui sont menées pour ce cas d'utilisation de l'antenne dans la mesure où notre intérêt se porte sur les situations de maintenance ou d'exploitation opérationnelle.

1.2.1.2. En exploitation

Les facteurs humains analysés concernant l'installation (et la dépose) de l'antenne en exploitation sont identiques à ceux pris en compte en production, à l'exception près que la situation de maintenance simulée est différente (Figure 1-22). En effet, lors du remplacement en opération, l'avion est dans une configuration complète (assemblé) et l'antenne ne peut plus, pour des raisons de rapidité d'exécution de la maintenance, être approchée de la même manière.

Néanmoins, une attention particulière est portée sur un autre type de facteurs que nous avons appelé auparavant erreurs humaines. Il s'agit de prévenir les erreurs possibles que pourraient réaliser l'opérateur du fait d'une mauvaise compréhension ou interprétation de la tâche en conditions opérationnelles contraignantes : temps limité, environnement variable (Figure 1-23). En effet, la dépose et la pose de l'antenne n'étant pas une tâche fréquente, les opérateurs de maintenance utilisent la *procédure*, en tant que guide et aide-mémoire, afin de réaliser les actions pour installer ou déposer l'antenne.

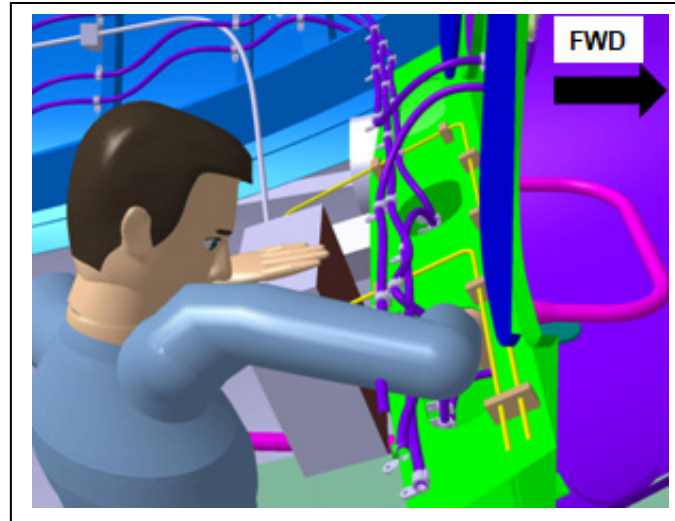


Figure 1-22 - Qualitative Maintainability Analysis (QMA) - Mannequin numérique représentant l'opérateur de maintenance en position pour déconnecter les connecteurs de l'antenne. On voit ici que l'opérateur atteint l'antenne en passant par la caisse de train avant, c'est-à-dire en ne se présentant pas par l'avant de l'appareil comme indiqué par la flèche noire FWD.

H	I	J	K	L	M
MAINTENANCE ERROR ANALYSIS					
(If a maintenance task is not applicable to the M-HEA item state "[maintenance task] and "N/A"; e.g. "Servicing N/A")				STOP POINT: If there are NO potential maintenance errors, state "NONE" and STOP here	
What AMM maintenance tasks are carried out or have a direct impact on this item?	How often will the maintenance task be performed?	Where is the maintenance task performed? During Deployment/ Line & Hangar/ Hangar Only	What are the steps of the maintenance task during Job Set-Up, Procedure, and Close Up?	What are the potential maintenance errors?	What are the potential causes and contributing factors of each maintenance error?

Figure 1-23 - Maintenance Human Error Analysis (M-HEA) - L'objectif des analyses des erreurs de maintenance est d'identifier les problèmes de mauvaise perception, de mauvaise compréhension, de mauvaise interprétation qui peuvent se dérouler au cours de la réalisation des tâches de maintenance. Il s'agit ensuite de trouver les solutions pour éliminer ou réduire l'impact de ses erreurs.

En plus de la définition des propriétés du système de maintenance : niveau de compétences des opérateurs de maintenance, outillage de maintenance, etc., des contraintes liées à la réalisation des tâches de maintenance sont apportées dans la définition du système principal (ex : accessibilité visuelle, motrice et gestuelle).

1.2.2.3. Conclusion : Les facteurs humains physiologiques n'alimentent pas suffisamment le processus d'ingénierie

Cette analyse des facteurs humains impliqués au cours du cycle de vie de l'antenne montre que les facteurs physiques et cognitifs (circonscrits uniquement aux erreurs humaines) sont principalement étudiés pour prescrire les opérations de maintenance du point de vue de la performance de l'opérateur. Plus précisément, cette prescription porte à la fois sur les outils de maintenance et « ground equipment support » (ex : nacelle élévatrice pour atteindre l'antenne), sur l'équipement à maintenir (ex : « Equipment Installation Requirement Document » et « Purchase Technical Sheet » vers les fournisseurs) et la procédure.

Ainsi, **les facteurs humains physiologiques ne sont pas suffisamment appréhendés** pour la définition des produits de maintenance. Ces facteurs sont importants car ils peuvent influencer la perception des éléments de l'environnement ou les décisions d'actions, ainsi que les capacités motrices du geste technique de l'opérateur. Le stress est un exemple représentatif de facteurs physiologiques pouvant avoir des effets sur l'attention, la mémoire, la performance perceptivo-motrice ou les capacités de jugements et de décision (Staal, 2004), et qui aboutit in fine à une perturbation de la performance humaine opérationnelle.

Cette analyse montre également que la situation de 'Design numérique' est idéalisée par rapport à la réalité. En effet, la situation simulée met l'opérateur numérique dans des conditions beaucoup plus confortables que celles contextualisées en opérations. De plus, le mannequin numérique est guidé vers l'objet conçu au cours de la simulation numérique. Nous nous sommes ainsi interrogés, pour améliorer ce point, sur l'intérêt que l'objet conçu (l'antenne et ses parties) guide l'opérateur numérique, et au-delà sur l'intérêt de mettre en perspective le torseur des actions mécaniques d'un tournevis technique avec un tournevis physiologique.

1.2.3. Conclusion : les facteurs humains en maintenance considérés de manière a posteriori au cours du processus de spécification

Bien qu'un effort de spécification d'exigences facteurs humains en maintenance, dites « haut-niveau », soit réalisé dans les premiers documents d'exigences de l'avion, celles-ci restent difficilement exploitables. Une première explication est que les retours d'analyse facteurs humains au cours du processus de développement produit ne sont pas formulés aux différentes spécialités techniques impliquées, sous la forme d'exigences vérifiables au sens des définitions « *Requirements* » et « *Verification & Validation* » présentées en partie 1.2.1.2. Cette qualité première d'une exigence conditionne sa prise en compte par les multiples domaines spécialistes (techniques) précédemment évoqués. La posture adoptée

par la communauté en ingénierie système est de fournir pour cela des éléments quantifiables : spécifiques, mesurables et atteignables.

Ceci accentue, entre autres, la difficulté de prise en compte des facteurs humains par les responsables de l'ingénierie du « end product » (ex : le capot moteur ou l'antenne). De plus, à un niveau plus fin de spécification, ces exigences facteurs humains n'existent pas et sont substituées par un recours à des analyses de maintenabilité sur un « end product » déjà défini, c'est-à-dire de manière a posteriori.

Cet état de fait souligne les difficultés d'intégration des facteurs humains liées aux processus techniques. Cependant, ces difficultés peuvent également s'expliquer du point de vue de l'organisation actuelle de l'ingénierie, ainsi que des rôles et responsabilités existantes, vis-à-vis de l'opérabilité.

1.3. Conclusion : la nature dichotomique du processus de spécification entre domaines du technique et des facteurs humains

Cette présentation des contextes opérationnel et méthodologique des facteurs humains en maintenance nous amène à conclure quant à la nature dichotomique du processus de spécification entre domaines technique et facteurs humains.

Tout d'abord, le cas d'étude pivot du contrôle de la fermeture verrouillée des capots a mis en exergue le fait que de nombreuses recommandations a posteriori avaient été réalisées sur le verrou à manipuler et à ses alentours, traduisant ainsi une démarche d'ingénierie que nous pouvons qualifier d'approche en « silo ». Ensuite, la présentation de l'ingénierie des opérations de maintenance révèle que, dans l'état actuel de l'organisation de l'ingénierie système, l'intégration des facteurs humains en maintenance pour garantir les performances opérationnelles est perfectible.

En effet, nous avons montré que les facteurs humains physiologiques n'étaient pas suffisamment pris en compte dans l'ingénierie du système de maintenance. De plus, les différents facteurs humains entretiennent entre eux des dépendances qui ne peuvent être appréhendées que s'ils sont pensés comme « un tout intégré » et non comme des éléments séparés. Cet état de fait souligne la nécessité en ingénierie du système de maintenance, d'un cadre théorique intégratif de travail qui régit l'activité de spécification d'un système homme-machine, dans une logique intégrative et cohérente.

Les travaux de cette thèse se proposent d'investiguer la problématique de la définition d'un processus de spécification non-dichotomique. Nous nous intéressons ainsi à l'amélioration de la synergie entre les domaines techniques et humains en nous attachant à la performance technico-humaine du *système homme-machine global* (INCOSE, 2008) par l'étude de l'interaction homme-machine en opération de maintenance (voir chapitre 2). Nous nous efforcerons pour cela d'en proposer des exigences mesurables. En effet, cette qualité de mesurabilité est un premier levier technique pour pouvoir assurer l'intégration des facteurs humains physiologiques en ingénierie du système support de maintenance, et permettre les activités de vérification et validation. Nous aborderons cet aspect en chapitre 3 de ce mémoire.

Remarque : Notons que la problématique de la définition d'un processus de spécification non-dichotomique entre domaines du technique et des facteurs humains est commune à l'ensemble des industries qui conçoivent des systèmes homme-machine à sécurité critique (ex : industrie nucléaire, ferroviaire ou automobile).

2. Spécification fonctionnelle d'une interaction physico-physiologique de perception visuelle

*Les situations incidentielles étudiées précédemment mettent en évidence que les opérateurs de maintenance n'exécutent pas forcément les bonnes actions ou ne prennent pas nécessairement les bonnes décisions, bien que formés à la mise en œuvre de procédures de remise en conditions opérationnelles d'équipements. Ce fait souligne que l'explication des défaillances constatées est à rechercher en premier lieu au travers des différentes interactions auxquelles les opérateurs participent. Ne remettant pas en cause l'organisation des opérations de maintenance, c'est-à-dire les interactions entre opérateurs humains (ou dimension organisationnelle du système homme-machine), nous nous intéressons aux interactions entre les objets techniques et humains. Ces interactions homme-machine sont au centre des travaux sur le comportement humain qui étudient le couplage entre perception et action. Nous proposons d'étudier plus précisément ce couplage relativement au cas d'étude du contrôle visuel de la fermeture **et** verrouillage des capots moteurs décrit précédemment.*

*L'interaction homme-machine peut se définir plus précisément comme l'action entre un ou plusieurs êtres humains **et** les objets artificiels qui composent l'environnement dans lequel il(s) se comporte(nt) et évolue(nt). Pour comprendre, voire anticiper le comportement humain, il est important de s'intéresser à la manière dont l'environnement est perçu. Action et perception forment un tout inséparable : l'action contient intrinsèquement une composante téléologique, un but (ex : l'adaptation, la survie, etc.), qui se forme sur la base d'un ensemble d'éléments perceptifs et décisionnels eux-mêmes formés sur la base des propriétés des objets de l'environnement et des connaissances acquises au cours de leur manipulation, c'est-à-dire l'expérience [notre formulation basée sur (Rasmussen, 1986) et (Berthoz, 2006)].*

Afin de mieux appréhender l'interaction homme-machine, nous proposons de mener notre étude en deux sous-parties :

- *Partie 2.1 : Nous étudions fonctionnellement cette interaction au travers d'un cadre de réflexion emprunté à la théorie écologique de la perception.*
- *Partie 2.2 : Nous étudions physiologiquement cette interaction au travers d'un cadre intégratif en physiologie pour mieux appréhender la nature de l'interaction.*

Nous menons notre analyse de l'interaction homme-machine en nous appuyant sur le formalisme NIAM-ORM (Habrias, 1988) (Halpin, 1989), présenté en Annexe 1.1. Ce formalisme est identifié comme pertinent pour spécifier des faits élémentaires exprimant des relations entre objets d'un domaine d'intérêt (univers du discours). Plusieurs travaux menés dans notre laboratoire ont fait usage de ce formalisme pour modéliser les artefacts essentiels

de connaissances, par exemple de l’univers du discours de la systémique (Mayer, 1995) ou de l’univers du discours des normes de sécurité des machines-outils (Blaise, 2000).

Plus précisément, ce formalisme est basé sur une approche d’analyse de l’information (« Information Analysis ») et permet de percevoir un domaine d’intérêt à travers le système objet, dans lequel « vivent » les objets, et le système d’abstraction, qui comprend l’ensemble des règles décrivant le comportement des objets.

De plus, il permet de verbaliser les faits modélisés en Langage Naturel Binaire (LNB). On comprend ainsi aisément l’intérêt de ce formalisme pour modéliser l’interaction et ses conditions de réalisation ainsi que celui de cette **verbalisation** (en anglais) pour éliciter des exigences entre domaines d’expertises impliqués dans la compréhension de l’interaction de perception.

Notre univers du discours est celui de l’interaction homme-machine en opérations de maintenance (Figure 2-1). Les fondements ensemblistes de NIAM-ORM en logique du 1^{er} ordre permettent de formaliser cette verbalisation et de faciliter ainsi la construction d’un modèle par raffinements successifs. Enfin, la description d’instances de faits complète l’outillage de la démarche pour assurer la complétude ensembliste du modèle.

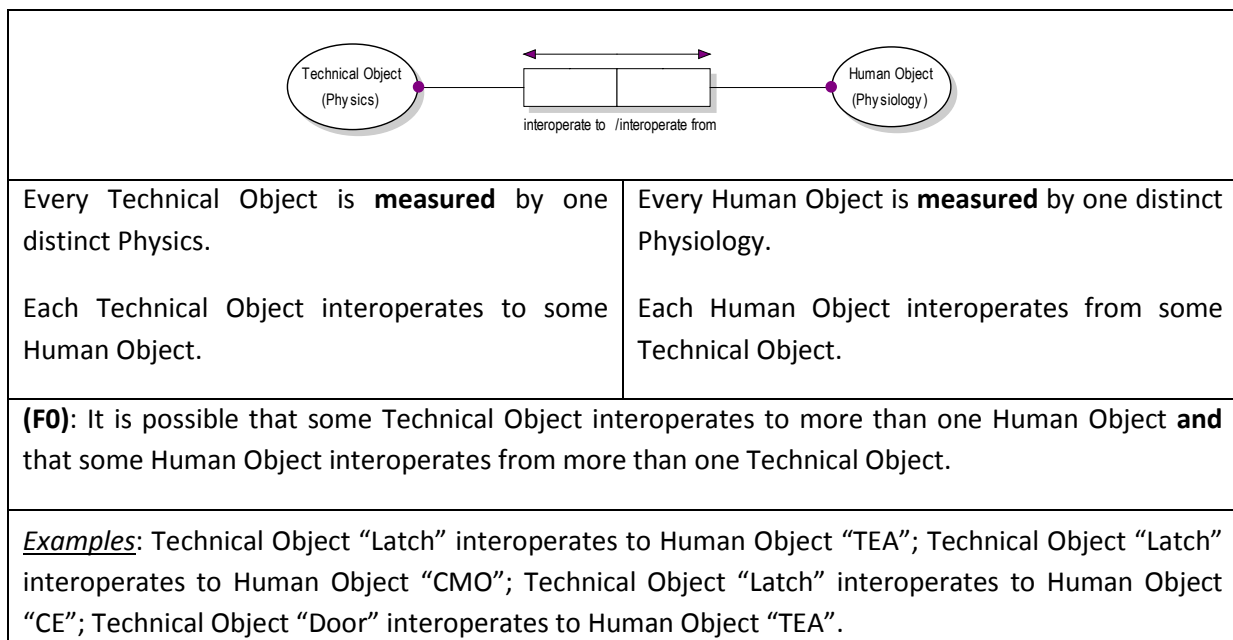


Figure 2-1 Modèle ORM de l’atome élémentaire d’interaction (F0) basé sur les éléments présentés en Chapitre1 – Nous représentons la nature physique de l’objet technique et physiologique de l’objet humain par un attribut « measurement » (marqué entre parenthèse dans les NOLOT) qui souligne la nécessité d’arriver à caractériser quantitativement ces objets pour respecter les attributs d’une exigence en IS (détails en Annexe1).

Les artefacts essentiels de connaissances que nous dégageons et formalisons dans ce chapitre **sous forme de faits** (incluant les contraintes sur et entre ces faits) notés **FX.X**, nous permettent de construire itérativement la problématique d’étude de l’interaction et le

modèle associé ainsi que le mode indicatif d'une spécification, envisagé comme un élément précis de connaissance experte répondant à un problème posé, qui appuiera notre travail de formulation d'exigences système en première partie du chapitre 3.*

Rappel : Dans ce chapitre 2, nous modélisons l'interaction homme-machine par rapport au cas d'étude concret choisi présenté en Chapitre 1. Les instances des modèles que nous proposons ici ont été présentées à l'occasion de ce précédent chapitre de contextualisation.

2.1. Spécification fonctionnelle d’une interaction de perception visuelle basée sur la théorie écologique de la perception

La perception humaine est au centre de beaucoup de débats depuis les philosophes grecs jusqu’à aujourd’hui. Elle passionne et divise les personnes qui s’y intéressent. Pour certains, la perception est une manière de s’approprier les propriétés physiques du monde. Pour d’autres, elle est une manière d’appréhender nos interactions possibles avec le monde⁶.

Les travaux en psychologie écologique et plus précisément ceux menés par Gibson dans le cadre de sa théorie écologique de la perception (Gibson, 1979) réconcilient dans une certaine mesure ces deux points de vue. En effet, au travers du concept d’*affordance*, il traduit la faculté de l’homme, et de l’animal en général, à guider ses comportements en percevant ce que l’environnement lui offre en termes de *potentialités d’actions*. Ces potentialités seraient spécifiées par des combinaisons d’invariants perceptifs, optiques dans le cadre de la vision (ex : dimension d’une surface), que l’humain « saisit » (en. *pick-up*) en fonction de ses projets et en perspective de ses capacités physiques.

Dans les parties suivantes, nous proposons de revenir sur cette théorie et sur le concept d’*affordance* afin de spécifier fonctionnellement l’interaction de perception visuelle.

2.1.1. Interaction homme-environnement

Gibson qualifie sa théorie de la perception d’*écologique* (Gibson, 1979). Par-là, il veut souligner le rôle prépondérant des éléments de l’environnement sur le processus perceptif participant in fine à l’adaptation de l’animal. Dit autrement, l’environnement pris au sens large, c’est-à-dire incluant les objets artificiels qui le composent, contextualise l’animal à mesure que celui-ci opère en son sein.

De cette manière, il souligne à la fois la réciprocité entre ces deux objets qui forment un tout qu’il nomme *système animal-environnement*, et que l’étude des processus perceptifs et moteurs (lié à l’action) de l’animal tient intrinsèquement compte de l’environnement. Pour une meilleure compréhension de la construction de notre corpus de modélisation, nous substituerons ‘animal’ par ‘homme’ dans la suite des développements.

Appliqués à notre cas d’étude (Figure 2-2), ces éléments de connaissance nous permettent de raffiner l’atome élémentaire d’interaction factuelle (**F0**). En effet, les opérations de maintenance, comme nous avons pu le présenter en partie 1, sont très variables et ainsi très dépendantes des caractéristiques de l’environnement. Nous formulons ainsi deux nouveaux faits : L’objet humain opère l’objet technique (**F1.1**) ; L’objet technique contextualise l’objet

⁶ Il s’agit là de notre synthèse compte tenu des différentes approches de la perception en psychologie, que le lecteur peut explorer dans l’ouvrage de synthèse « *La psychologie de la perception* » (Jimenez, 1997).

humain **(F1.2)**. Par ailleurs, l’objet technique est le seul dénominateur commun à la fois entre l’ensemble des situations d’opération ou de manipulation du mécanisme de fermeture et verrouillage mais aussi entre les différents opérateurs humains intervenant autour de l’avion. De cette manière, il participe à la contextualisation de l’action du mainteneur : la manière d’opérer de l’objet humain dépend du contexte, ce qui raffine un nouveau fait **(F1.3)**.

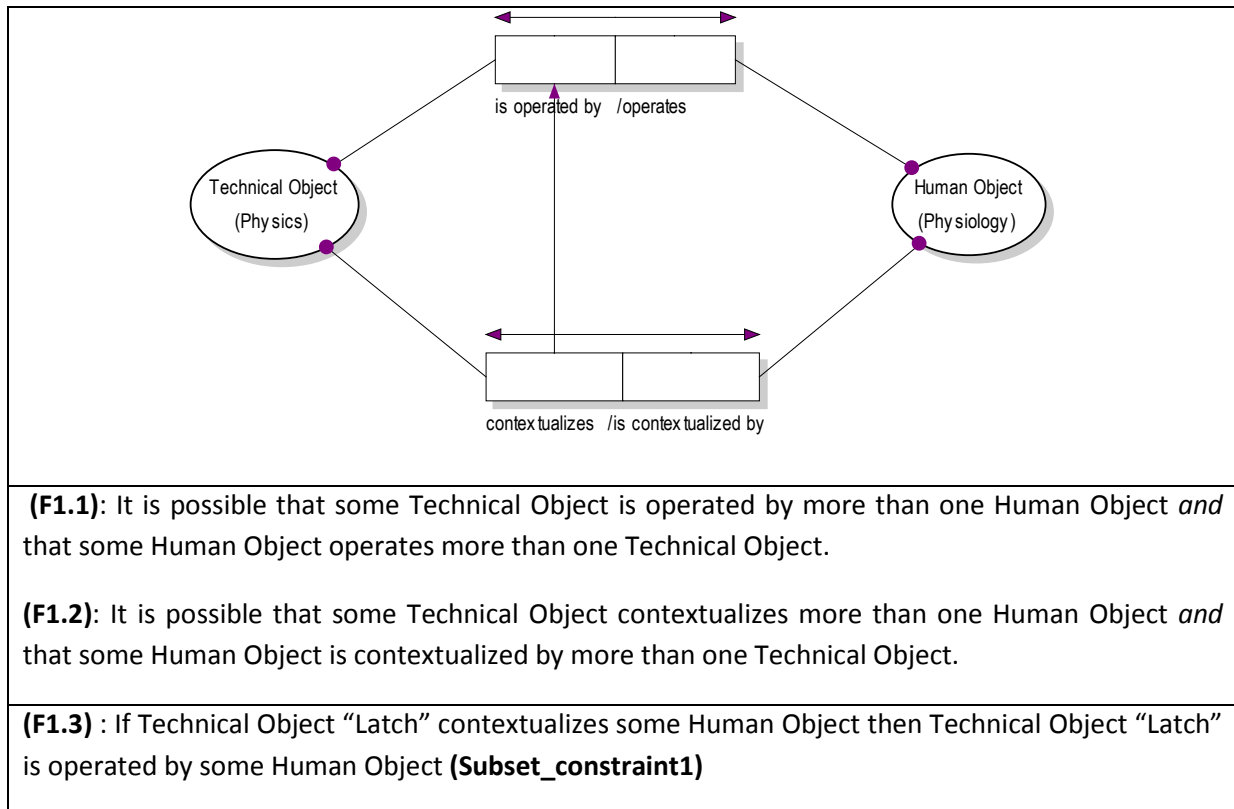


Figure 2-2 - Modèle ORM de « Agir en contexte » - Nous raffinons le modèle précédent à partir de l’ensemble des faits élicités et soulignons au travers du F1.3 (contraintes entre les rôles des F1.1 et F1.2) la dépendance à l’égard du contexte de la manière d’opérer de l’objet humain.

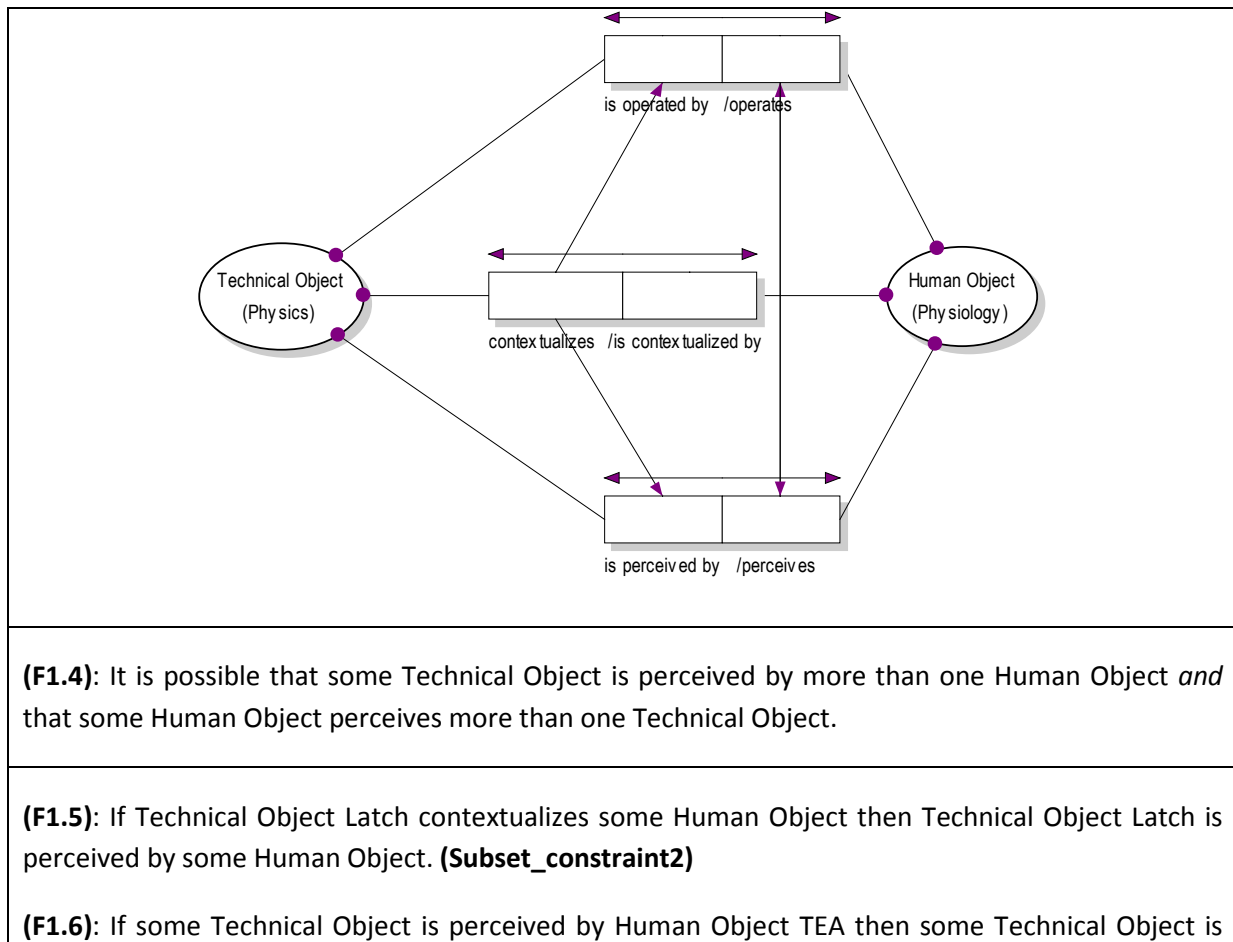
Notons que cette thématique de l’action humaine en contexte, encore appelée *action située*, est également abordée au travers du concept de *cognition située* issu des travaux de (Suchman, 1987), (Hutchins, 1995) ou encore (Clancey, 1997). De manière générale, bien que ces auteurs proviennent de domaines différents, anthropologie pour les deux premiers, informatique et sciences cognitives pour le troisième, ils remettent tous en cause le postulat cognitiviste de l’action planifiée (et la notion de plan) au profit d’une vision plus située, voire distribuée, faisant du contexte et de la perception de ses variables un élément prépondérant de l’action. En d’autres termes, l’action ne serait pas prédéfinie ou prescrite par un plan a priori mais émergerait de la relation du sujet avec son environnement à un moment/contexte donné.

2.1.2. Le rôle clé de l’action dans le processus perceptif

Il a été montré, entre autres au travers des travaux de (Paillard, 1983) et (Massion, 1997), que la réalisation d’un acte moteur volontaire dans le but d’atteindre un objectif, comme saisir un objet ou se déplacer dans l’environnement vers un lieu précis, dépend de la perception et de sa précision **(F1.4)**. En revanche, et ceci représente une contribution de Gibson pour l’étude du couplage perceptivo-moteur, la perception peut être considérée comme dépendante de l’action.

Plus précisément, l’approche écologique de la perception marque au travers du concept d’affordance le caractère actif de la perception, c’est-à-dire orientée en fonction d’un but à atteindre. La perception n’est donc plus envisagée comme un processus passif dont le tri des éléments perceptifs se ferait ultérieurement mais bien sélectif et modulé.

Relativement à notre cas d’étude (Figure 2-3), cet ensemble de connaissances vient compléter le modèle « agir en contexte » : La perception est dépendante du contexte **(F1.5)** ; L’action de l’opérateur est conditionnée par la perception de l’objet technique **et vice-versa (F1.6) et (F1.7)**.



operated by Human Object TEA. **(Subset_constraint3)**

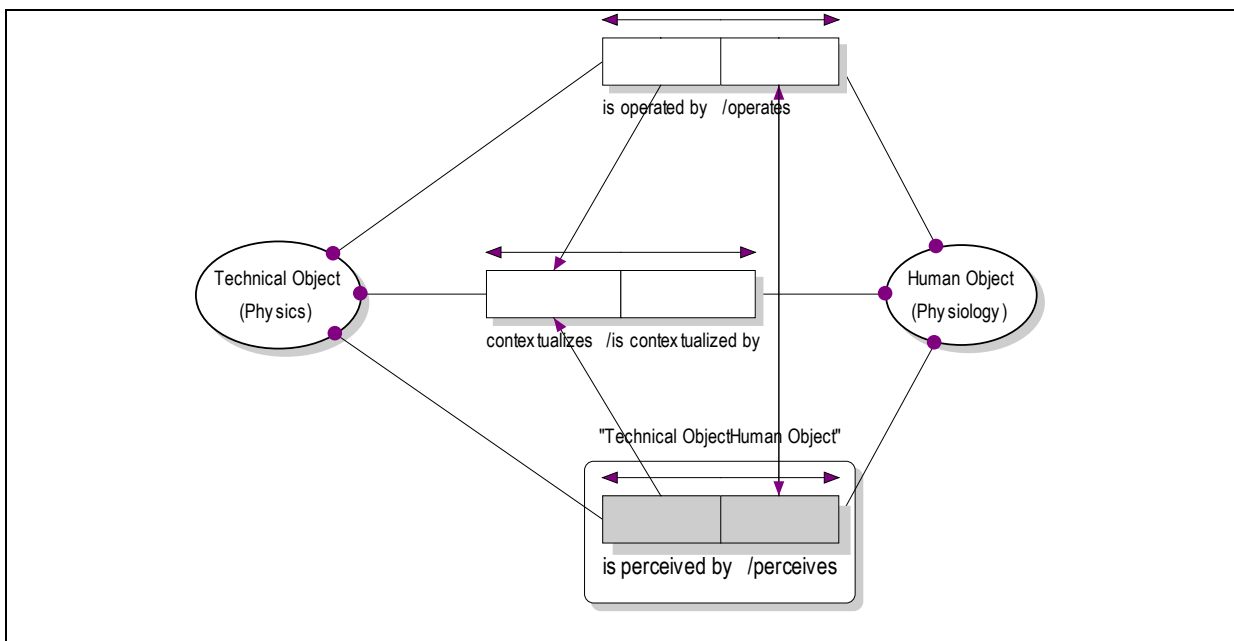
(F1.7): If some Technical Object is operated by Human Object TEA then some Technical Object is perceived by Human Object TEA. **(Subset_constraint4)**

Figure 2-3 - Modèle ORM du « Percevoir pour agir en contexte » (1^{ère} itération) – Nous raffinons le modèle précédent par l’élucation d’un nouveau fait F1.4 qui conduit, relativement aux éléments bibliographiques sélectionnés, à de nouveaux faits (F1.5, F1.6, F1.7) qui ajoutent des contraintes entre les différents rôles du modèle.

2.1.3. La perception directe

Si les deux postulats précédents sont partagés par la communauté scientifique s’intéressant à la problématique de l’interaction homme-machine et porteur d’avancées dans les domaines comme la robotique (voir partie 2.1.5), celui de la perception directe, troisième postulat à la base de la théorie écologique, fait l’objet de nombreux débats.

Cette conception de la perception s’oppose aux théories inférentielles pour lesquelles la perception est le produit d’une construction mentale sur la base des sensations, c’est-à-dire d’un processus interne (Fodor et al., 1981). La théorie écologique envisage la perception comme un processus qui émerge au sein du système homme-environnement. Elle correspondrait plus précisément à un processus d’extraction par l’action d’informations présentes dans l’environnement. Ces informations, ou ces « *stimulation-information* » (Luyat et al., 2009), ne seraient ni des propriétés de l’environnement ni des propriétés de l’homme, mais elles seraient ce que l’homme, au travers de son action fait émerger de l’environnement et qu’il saisit.



(F1.8):

[Technical ObjectHuman Object] is an entity object type; [Technical ObjectHuman Object]* is an alias for the nested fact : 'Technical Object is perceived by Human Object / Human Object is perceived by Technical Object' (**Nested_Fact1**)

* Cet objet est le siège du processus de ‘Perception’

Figure 2-4 - Modèle ORM du « Percevoir pour agir en contexte » (2^{ème} itération) – Nous raffinons le modèle précédent en soulignant que l’étude de l’interaction homme-machine doit s’orienter sur la relation de Perception (notre objet d’intérêt) ; nous modélisons cela en utilisant le mécanisme de substantivation (F1.8).

Dans cette approche, le stimulus n’est plus envisagé comme une intensité d’énergie mais comme « *la structure des configurations énergétiques ambiantes* », encore appelées *invariants*, stimulant les récepteurs et fournissant l’information, envisagée comme l’élément de signification (le sens), pour la perception. Cette vision de la perception directe est quelque peu remise en cause par les résultats en neurophysiologie (Berthoz, 2009) qui montrent que « *les capteurs sensoriels, chez tous les animaux et chez l’homme, décomposent le réel en éléments très simples. Les neurones des voies visuelles codent ainsi de façon très spécialisée la forme, la couleur ou le contraste* ». Nous reviendrons sur ces derniers travaux en partie 2.2.1 de ce chapitre.

Cependant, concernant notre cas d’étude, nous pensons, comme nous le montrerons en partie 2.2, que la perception implique une dimension physiologique interne ainsi qu’une dimension physique externe mais qu’il convient tout de même d’en explorer la dimension directe en tant que **condition nécessaire, mais non suffisante, pour bien agir en contexte**. Ceci marque le fait que la relation grisée dans le modèle (Figure 2-4) doit être considérée comme une sorte d’objet, à étudier à part entière (**F1.8**). La question se pose alors de connaître la nature de cet objet intermédiaire de perception.

2.1.4. Les affordances

Le concept d’affordance a été proposé par Gibson pour la première fois dans (Gibson, 1966). Il trouve son origine dans la théorie gestaltiste⁷, rendue célèbre par les travaux de (Koffka, 1935) et de (Lewin, 1935), qui postulent que la signification d’une chose est perçue aussi directement que ses propriétés constantes, telles que sa couleur ou sa taille. Pour cette théorie, le produit des processus de perception et de représentation est un ensemble d’éléments structurés, une *forme* ou *gestalt* en allemand ou invariant, propre à une signification donnée qui informe l’individu sur ce qu’il peut faire avec l’objet concerné.

⁷ Cette théorie fonctionnelle suggère que les processus de la perception et de la représentation mentale traitent les phénomènes de l’environnement comme des ensembles structurés, appelés *formes* (de. Gestalt)

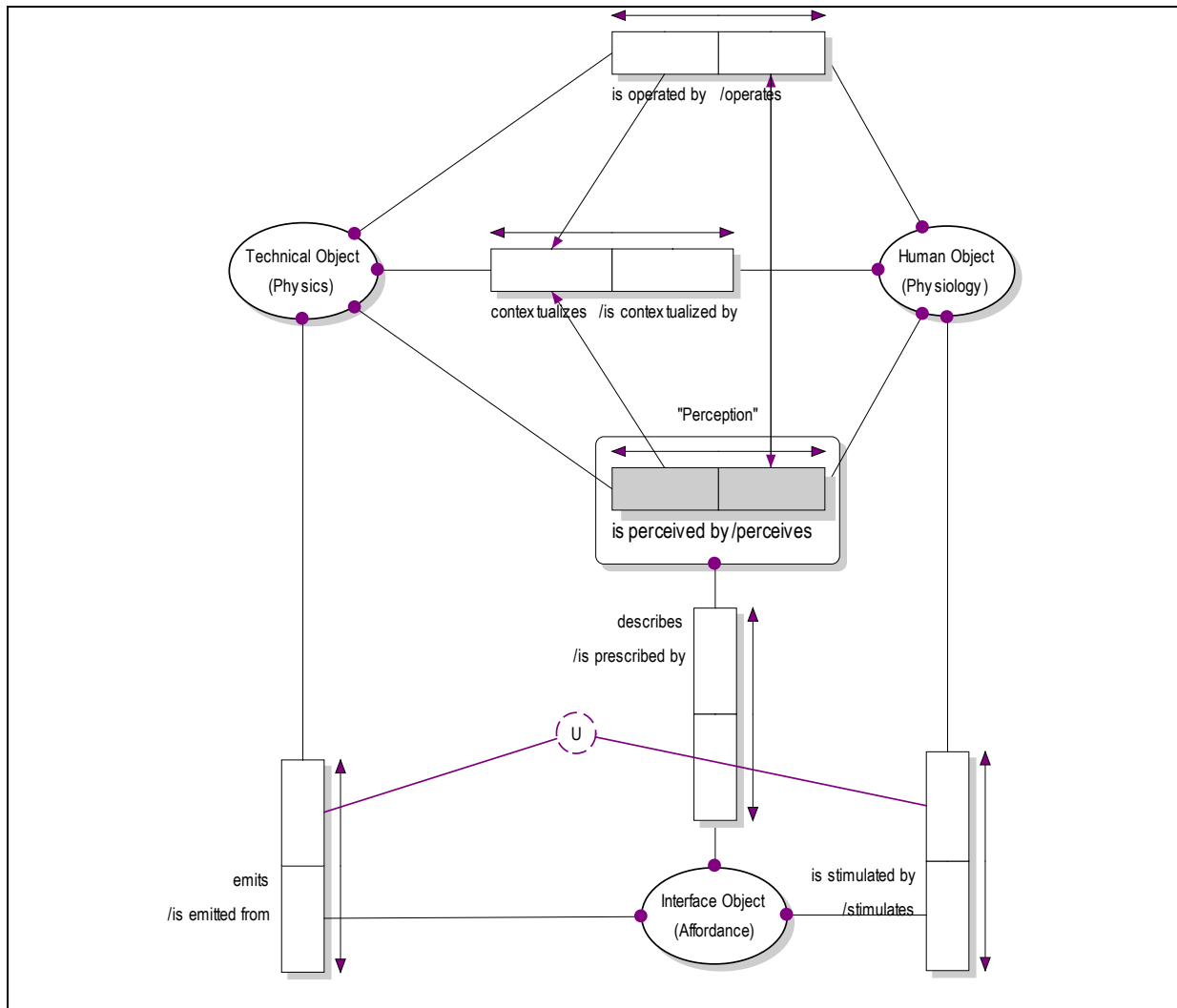
Ce concept a par la suite été raffiné par Gibson jusqu'à des formulations plus abouties tout d'abord au travers de sa *théorie des affordances* (Gibson, 1977), puis de son dernier ouvrage (Gibson, 1979). Cette évolution dans la formulation du concept souligne sa complexité. Tantôt elle est décrite comme une donnée invariante de l'environnement, tantôt comme une propriété émergente qui n'existe qu'en rapport avec l'homme ou plus généralement le système vivant. Même si la pertinence de ce concept est reconnue en psychologie, et dans d'autres domaines comme le design et l'informatique, l'absence de définition univoque de l'affordance a alimenté les débats de principes, compliquant ainsi sa mise en œuvre et aboutissant à de nécessaires adaptations en fonction des domaines visés (voir partie 2.1.5).

Définition : Affordance (d'après Gibson, 1979)

The affordance of anything is a specific combination of the properties of its substance and its surfaces taken with reference to an animal (...) Note that the properties of substance and surface are physical properties but they are not described in classical physics, only in ecological physics. The combination of properties is uniquely related to the animal or species being considered (...) The affordances of the environment are what it offers the animal, what it provides or furnishes, either for good or ill (...) It is equally a fact of the environment and a fact of behaviour. It is both physical and psychological, yet neither. An affordance points both ways, to the environment and to the observer.

L'objet de ce chapitre n'est pas de privilégier l'un ou l'autre des aspects de la définition de ce concept mais d'en dégager, à l'aide du formalisme NIAM-ORM, un schéma conceptuel directeur qui puisse permettre de progresser dans notre spécification de l'interaction homme-machine.

Les affordances peuvent être appréhendées comme ce que l'environnement « offre » à un sujet humain en matière de comportements possibles. Elles seraient ainsi des relations fonctionnelles d'action entre l'environnement et l'organisme humain (Chemero, 2003) qui les utiliseraient relativement à ses capacités et par rapport à une finalité c'est-à-dire un projet, que nous ne remettons pas en cause pour notre cas d'étude, à condition qu'il les **perçoive**. Elles peuvent ainsi apparaître comme une relation entre les propriétés de l'homme et celles de l'environnement. Dans notre cas (Figure 2-5), l'interaction de perception étudiée est source de réification d'un Objet Intermédiaire **(F2)** de nature hybride ou physico-physiologique, « affordant » des propriétés symboliques **(F3)** qui ne sont donc pas *mesurables* directement. Notons que la perception humaine est de nature multimodale et que dans nos travaux nous nous concentrons sur une seule des modalités, à savoir la modalité visuelle.



(F2): It is possible that some Perception describes more than one Interface Object and that some Interface Object is prescribed by more than one Perception.

(F3): Every Interface Object is identified by one distinct Affordance.

(F4.1): It is possible that some Interface Object is emitted from more than one Technical Object and that some Technical Object emits more than one Interface Object.

(F4.2): It is possible that some Interface Object stimulates more than one Human Object and that some Human Object is stimulated by more than one Interface Object.

(F5) : For each Human Object “TEA” and Technical Object “Latch” there is at most one Interface Object that stimulates Human Object “TEA” and is emitted from Technical Object “Latch”
(Uniqueness_Constraint1)

Figure 2-5 - Modèle ORM de l’interaction de perception pour agir en contexte – Nous raffinons le modèle précédent en faisant émerger l’objet interface affordant (F2 &F3) au centre de la relation de perception (F4.1 & F4.2) ; cet objet interface représente l’élément synergique entre objets hétérogènes techniques et humains (F5) qu’il faut arriver à mesurer (cette nécessité de mesure est représentée par ‘(Affordance)’ dans l’objet interface.

Cette mesurabilité est cependant requise pour traduire la correspondance homo-morphique (voir encadré suivant) que doit maintenir cet objet que nous nommons « *Interface Object* » pour marquer sa nécessaire contingence aux objets techniques (F4.1) et humains (F4.2) à l'origine de ce nouveau fait à même de faciliter la jointure synergique (F5) entre les deux domaines facteurs humains et techniques.

(Galara, 2011) : [...] L'objectif est de définir un langage pour formaliser les schémas de situation, de conduite et de surveillance, pour des *interfaces* interopérables entre le système socio-organisationnel et le système technique, le plus homomorphe aux schémas mentaux des exploitants de systèmes de production. L'enjeu est de minimiser la charge cognitive des exploitants, lors de l'élaboration de ses schémas, de fournir des représentations communes et partagées par les métiers d'exploitation, de renforcer leurs capacités cognitives d'analyse et de décision individuelles et collectives, notamment pour anticiper les franchissements d'exigences de conception et réglementaires du système technique, et d'améliorer ainsi la sûreté et les performances d'exploitation des systèmes de production complexes et à risques.

Cette mesurabilité de propriétés de l'objet interface est ainsi la condition de finalisation de cette construction émergente (Mayer et al., 2003) d'un modèle du processus de perception. Il s'agit de passer d'une interaction fonctionnelle prônée par le concept d'affordance à une interaction organique requise par notre objectif de mesurabilité.

2.1.5. Discussion : Des mises en œuvre du concept d'affordance

Le concept d'affordance a fait l'objet de nombreux travaux dans des domaines aussi divers que la conception d'objet et l'ergonomie, ainsi que la robotique. De manière générale, comme nous avons pu le mentionner précédemment, ces différents travaux ont amené à différentes appropriations du concept compte-tenu des spécificités de leurs domaines ainsi que de leurs désaccords avec le postulat de la perception directe et leur revendication du rôle central des connaissances et capacités d'analyse de l'individu au cours de son interaction avec son environnement. Dans cette partie, nous proposons de présenter deux mises en œuvre du concept relativement aux deux domaines cités ci-dessus.

2.1.5.1. Ergonomie et conception : les affordances comme support de la performance humaine

La mise en œuvre de l'affordance en conception est l'initiative de Donald Norman (Norman, 1988) (Norman, 2004). Il se différencie de Gibson sur certains aspects théoriques du fonctionnement des processus perceptifs et propose une opérationnalisation de ce concept

pour le design, plus prescriptive que le cadre original, qui s’oriente sur ce qui doit être perçu par l’utilisateur d’un objet.

Gibson s’intéressait à décrire le comportement humain compte tenu des spécificités de la perception humaine mais les questions soulevées par l’affordance amènent à s’interroger également sur la manière dont l’humain est amené à manipuler les objets situés dans son environnement. Un tel questionnement est au centre de l’approche ergonomique dans laquelle s’inscrit Norman : comment s’assurer que les individus manipuleront correctement les objets de leur environnement ? Comment percevront-ils l’utilité d’un objet conçu par rapport à leurs projets ?

Norman considère ainsi les affordances comme des « propriétés perçues » des objets que l’humain peut utiliser. Pour lui, ces propriétés fournissent à l’opérateur des indices clés sur la manière de les utiliser ainsi que leurs limites d’utilisation. L’activité du ‘designer’ consiste alors à rendre ces propriétés visible, c’est-à-dire à spécifier les attributs physiques visuels (couleurs, formes, etc.), afin que l’utilisateur puisse déduire, en un coup d’œil, ce qu’il peut faire avec l’objet en question⁸. Notons que cette capacité du concepteur-modélisateur à filtrer les phénomènes visibles à contrôler (par l’utilisateur) et ceux pouvant demeurer cachés (à l’utilisateur) est au centre des travaux des « Problem Frame » sur lesquels nous nous appuyons pour définir le processus de spécification d’un système homme-machine en chapitre 3.

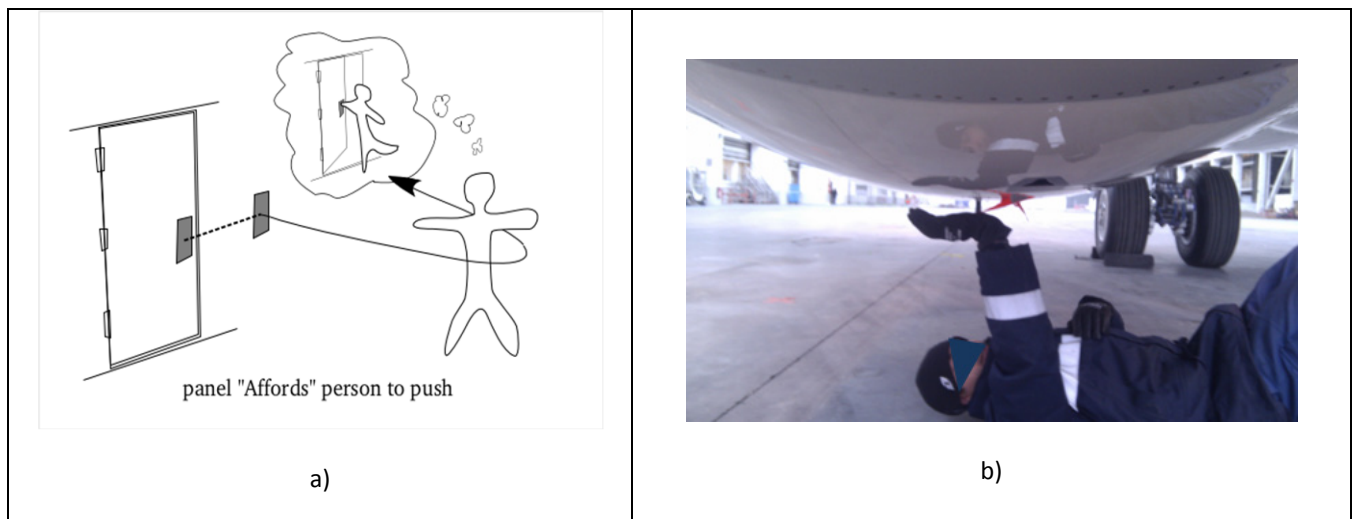


Figure 2-6 - Illustration de l’affordance en design selon Norman (a) et appliqué à notre cas d’étude en maintenance (b)

Un exemple très répandu pour appuyer l’explication de cette mise en œuvre est celui relatif à la manipulation d’une porte. Si nous considérons une porte ne possédant pas de poignée

⁸ Notons que cette conception de l’affordance peut être assimilée aux concepts d’intuitivité et d’utilisabilité développés en interaction homme-machine (Nielsen, 1994ab).

ni d'indication visuelle d'aucune sorte alors selon Norman il n'y a aucune raison pour que celle-ci soit utilisée car le niveau d'information visuelle n'est pas suffisant pour spécifier une affordance qui sera perçue par l'utilisateur. En revanche, si une information est présente, par exemple un panneau, et que l'utilisateur a appris, ici par conditionnement socioculturel, à interpréter cette information, alors il se peut qu'il pousse la porte en appuyant à l'endroit où est situé le panneau (Figure 2-6 a)). De manière analogue, le verrou orangé pendant au niveau des capots moteurs « afforde » l'opérateur de maintenance à le pousser (Figure 2-6 (b)), **à condition qu'il soit perçu.**

La qualité du design de l'objet et l'apprentissage lié à l'expérience de l'utilisateur sont les éléments clés de cette mise en œuvre de l'affordance pour l'interaction homme-machine. De cette manière, Norman se rapproche d'une définition plus « organique » de l'affordance en soulignant que la conception d'un objet est plus complexe qu'un simple mélange de couleurs et de formes mais bien une transmission de sens qui doit être adaptée à l'utilisateur. En revanche, ce que souligne moins Norman sont les conditions nécessaires de transmission qui dépendent de l'environnement ou contexte.

2.1.5.2. Intelligence artificielle et robotique : les affordances comme support de modélisation du couplage multimodale perception-action chez les automates

On trouve des travaux en intelligence artificielle et robotique qui se sont intéressés à la théorie écologique de la perception et au concept d'affordance pour reproduire dans les automates le couplage perceptivo-moteur au centre de l'interaction homme-machine. Ceci représente un nouveau cadre théorique pour penser leur programmation.

En effet, contrairement aux approches traditionnelles dans le domaine qui envisagent la perception et l'action comme respectivement l'entrée et la sortie d'un système, de tels travaux (Ménard, 2006), menés dans l'équipe CORTEX du LORIA, proposent, en cohérence avec les postulats de la théorie écologique de la perception et les travaux en physiologie de la perception et de l'action menés par (Berthoz, 1997), d'envisager cette dernière comme un processus modulé, du point de vue de son fonctionnement, par l'action, c'est-à-dire à la fois les capacités motrices mais aussi les objectifs à atteindre. En conséquence, les modules de perception et d'action des automates sont repensés pour les faire interagir à l'image des relations multimodales existantes au niveau des aires corticales humaines impliquées dans la perception et l'action.

Le but de ces travaux est de « *reproduire la capacité du cortex à former, à partir de sensations dont le traitement est dispersé sur la surface corticale, un tout multimodal cohérent qui permet de percevoir des affordances et non un ensemble de sensations déconnectées les unes des autres* ». A des fins de programmation, ces travaux ont dû néanmoins s'affranchir du postulat de la perception directe des affordances. Il est en fait très difficile, sans une vision plus organique du couplage, de passer directement à la

programmation. Pour cela, les auteurs font l’hypothèse d’un traitement de l’information et s’interrogent mathématiquement sur les liens qui existent entre les stimulations des capteurs sensoriels artificiels et la perception des affordances.

A l’aide d’un ensemble d’automates cellulaires structurés en « cartes corticales » à l’image des bandes modulaires observées dans le cortex (sensorielles, spinales et motrices), d’approximations mathématiques, de renforcement de ces réseaux par apprentissage et de mécanismes de compétitions entre ces cartes, un modèle *Bijama* est proposé (Figure 2-7). La spécificité de ce modèle réside dans le fait que, contrairement aux approches traditionnelles, le comportement global du système n’est pas explicitement planifié à l’avance mais qu’il émerge et s’adapte, grâce aux capacités d’apprentissage des réseaux. Ceci souligne le rôle clé de la stimulation sensorielle et des capacités cognitives, que nous aborderons en partie 2.2.1. Le comportement de l’automate « émerge de la formation d’une perception unifiée à partir de ces cartes corticales » mise en correspondance avec les prototypes moteurs internes partiellement définis, notamment en fonction des contraintes anthropométriques, et mis à jour au cours de l’apprentissage des réseaux de neurones.

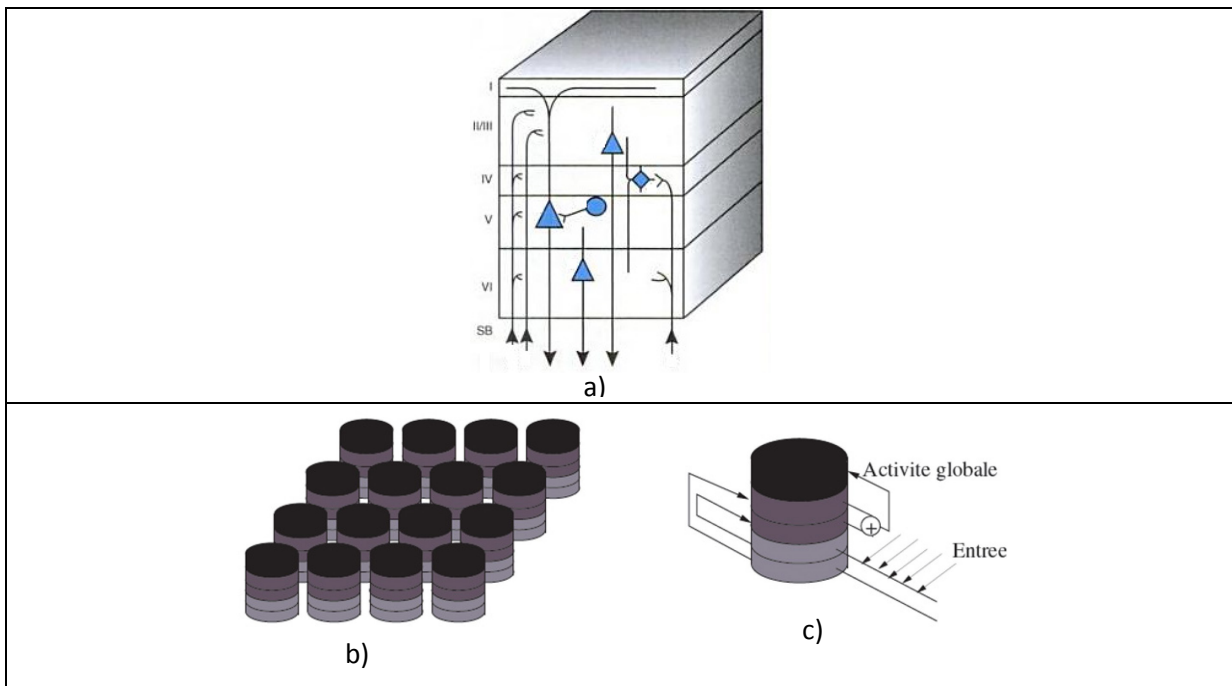


Figure 2-7 - En haut : Représentation laminaire du cortex cérébrale en 6 couches (Guénard, 2001) - Les couches I à III gèrent la liaison entre les différentes zones corticales. La couche IV reçoit les entrées sensorielles depuis le thalamus. Les couches V et VI fournissent l’information corticale à d’autres structures du cerveau; En bas : Principe du modèle Bijama (Ménard, 2006) - (a) illustre l’organisation des différentes colonnes corticales, définies individuellement comme un groupe de neurones dont les champs de réception sont identiques et envisagées comme les unités de base, au sein des cartes corticales, (b) une colonne corticale ou unité reçoit des entrées sensorielles (partie en gris clair) depuis le prosencéphale (thalamus et amygdale); chaque type d’entrée fait l’objet d’une activité de reconnaissance obtenue par la comparaison entre les entrées reçues et un prototype interne spécifique au type d’entrée, et fournit une activité partielle (partie en gris foncé) ; ensuite, ces activités partielles sont regroupées pour constituer l’activité globale de sortie (partie en noir).

Remarque : D'autres approches du comportement des automates utilisant l'affordance pour appréhender le couplage perception-action sont aussi développées par (Sahin et al., 2007) ou encore (Ortman, 2010).

2.1.6. Conclusion : l'interaction homme-machine, siège de communications symboliques

Cette analyse fonctionnelle de l'interaction homme-machine au travers du cadre de la théorie écologique de la perception souligne la complexité inhérente à ce processus dynamique entre deux objets de nature différente. On prend la mesure de cette complexité par le constat de l'absence de définition univoque de l'affordance (Jenkins, 2008). De plus, le cadre fonctionnel véhiculé par Gibson présente quelques limites. Bien qu'intéressant, il ne nous permet pas de comprendre la nature de l'objet interface qui représente, comme nous avons pu le montrer au travers de la construction de nos modèles, notre but pour arriver à spécifier des exigences mesurables de l'interaction homme-machine.

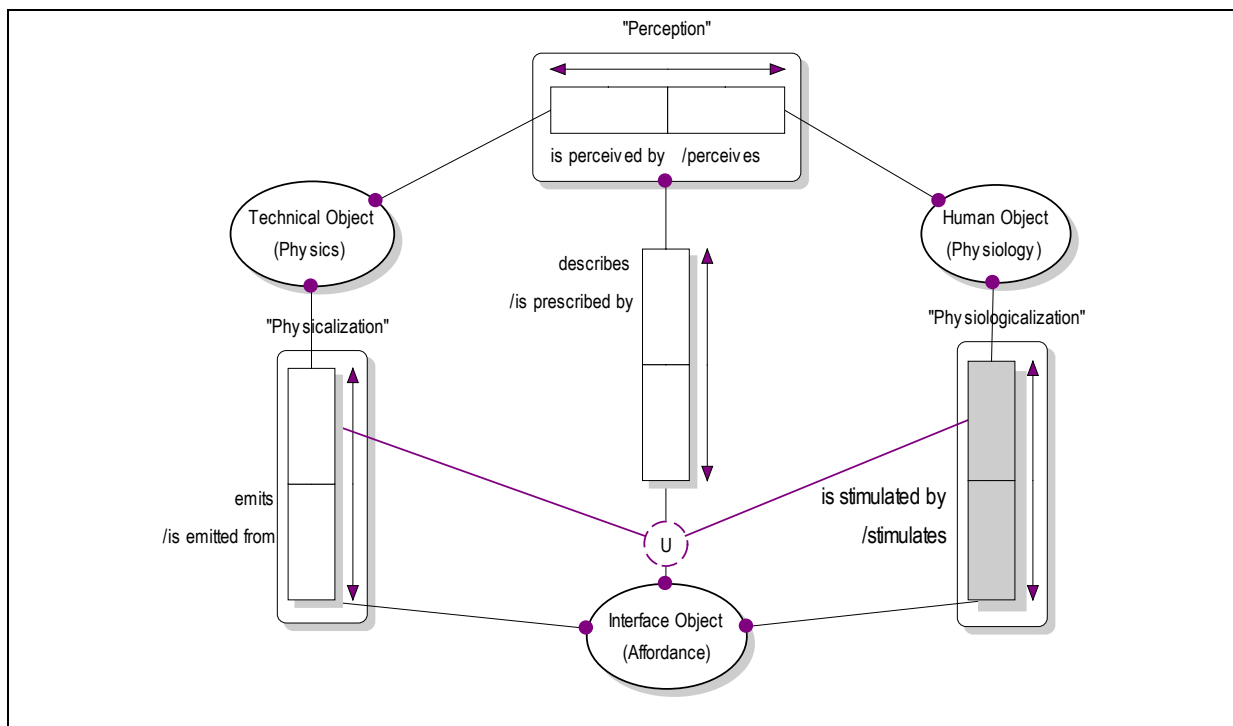
En effet, en restant à un niveau fonctionnel externe, la psychologie ne permet pas de comprendre les processus psycho-physiques (Boisacq-schepens et al., 94) qui sous-tendent ces communications symboliques. Nous ne pouvons omettre, aux vues des résultats des travaux en neurobiologie (Purves et al., 2011), cette dimension de l'interaction pour arriver à en spécifier des exigences mesurables. Les différentes mises en œuvre que nous avons présentées mettent en avant qu'il aura fallu dépasser le cadre théorique initial de l'affordance pour pouvoir arriver à utiliser ce concept. Nous voulons éviter une telle approche dichotomique qui marque en fait une rupture dans l'étude de l'interaction homme-machine, représentant notre univers du discours.

Au même titre qu'un objet présentant une anse offre la possibilité d'une saisie pour les animaux disposant de mains, le « latch » pendant, dans le contexte du contrôle de l'état fermé **et** verrouillé des capots, offre la possibilité d'une manipulation. Encore faut-il que cette possibilité soit perceptible ? Plus précisément, encore faut-il que la configuration d'invariant perceptif* la spécifiant, tel que la couleur qui représente le but du contrôle (on pourrait reformuler la tâche de contrôle par « vérifier l'absence d'orange »), soit perceptible. Dans les parties qui suivront, nous nous intéresserons à comprendre les conditions de transmission de cette possibilité d'action, et plus précisément à la mesurabilité des propriétés de l'objet interface tel que nous l'avons évoqué plus haut. Cela nous amène à étudier la nature physiologique et physique de cette transmission au cœur de l'interaction homme-machine.

2.2. Spécification fonctionnelle d’une interaction de perception visuelle basée sur un cadre intégratif en physiologie

Notre objectif de mesurabilité des propriétés de l’objet interface nous amène donc à nous intéresser à la nature organique de la transmission des propriétés symboliques (affordances) et plus précisément à la nature organique des modalités sensorielles qui permettent de percevoir une affordance. Dans le reste de cette partie, nous nous intéressons à la modalité visuelle relativement à l’interaction entre un objet technique de couleur orange et un Opérateur humain.

L’objet interface, tel que défini précédemment, représente le pivot du processus de perception au cœur de l’interaction homme-machine. Dans cette partie, nous nous concentrons sur la dimension physiologique que nous appelons *processus de « physiologicalisation* »* (Figure 2-8). Nous avons construit ce terme à partir du mot anglais « *physicalize* » qui signifie ‘*exprimer en termes physiques*’ pour matérialiser le fait que la relation objet interface – objet humain est un objet d’étude à part entière devant être étudié *en termes physiologiques (F6.1)*.



(F6.1):

- [Physiologicalization] is an entity object type;
- Physiologicalization is an alias for the nested fact type 'Interface Object stimulates Human Object' (**Nested_Fact2.1**)

(F6.2):

- [Physicalization] is an entity object type;
- Physicalization is an alias for the nested fact type 'Interface Object is emitted from Technical Object' (**Nested_Fact2.2**)

Figure 2-8 - Modèle ORM de l'analyse organique de l'interaction homme-machine de perception par « physicalisation » et « physiologicalisation » - A présent, nous focalisons notre travail sur la perception et faisons apparaître par raffinement du modèle précédent, ainsi qu'à l'aide du mécanisme de substantivation, le périmètre de l'étude (physiologique et physique) à explorer pour arriver à mesurer des propriétés de l'objet interface afin qu'il puisse être plus facilement pris en compte en ingénierie.

En effet, étudier la nature de l'interaction homme-machine, c'est s'intéresser notamment aux conditions de réalisation des processus physiologiques prenant place sur le substrat biologique. Aussi, nous utilisons pour mieux comprendre ces processus un cadre intégratif en physiologie qui s'appuie sur l'élicitation de *faits* issus des travaux menés en physiologie de la perception et de l'action ainsi qu'en physiologie intégrative.

Remarque : Nous matérialisons, au travers de la « physicalization* », le fait que la relation objet interface – objet technique est un objet d'étude à part entière devant également être étudié *en termes physiques ou techniques* (**F6.2**) (voir partie 3.1 de ce mémoire).

2.2.1. Physiologie de la perception et de l'action

Cette thématique de recherche est notamment étudiée par Alain Berthoz au sein du Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action (LPPA) du Collège de France. Ses travaux visent à comprendre les fondements de l'organisation des fonctions cognitives les plus élevées qui sous-tendent les comportements moteurs, par l'étude des bases neurales du couplage perceptivo-moteur.

Pour Berthoz, l'organisme humain est organisé pour et par l'action. Cette idée rejoint dans une certaine mesure celle de Gibson : *l'action module la perception des objets de l'environnement*, mais Berthoz souligne le rôle essentiel des mécanismes d'analyse et de synthèse des informations sensorielles reçues qui, dans le cadre de mouvement lent, ajuste la perception en fonction des buts élaborés (Berthoz, 1997). En effet, contrairement à l'approche écologique de Gibson, Berthoz distingue deux types de situations d'actions que nous pouvons caractériser par les contraintes temporelles pesant sur la réponse motrice à mettre en place : actions rapides et actions lentes. Le premier type stimule un ensemble de répertoires d'actions stockées au travers de schèmes sensorimoteurs (Schmidt, 1975) ou réseaux de neurones pré-câblés. Le deuxième type fait une place plus centrale au cerveau

qui reçoit (cortex visuel), traite, analyse et synthétise les informations lui permettant de simuler l’action et de prédire ses conséquences, avant de commander l’action (cortex moteur).

Ces simulations et prédictions reposeraient, selon Berthoz, sur un ensemble de règles d’interprétation, issues de l’apprentissage, et de la mémorisation des actions passées, issues de la mémoire déclarative des faits et des événements ainsi que de la mémoire non-déclarative des habiletés (Chapouthier, 2006), reposant sur des mécanismes corticaux organisés. Plus précisément, il existerait un ensemble de structures (Figure 2-9), telle que l’amygdale, qui participerait à ces mécanismes en attribuant à chaque percept une valeur émotionnelle, facilitant ainsi leur déclenchement ultérieur à partir de configurations perceptives similaires (Berthoz, 2012).

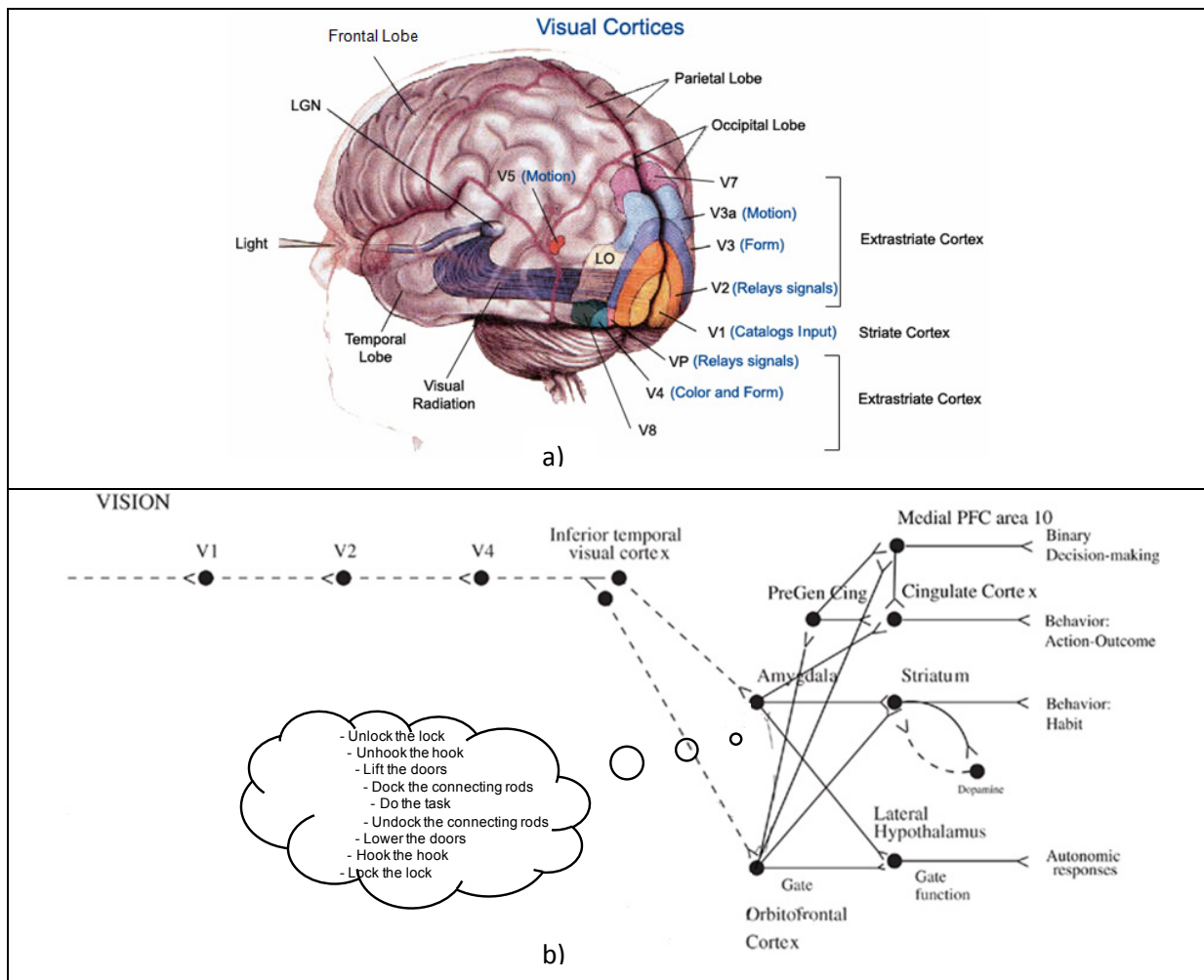
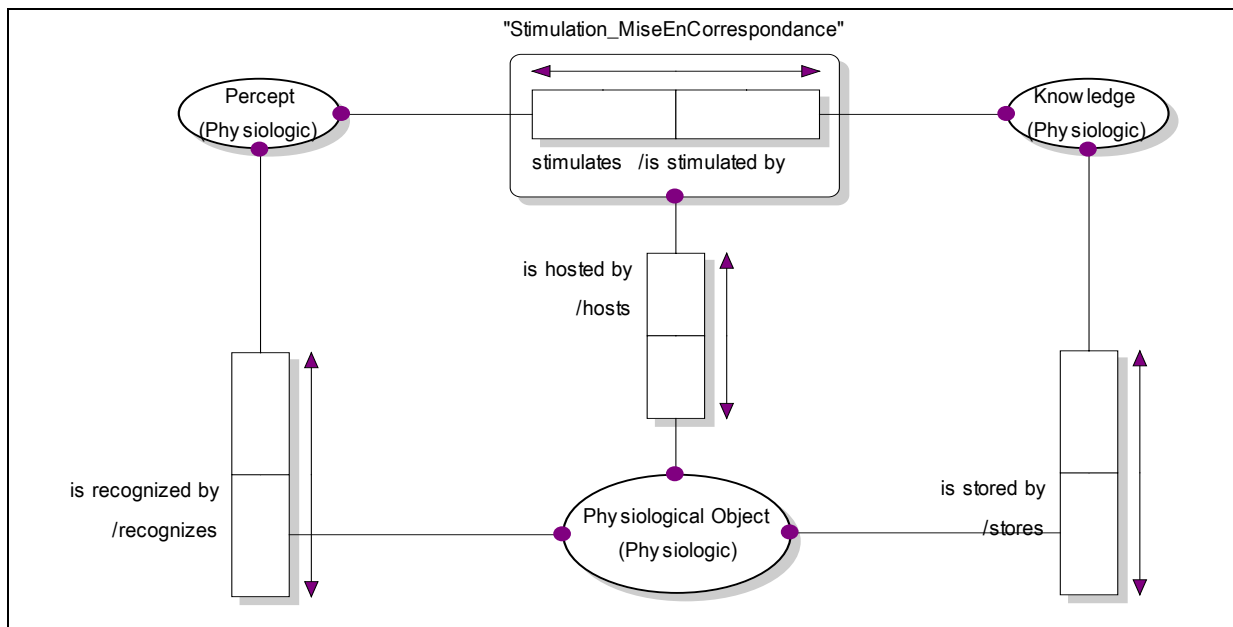


Figure 2-9 - a) Vision des voies afférentes impliquées dans la vision (de la lumière au cortex visuel) et des aires corticales impliquées dans la perception visuelle ; b) Représentation schématique du traitement de l’information visuelle adaptée de (Rolls, 2007), du cortex visuel aux centres de décision et de programmation de l’action constituant en partie le cortex pré-frontal et plus généralement du cortex cognitif, pour aboutir à la mise en place de la procédure P_{LL} (représentée dans la bulle).

Il y aurait ainsi une relation de *mise en correspondance* privilégiée entre un percept et un mécanisme de préparation à l’action, de type *signifiant-signifié**, contingente au contexte d’activité (Lahlou, 2008). Ainsi, selon Berthoz, la perception serait toujours décision à partir de ces mécanismes. Relativement à notre cas d’étude, l’interaction homme-machine peut être considérée comme un processus de mise en correspondance entre un percept ou ‘signifiant’, la couleur orange du verrou, caractérisé par les propriétés de l’objet technique, et une propriété cognitive de l’opérateur, en l’occurrence une connaissance apprise ou ‘signifié’, la procédure P_{LL}.

Nous formalisons cela au travers de **(F7)** dans le modèle (Figure 2-10). Par ailleurs, ce fait souligne l’existence d’associations perceptivo-motrices finalisées avec et entre « objets physiologiques », que nous modélisons au travers de **(F9s)**, ainsi que le rôle primordiale du percept en tant que stimuli-déclencheur de processus physiologiques de mise en correspondance, que nous modélisons au travers de **(F8)**.



(F7): It is possible that some Percept stimulates more than one Knowledge and that some Knowledge is stimulated by more than one Percept.

(F8): Stimulation_MiseEnCorrespondance is an entity object type; Stimulation_MiseEnCorrespondance is an alias for the nested fact type 'Percept stimulates Knowledge' (**Nested_Fact3**)

(F9.1): It is possible that some Stimulation_MiseEnCorrespondance is hosted by more than one Physiological Object and that some Physiological Object hosts more than one Stimulation_MiseEnCorrespondance.

(F9.2): It is possible that some Physiological Object stores more than one Knowledge and that some Knowledge is stored by more than one Physiological Object.

(F9.3): It is possible that some Physiological Object recognizes more than one Percept and that some Percept is recognized by more than one Physiological Object.

Example: Percept ‘Couleur Orange’ stimulates Knowledge ‘Latch-Lock Procedure’

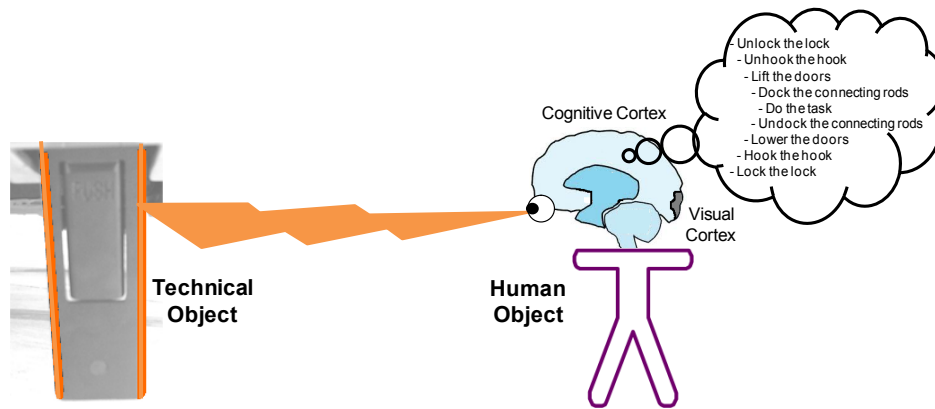


Figure 2-10 - Modèle ORM de l’interaction de perception visuelle entre un Objet technique de couleur orange et un Opérateur humain, envisagée comme la mise en correspondance d’un percept, la couleur orange, et d’une propriété cognitive ou connaissance de l’opérateur, la procédure de fermeture-verrouillage apprise.

Afin de mieux comprendre ces processus, nous nous intéressons dans la partie suivante à un ensemble de travaux issus du domaine de la physiologie intégrative et plus précisément ceux menés dans le cadre de la théorie mathématique de la physiologie intégrative (présentée dans la partie 2.2.2). Ces travaux permettent de construire des modèles explicatifs de ces processus et in fine, à l’aide d’un formalisme mathématique, de les simuler. En effet, au cours de son travail sur les modèles physiologiques, du niveau moléculaire au niveau de l’organisme, Chauvet (fondateur de cette théorie) a introduit de nouveaux concepts spécifiques à l’étude de la biologie pour arriver à définir mathématiquement les processus physiologiques : ils seraient définis comme une combinaison d’*Interactions Fonctionnelles* non symétriques et non locales entre « objets physiologiques », qu’il nomme *unités structurales*, situées dans un *espace hiérarchique*.

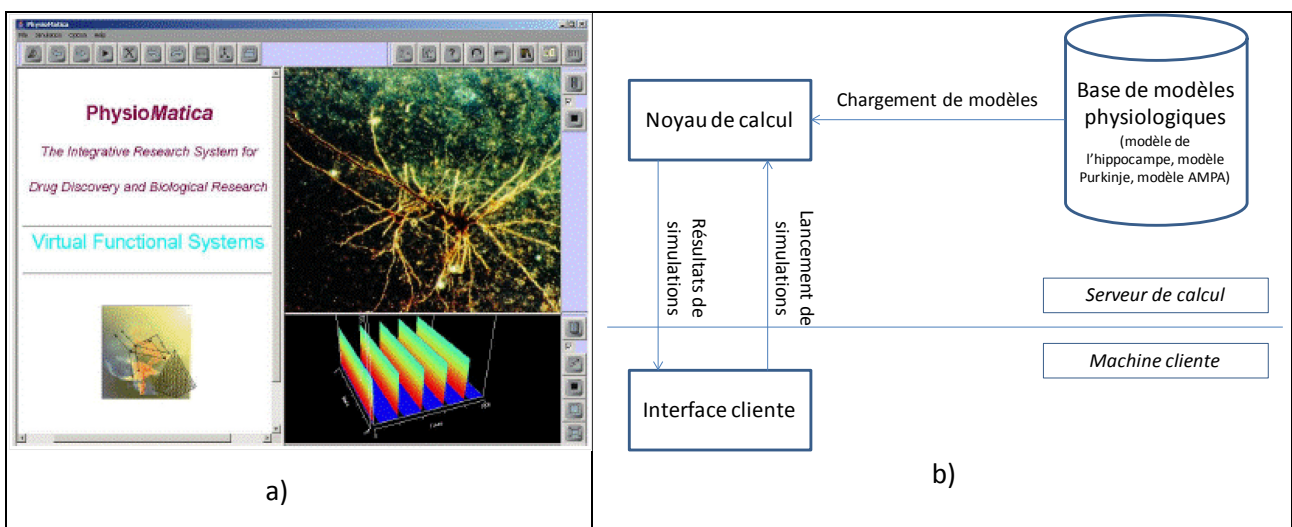
2.2.2. La théorie mathématique de la physiologie intégrative

La théorie mathématique de la physiologie intégrative (MTIP), développée par Gilbert Chauvet (Chauvet, 1993) (Chauvet, 1995) (Chauvet, 2006), est une approche de physiologie théorique qui envisage l’organisme vivant dans sa globalité, c’est-à-dire comme faisant partie d’un système général intégré. Cette théorie postule qu’il existe des contraintes liées à l’intégration des mécanismes biologiques en interaction et qu’il faut ainsi arriver à décrire le fonctionnement du système à partir de ses sous-systèmes en interaction. En effet, pour Chauvet, l’organisme, c’est-à-dire l’ensemble des mécanismes physiologiques qui prennent

place entre les différents éléments biologiques, est un système hiérarchique continu et fini de structures et de fonctions dans des échelles d’espace et de temps. Par ailleurs, le vivant est, pour lui, par essence analogique et les modèles du vivant se doivent donc d’être mathématiquement exprimables de façon formelle. Cette expression mathématique serait la conséquence logique de leur continuité.

L’objectif de Chauvet est ainsi de fournir un cadre théorique et mathématique qui puisse permettre d’intégrer l’ensemble des connaissances expérimentales en physiologie (ex : modèles locaux de cascades biochimiques, modèles locaux de l’hippocampe) pour obtenir un « modèle intégratif » plus représentatif du fonctionnement de l’organisme vivant. De cette manière, il s’est interrogé sur l’existence de principes généraux d’organisation du vivant qui expliquent son *fonctionnement* par un *agencement spatio-temporel de processus basés sur des lois physiologiques*. On voit ainsi l’intérêt en ingénierie système de représenter des processus physiologiques à l’instar, par exemple, de processus physiques. Cet intérêt est renforcé par le fait que la mathématisation de cette théorie a pour objet de rendre computationnel les modèles physiologiques et donc exécutables à des fins de vérification et validation.

Ces travaux ont en ce sens donné lieu à la création de l’entreprise *VFS-Bio* en 2006. Cette société de R&D et de services s’était spécialisée dans la simulation des fonctions physiologiques intégrées du vivant, et a principalement travaillé avec l’industrie pharmaceutique pour la découverte de nouvelles molécules dans le traitement de tumeurs cancéreuses et de maladies dégénératives telles que la maladie d’Alzheimer. Les travaux de (Bennani, 2011), mené dans le cadre d’une thèse CIFRE avec cette entreprise, ont abouti au développement d’un outil de modélisation et de simulation dédié : *PhysioMatica*® (Figure 2-11).



2.2.3. L'interaction fonctionnelle : atome élémentaire du processus physiologique

La MTIP décrit le comportement du vivant par un ensemble d'interactions fonctionnelles, mathématiquement modélisables, se propageant d'unité structurale biologique en unité structurale biologique. Pour comprendre les processus physiologiques impliqués dans la perception visuelle de la couleur orange, nous proposons d'étudier plus en détails ce concept central en utilisant la même approche de modélisation de faits que précédemment.

L'interaction fonctionnelle est considérée comme l'atome élémentaire du processus physiologique (Figure 2-12) (Figure 2-14). Elle se définit comme « l'action d'une structure biologique (source) sur une autre (puits) par l'intermédiaire d'ions ou de molécules » (**F10.1 & F10.2 & F10.6 & F10.8**) et présente plusieurs propriétés spécifiques :

- Non-symétrie: l'interaction fonctionnelle s'exerce d'une unité de structure *Source*⁹ vers une autre unité de structure *Puits*¹⁰. Elle représente une *action unidirectionnelle*, car un même signal ne rétroagira pas, au même niveau d'organisation, du puits vers la source (**F10.3 & F10.5 & F10.7**).
- Causalité événementielle : C'est parce qu'un événement s'est produit à un temps t que l'on observe un comportement au temps t' . Dans notre cas, le percept couleur orange est la cause ou événement qui déclenche l'interaction fonctionnelle entre le cortex visuel et le *cortex cognitif**. Notons que ce fait est couvert par le fait (**F7**) élicité dans la partie précédente.
- Non-instantanéité : la vitesse de transport d'une fonction élémentaire est finie. La stimulation de l'élément de connaissance par le percept couleur orange est de l'ordre de quelques secondes voire $m.s^{-1}$
- Non-localité : Une fonction élémentaire agit à distance et crée des couplages entre structures éloignées. Le *produit* échangé est transporté d'un endroit à un autre non voisin en se propageant au travers de *discontinuités structurales* (**F10.4**).

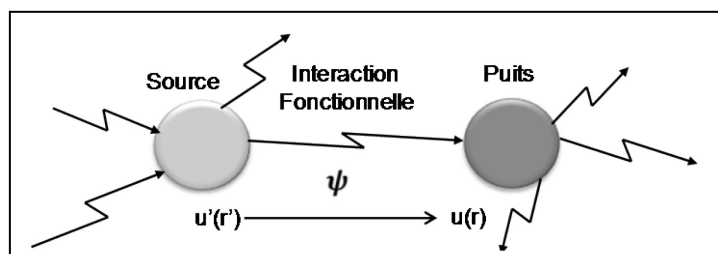


Figure 2-12 - Interaction Fonctionnelle entre la Source $U'(r')$, unité de structure à la position r' , et le Puits $U(r)$, unité de structure à la position r . Puits et Source peuvent devenir tour à tour Source ou Puits (Chauvet, 1995).

⁹ Unité structurale cause de l'interaction fonctionnelle. [Chauvet, 1995]

¹⁰ Unité(s) structurale(s) qui reçoit(vent) l'effet (ion ou molécule) émis par la source. [Chauvet, 1995]

Une interaction fonctionnelle traduit ainsi un mécanisme de passage d'un produit entre au moins deux unités structurales, par exemple le cortex visuel et le cortex cognitif. Ce mécanisme de passage est dépendant à la fois du temps et de l'espace et peut être représenté mathématiquement avec la MTIP (Chauvet, 2002) par des opérateurs de champ non-locaux appelés *S-Propagateur* noté Φ (Figure 2-13).

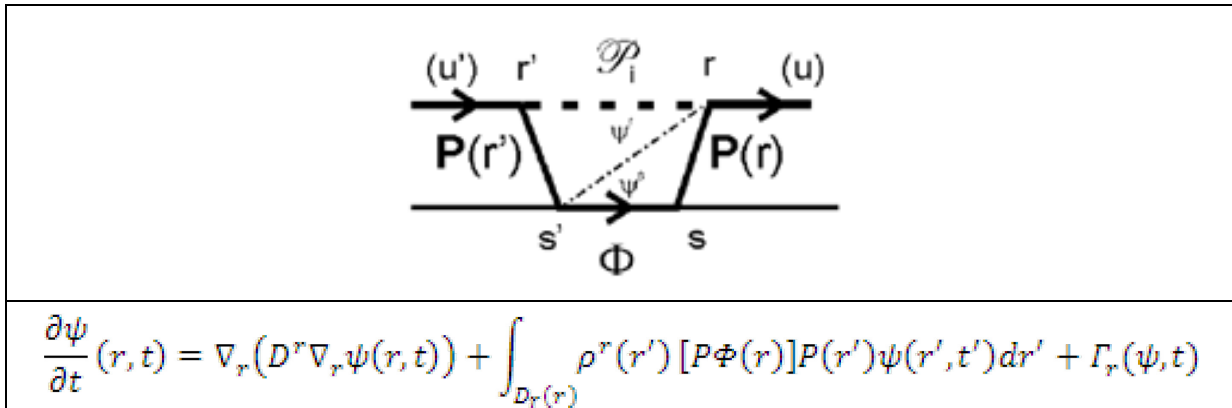
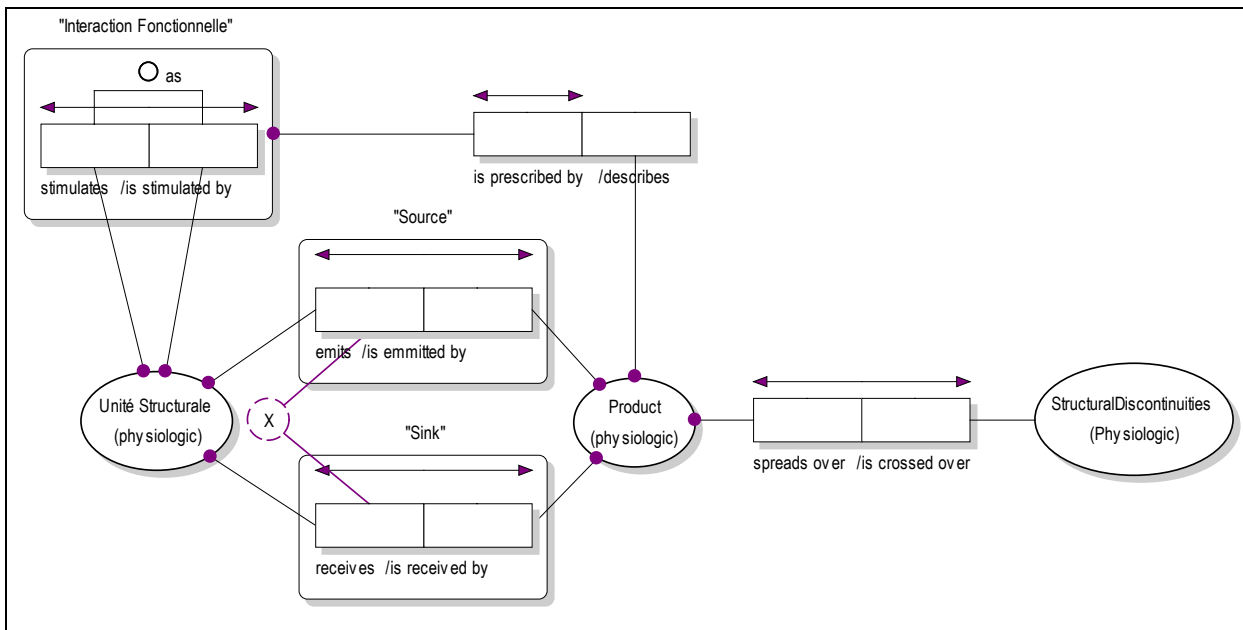


Figure 2-13 - En haut : Schéma illustrant l'interaction fonctionnelle entre u' et u , passant par les niveaux inférieurs de l'organisation hiérarchique structurale. En bas : Exemple d'équation du champ avec une intégration de volume pondérée par une densité de population notée ρ correspondant à la densité d'unités sources et où $[P\Phi(r)]$ représente les éventuels mécanismes qui suivent le passage de ce messager au niveau du puits situé en r (Chauvet, 1995).



(F10.1): It is possible that some Unité Structurale stimulates more than one Unité Structurale and that some Unité Structurale is stimulated by more than one Unité Structurale.

(F10.2): Interaction Fonctionnelle is an alias for the nested fact type 'Unité Structurale stimulates Unité Structurale'

<p>(F10.3): If Unité Structurale u1 stimulates Unité Structurale u2 then it cannot be that Unité Structurale u2 stimulates Unité Structurale u1. (Ring constraint)</p> <p><u>Examples</u>: Unité Structurale Visual Cortex V1 stimulates Unité Structurale Cognitive Cortex; Unité Structurale Cognitive Cortex stimulates Unité Structurale Motor Cortex.</p>
<p>(F10.4): It is possible that some Product spreads over more than one StructuralDiscontinuities and that some StructuralDiscontinuities is crossed over more than one Product.</p> <p><u>Examples</u>: Product Ionic Flow 1 spreads over StructuralDiscontinuities Synaptic Cleft.</p>
<p>(F10.5): It is possible that some Unité Structurale emits more than one Product and that some Product is emitted by more than one Unité Structurale.</p> <p><u>Examples</u>: Unité Structurale Visual Cortex V1 emits Product Ionic Flow 1; Unité Structurale Cognitive Cortex emits Product Ionic Flow 2.</p>
<p>(F10.6): Source is an alias for the nested fact type 'Unité Structurale emits Product'</p> <p>(F10.7): It is possible that some Unité Structurale receives more than one Product and that some Product is received by more than one Unité Structurale.</p> <p>(F10.8): Sink is an alias for the nested fact type 'Unité Structurale receives Product'</p>

Figure 2-14 - Modèle ORM de l’atome élémentaire d’interaction fonctionnelle d’un processus physiologique - L’interaction fonctionnelle émerge de la relation de stimulation entre deux unités structurales et est prescrite in fine par le produit émis par la source u1 ou reçu par le puits u2 qui traverse des discontinuités structurales ; de telles propriétés des mécanismes physiologiques conduisent à une structuration de l’organisme vivant en niveaux d’organisation hiérarchique de ses unités structurales, l’architecture organique, ainsi que de ses processus physiologiques, l’architecture fonctionnelle.

2.2.4. L’interaction fonctionnelle de perception visuelle et les conditions de propagation du produit physiologique

L’interaction de perception visuelle, telle que présentée en (Figure 2-10), peut être appréhendée comme une interaction fonctionnelle $Source_{ObjetTechnique}$ **et** $Puits_{CortexCognitif}$ au sens de la MTIP. Plus précisément, cette interaction se compose d’un ensemble d’interactions Source **et** Puits qui traversent plusieurs milieux de natures différentes, à savoir : le milieu physique, comme l’espace entre l’objet technique et l’opérateur humain, et les nombreux milieux physiologiques, comme les *tissus oculaires* (l’œil) et *cérébraux* (cortex visuel et cognitif).

2.2.4.1. L’interaction fonctionnelle de perception visuelle vue comme un Thyristor

Afin de traduire la dépendance de la mise en œuvre d’une interaction fonctionnelle de perception visuelle vis-à-vis des événements se déroulant dans l’environnement de la future

source lorsqu’elle n’est encore que puits, nous réinterprétons le concept générique proposée par Chauvet en faisant une analogie avec un diagramme « électrique » de type Thyristor (Figure 2-15).

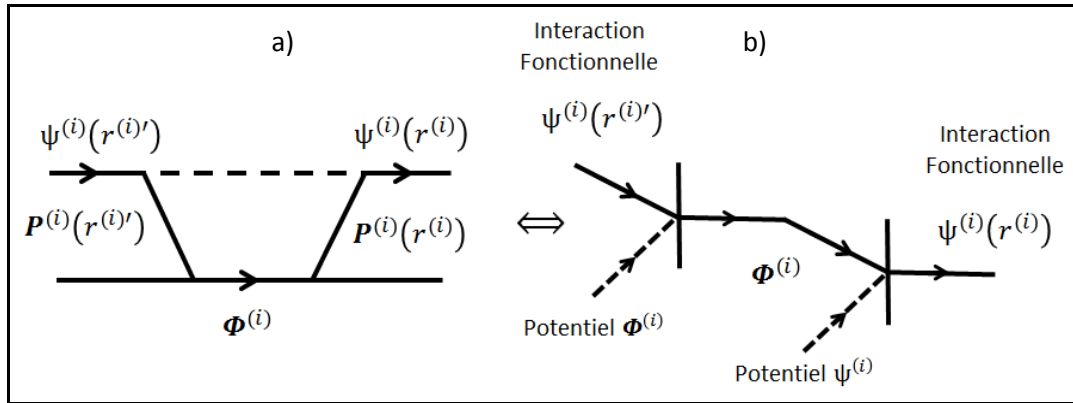


Figure 2-15 - Modèle explicatif de l’interaction fonctionnelle - Analogie entre a) un diagramme de Chauvet et b) un diagramme électrique de type Thyristor pour représenter l’Interaction fonctionnelle de perception visuelle.

Plus précisément, une interaction fonctionnelle ψ située en r' stimule une interaction fonctionnelle Φ d’un niveau inférieur (premier thyristor) qui elle-même va stimuler une interaction fonctionnelle située en r du même niveau supérieur, permettant ainsi d’assurer de r' à r le passage de ψ avec un certain délai dépendant de sa vitesse de propagation (second thyristor). Par exemple, un potentiel d’action ψ d’un neurone situé en r' peut entraîner la libération de neurotransmetteurs au niveau des synapses qui constituent la discontinuité entre ce neurone (source) et son neurone cible (puits). Ils vont ensuite déclencher un autre potentiel d’action en r ou entraîner un effet inhibiteur.

Appliqué à notre exemple, ceci met en exergue que la propagation du produit physiologique jusqu’au cortex cognitif est contrainte par certaines conditions nécessaires telles que la stimulation initiale liée à la couleur orange (en amont du cortex visuel et de l’œil). Nous pouvons ainsi formuler le *postulat* qu’il faut qu’une certaine quantité physique liée au percept couleur orange se propage pour stimuler une connaissance stockée telle que celle matérialisée par la procédure de fermeture-verrouillage.

2.2.4.2. Modèles computationnels et mesures physiologiques

Le modèle explicatif précédent facilite la compréhension de l’ensemble des interactions fonctionnelles¹¹ impliquées dans le processus de mise en correspondance « percept-connaissance » et souligne le rôle clé du stimulus pour permettre la propagation du produit

¹¹ Source_{ObjetTechnique} et Puits_{Oeil} · Puis, Source_{Ceil} et Puits_{CortexVisuel} · Puis, Source_{CortexVisuel} et Puits_{CortexCognitif}

physiologique. Pour notre cas de figure, nous pourrions nous intéresser à l’interaction fonctionnelle entre le cortex sensoriel visuel et le cortex cognitif et ainsi chercher à construire ce type de modèle computationnel (Figure 2-16) mais la condition est de pouvoir disposer des données nécessaires (ex : densités de population cellulaire). Or, de telles données ou mesures sont indisponibles dans la littérature et leur obtention par expérimentation est beaucoup trop longue. Par ailleurs, ce n’est pas forcément le facteur d’échelle nécessaire en Ingénierie Système : à savoir « descendre » au niveau moléculaire dans la description mathématique des mécanismes physiologiques.

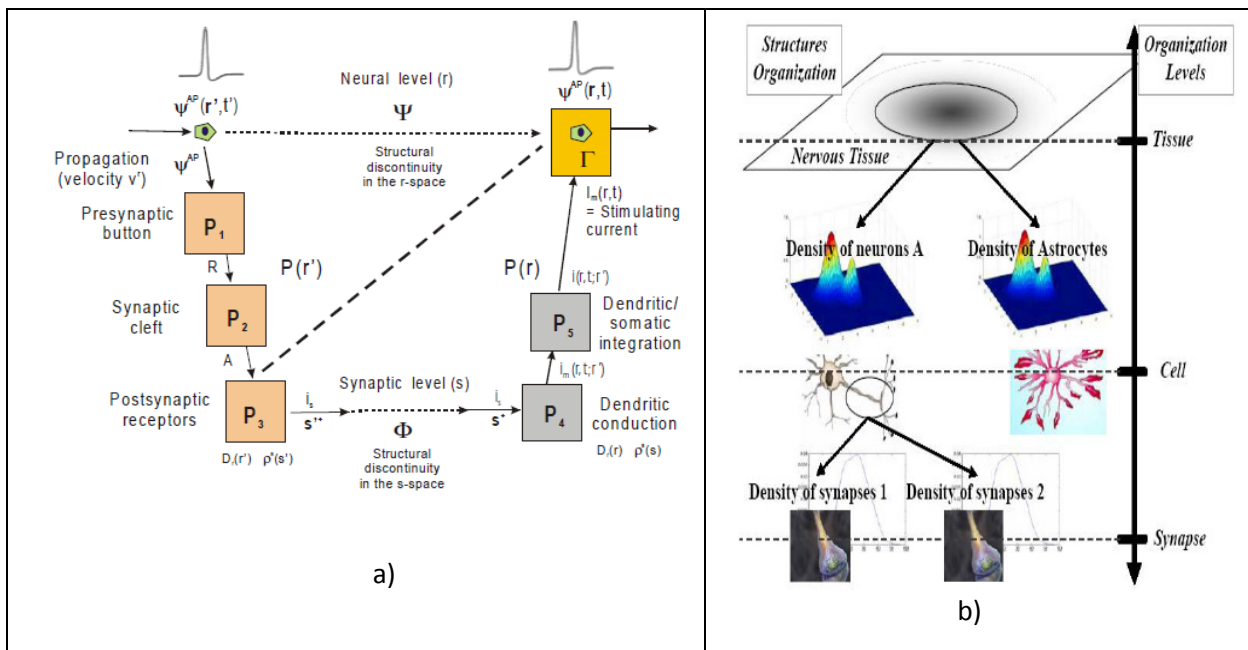


Figure 2-16 - a) exemple modèle computationnel dit Bloc-diagramme ; b) un tissu nerveux qui est lié à un certain nombre de densités cellulaires; les cellules neurales sont associées à un certain nombre de densités synaptiques (Bennani, 2011).

En l’état des connaissances disponibles et par rapport à notre objectif de spécifier des exigences mesurables, nous avons limité notre étude de l’interaction fonctionnelle de perception visuelle en amont des zones corticales. Nous nous sommes ainsi intéressés à l’organe sensoriel impliqué dans la perception d’informations visuelles, à savoir l’œil.

2.2.5. Conclusion : Le flux lumineux, objet interface de l’interaction de perception visuelle entre la Fovéa de l’œil et le Latch

L’œil, en tant qu’organe sensoriel, véhicule jusqu’aux aires corticales dédiées un certain nombre d’informations des objets de l’environnement qui permettent de distinguer les formes, les dimensions, les couleurs ou les déplacements (Purves, 2011). Cet organe est composé de plusieurs unités structurales (Figure 2-17) qui permettent in fine de réaliser un

certain nombre de sous-fonctions, telle que l’accommodation, pour véhiculer un percept vers la zone corticale impliquée dans son traitement.

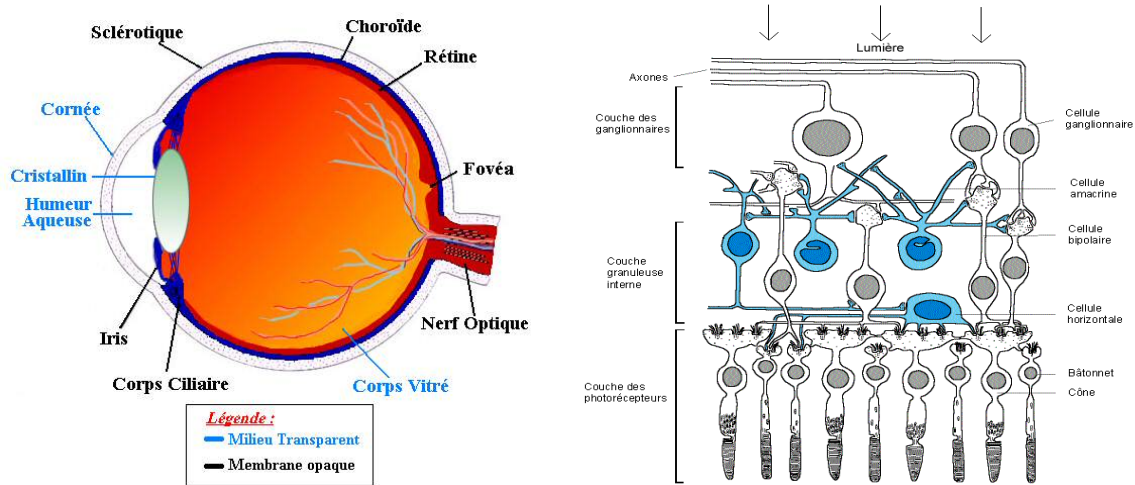


Figure 2-17 - Représentation anatomique de l’œil et histologique de la rétine

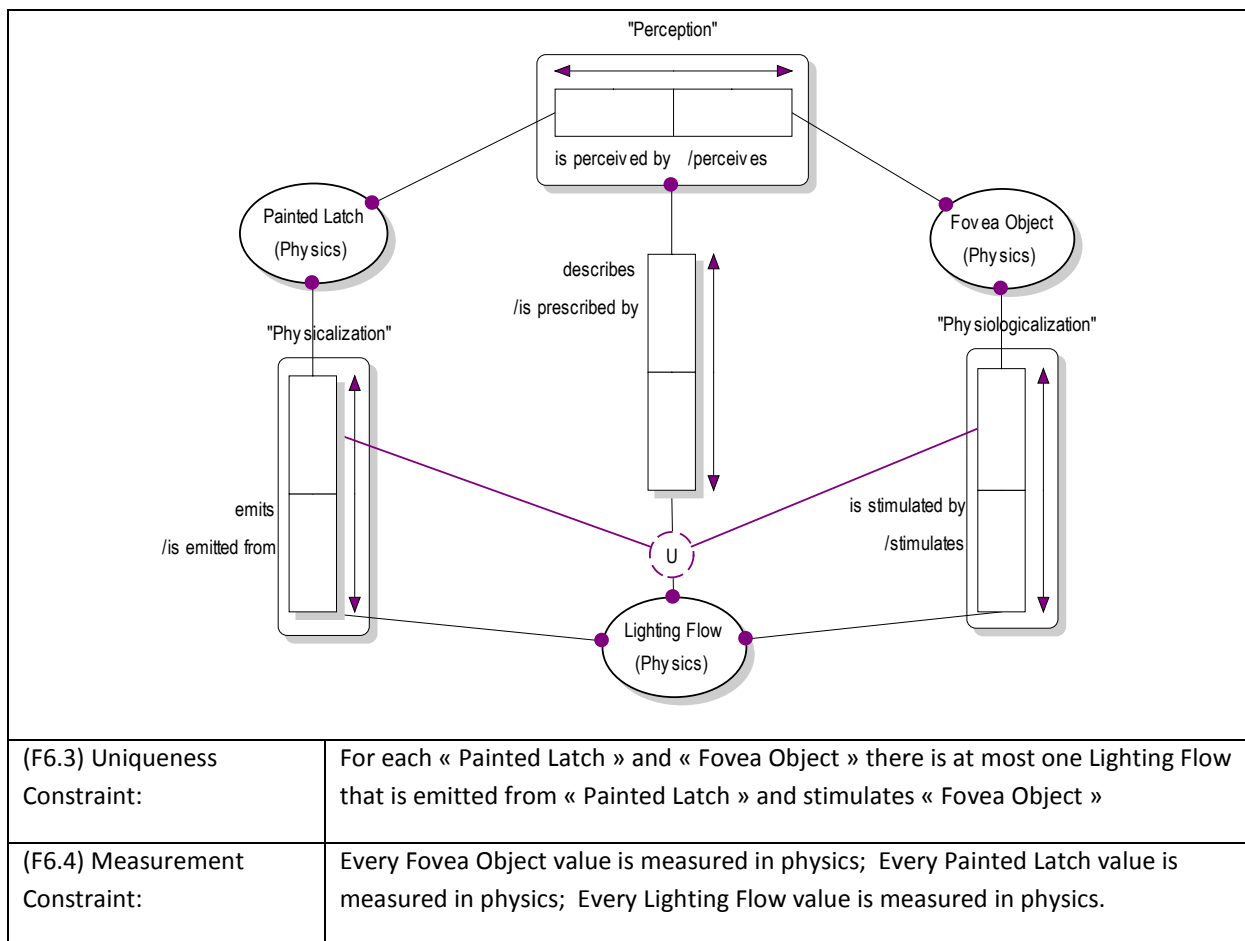


Figure 2-18 - Modèle ORM de l’analyse organique de l’interaction homme-machine de perception instancié et adapté à notre cas d’étude au regard des résultats présentés dans la partie 2.2 de ce chapitre.

Parmi ces unités, on distingue une région centrale, appelée *Fovéa*, composée de cellules photo-réceptrices, appelés cônes, directement impliquées dans la perception des couleurs. En passant d'un peu plus de cent vingt millions de cellules photo-réceptrices à environ un million de cellules ganglionnaires, la rétine compacte l'image qui n'est pas traitée ponctuellement mais par ces surfaces de différentes tailles. Ces mesures sont ensuite véhiculées par émission de potentiels d'action dans le nerf optique, prolongement des axones des cellules dites ganglionnaires, vers le corps géniculé latéral et la région V4 du cortex visuel.

La MTIP nous permet d'établir le *postulat* que ces différentes discontinuités structurales (de l'œil) n'interfèrent pas sur la nature des données émises par l'objet technique : il s'agit là d'un organe robuste. Ceci signifie que le flux physiologique se propageant depuis les premières structures de l'œil jusqu'à la fovéa est équivalent au flux en entrée de ces structures. Ainsi, la fovéa représente l'objet humain d'intérêt (« Fovea Object ») et le « flux-entrée » correspondant à un flux lumineux représente l'objet interface (« Lighting Flow ») dans (Figure 2-18).

2.3. Conclusion : L’interaction homme-machine contingente à la bonne stimulation physico-physiologique émise par la source technique

Dans ce chapitre, nous avons construit un cadre d’analyse intégratif¹² de l’interaction homme-machine dont nous avons élicité les artefacts essentiels de connaissances à l’aide du formalisme NIAM/ORM. Il est à noter que ce cadre repose sur les résultats d’un premier travail d’analyse du cadre théorique des affordances, donnant lieu à la mise en avant d’un objet interface central à l’étude de l’interaction, et sur deux approches de physiologie complémentaires : l’une permettant de postuler le caractère central du stimulus pour déclencher les mécanismes d’action, l’autre permettant d’appréhender les conditions de la propagation de ce stimulus parmi les différentes unités structurales biologiques que nous avons également modélisées en faits.

Le résultat majeur de cette étude, présentée dans ce chapitre 2, est de montrer la contingence de l’interaction homme-machine à la bonne stimulation physico-physiologique d’un « Puits » biologique à partir d’une « Source » technique externe telle que le mécanisme de fermeture-verrouillage. Nous mettons ainsi en évidence une condition nécessaire pour spécifier une exigence mesurable de perception-action, bien que non suffisante en l’état des connaissances pour spécifier l’ensemble des modalités d’interaction.

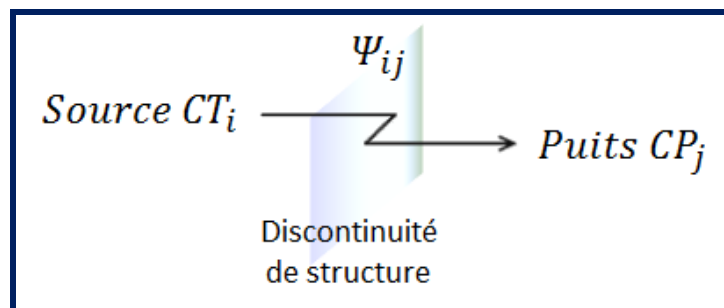


Figure 2-19 - Interaction fonctionnelle entre la source CT_i et le puits CP_j qui transporte DTP_{ij} (le produit de l’interaction Ψ_{ij}) à travers une discontinuité de structure.

Par ailleurs, compte tenu de nos postulats, l’interaction homme-machine peut être décrite par un objet artificiel (Technique) et un opérateur (Humain) qui interagissent à travers une ou plusieurs Composantes Techniques (CT) et une ou plusieurs Composantes "sensorielles" Physiologiques (CP) (Figure 2-19). Cette interaction de nature physico-physiologique transporte une quantité de Données (de nature) Technico-Physiologique (DTP) et subit par la

¹² C’est-à-dire où nous posons l’interaction homme-machine comme un tout

suite une Transformation Physico-Physiologique (TPP), correspondant à une transmutation¹³, pour permettre sa propagation de nature physiologique jusqu’à la région cognitive dédiée pour ensuite déclencher une action.

Mais cette propagation est conditionnée par la quantité DTP propagée. Relativement à notre cas d’étude, le flux lumineux physique à destination de la fovéa doit être suffisamment puissant pour permettre la propagation du percept couleur orange jusqu’au cortex cognitif. Ceci soulève la question des seuils de déclenchements (seuils perceptifs) et représente une condition nécessaire pour aboutir à l’exécution de la procédure de fermeture-verrouillage. Ceci met également en évidence l’importance de la bonne spécification du flux physique stimuli-source.

Ainsi, nous poursuivons notre objectif de spécification d’exigences mesurables en nous intéressant aux conditions de fourniture de cette puissance minimale par le latch, dans la lignée des travaux du *NASA Vision Group* (Watson et al., 2012), mais en explorant la dimension physique de l’interaction ou processus de « physicalisation » comme nous l’avons appelé en début de partie 2.2.

¹³ La transmutation est le 4^{ème} opérateur systémique (après les transformations de Temps/Espace/Forme) qui correspond à la transformation de nature du flux (ex : Physique en Information) (Le Gallou et al., 1992).

3. Intégration d'exigences physico-physiologiques en ingénierie d'un système support de maintenance aéronautique

Les résultats mis en avant dans le chapitre 2 nous ont permis de circonscrire la spécification de propriétés d'interaction par l'étude de la nature physique de l'interaction homme-machine. Notre attention se porte à présent sur les services que l'objet technique, en tant que source de cette interaction, doit nécessairement fournir à la fovéa pour permettre la perception physiologique du percept couleur orange (Figure 3-1). L'activité de spécification, présentée en partie 3.1 de ce chapitre, consiste à présent à étudier la propagation du flux lumineux lié à la couleur orange jusqu'à la fovéa.

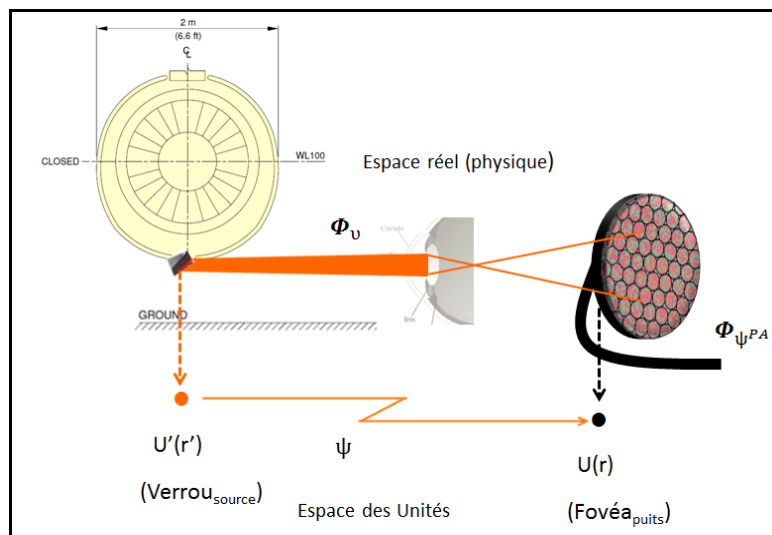


Figure 3-1 - Interaction fonctionnelle entre le Verrou_{source} et la Fovéa_{puits}

Pour cette activité de spécification, nous nous appuyons sur les travaux de (Jackson, 2001) et de (Hall et al., 2005) qui nous amènent à appréhender les exigences système comme le résultat d'un processus transformationnel associant un mode linguistique optatif, correspondant au besoin décrit par un espace de problème, en l'occurrence celui de la perception du flux lumineux se propageant, et un mode linguistique indicatif, représentant les connaissances apportées par un espace de solution, en l'occurrence un système homme-machine. Nous revenons plus en détails sur cette relation espace problème – espace solution au cœur des relations d'interopération du processus de spécification (partie 3.1.1).

Sur la base de cette vision du processus de spécification système, nous définissons des exigences-système de l'interaction physico-physiologique de perception visuelle (partie 3.1.2) en cohérence avec les bonnes pratiques de l'ingénierie des exigences telles que définies dans

(Fanmuy, 2012). Plus précisément, les exigences système doivent posséder certaines caractéristiques et qualités pour permettre la bonne mise en œuvre de leur spécification ainsi que d'assurer leur vérification et validation. En effet, devant être exprimé dans le langage de la maîtrise d'œuvre (fournisseur de solution), une exigence système doit être :

- **Mesurable** : elle doit être couverte par un plan de vérification/validation avec des plages de réglages définies.
- **Utile** : l'information contenue dans l'exigence est strictement nécessaire, complète et précise afin d'éviter toutes prises de choix ou options en conception.
- **Faisable** : l'exigence définie est atteignable compte tenu du contexte pour lequel elle est définie.
- **Simple** : l'exigence est non-ambigüe et ainsi comprise et acceptée de la même façon par toutes les parties prenantes.
- **Traçable** : une exigence satisfait une demande amont et est justifiée/vérifiée/validée/allouée à un constituant du système. On doit pouvoir disposer à tout moment de cette vision des relations hiérarchiques.

Dans le cadre d'une approche système, comme un Tout, l'ingénieur système, encore appelé Architecte Système ou Architecte Intégrateur, doit assurer la bonne mise en œuvre de ce processus (et des pratiques associées). Au cours de cette activité, il fait appel à des experts/spécialistes métiers qui sont les mieux placés pour prescrire les caractéristiques attendues du système à faire relativement au besoin système exprimé (AFIS, 2009). Ensuite, il coordonne ces différentes exigences en cohérence avec le besoin dicté par le domaine opérationnel.

Par ailleurs, nous utiliserons, au cours de notre exercice de révision d'un scénario plausible de co-spécification sur notre cas d'étude, le langage de modélisation « **System Modeling Language** » (SysML, 2008), présenté en annexe 2, afin de modéliser les différentes exigences système mises en avant au cours de notre analyse (diagramme d'exigences) de l'interaction de perception visuelle de la couleur orange liée au contrôle de l'état fermé et verrouillé des capots moteurs et également de montrer la construction itérative d'une spécification.

Les résultats présentés nous amènent, en partie 3.2, à repenser l'ingénierie d'un système homme-machine et principalement le processus collaboratif de spécification (partie 3.2.1), tel qu'illustré en introduction de ce mémoire, puis à identifier les impacts d'une telle vision pour l'ingénierie d'un système support de maintenance aéronautique (partie 3.2.2).

3.1. Co-spécification d'exigences physico-physiologiques de l'interaction de perception visuelle

Relativement à notre objectif d'amélioration de l'intégration des facteurs humains physiologiques par la prescription d'exigences mesurables, nous nous sommes intéressés au processus de spécification d'un système homme-machine en tant que tel. Notre objectif est de constituer un cadre intégratif de travail qui guide l'ingénieur système dans sa tâche de spécification d'un système composé d'éléments de nature artificiel et naturel. Nous mettons ainsi en pratique le paradigme de spécification d'un système sociotechnique¹⁴ proposé par (Hall et al., 2005), voir partie 3.1.1, afin de montrer la construction itérative *a posteriori* (révision) de la spécification système avec SysML sur un scénario plausible de co-spécification¹⁵ d'une interaction de perception visuelle (partie 3.1.2). Nous soulignons par ailleurs la manière dont les relations Artefact-Environnement¹⁶, Utilisateur-Environnement et Artefact-Utilisateur du modèle AUTOS (Boy, 2011) s'intègrent dans ce cadre prescriptif.

3.1.1. Processus de co-spécification d'un système homme-machine

Le processus de spécification constitue le processus pivot de l'ingénierie du système. En effet, les résultats de ce processus permettent aux parties prenantes utilisatrices et conceptrices de s'entendre clairement sur le système à faire et de suivre son développement (vérification et validation). Les travaux menés au sein de notre laboratoire depuis 2010 s'intéressent à ce processus critique et interprètent les travaux menés en génie logiciel (Jackson, 2001) pour en formaliser les artefacts-clés, notamment ceux de la partition « espace problème – espace solution » et de l'objet « spécification ».

Nous proposons ci-après de présenter en détails les fondements de notre vision de ce processus pour la spécification de système homme-machine.

3.1.1.1. L'approche des Problem Frames

Le paradigme de spécification au centre des travaux de Hall est emprunté à des travaux antérieurs menés par (Jackson, 2001) dans le cadre de l'approche des « Problem Frames » (PF) pour l'ingénierie logicielle. Nous proposons dans cette partie de présenter tout d'abord

¹⁴ Hall et al. définissent un système sociotechnique comme suit : *“By socio-technical system we mean a collection of interacting components in which some of the components are people and some are technological”*.

¹⁵ Cette co-spécification s'appuie sur les postulats que nous avons établis en chapitre 2 quant à l'interaction homme-machine.

¹⁶ Nous pouvons « réduire » les 5 relations du modèle AUTOS en 3 relations principales en regroupant sous le terme Environnement les facteurs T-O-S du modèle de (Boy, 2011)

cette approche au travers des travaux d'origine en Spécification de Systèmes Informatiques, pour ensuite présenter l'adaptation de Hall à la spécification de systèmes sociotechniques.

Spécification de systèmes informatiques

L'approche PF est une approche orientée sur le problème¹⁷ (« Problem-Oriented Engineering ») qui fournit un cadre théorique de description des interactions entre les éléments d'un domaine de problème et les éléments d'un domaine de solution.

Ce cadre de description, développé à l'origine pour l'ingénierie logicielle et le développement de systèmes informatiques, permet à un développeur de comprendre le contexte dans lequel réside le problème à résoudre et d'identifier les aspects pertinents pour la conception d'une solution appropriée. Plus précisément, l'objectif est de réaliser un programme informatique P implémentable sur une machine M qui est intégrée dans un environnement W.

Afin de faciliter la compréhension des éléments de cette approche, nous proposons de revenir sur le modèle de référence (Figure 3-2) proposé par (Gunter et al., 2000) qui s'inscrit dans l'approche PF et s'intéresse plus précisément au besoin R et à la nature de la spécification S prescrivant le programme P à implémenter sur la machine M.

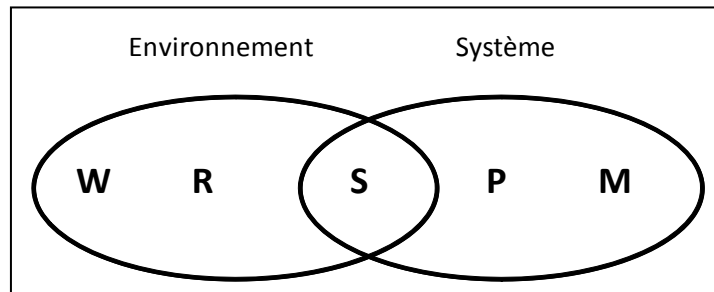


Figure 3-2 - Modèle de référence pour les exigences et les spécifications (Gunter et al, 2000) – niveau 1

Ce modèle présente cinq artefacts répartis entre le domaine de l'environnement et le domaine du système :

- la connaissance du domaine (« **World knowledge** ») qui fournit des connaissances sur l'environnement d'intérêt ;
- les besoins (« **Requirements** ») des utilisateurs du système, décrits sous la forme d'effets sur l'environnement ;

¹⁷ <http://problemooriented.wikispaces.com/>

- les spécifications (« **Specifications** ») situées à l'interface entre l'environnement et la machine M ;
- le programme (« **Program** ») qui implémente les spécifications en utilisant la plate-forme de programmation M ;
- la plate-forme de programmation (« **Machine** ») fournit la base pour programmer un système qui satisfait les exigences et les spécifications.

Remarque : De manière plus générale, la machine M et le programme P représentent le système à faire ou à construire.

(Jackson, 1997) distingue deux types de description de l'environnement : un mode linguistique optatif, et un mode linguistique indicatif. Le premier exprime une condition sur les phénomènes de l'environnement que nous souhaitons obtenir par la mise en place de la machine. Une description optative décrit donc comment doivent être les choses (R dans le modèle de référence). Le deuxième exprime une condition sur les phénomènes de l'environnement que nous savons être vraie indépendamment des propriétés et comportements de la machine. Une telle description représente donc les connaissances sur l'environnement (W dans le modèle de référence).

(Gunter, 2000) affine cette vision en proposant de distinguer clairement les phénomènes appartenant à l'environnement et contrôlé par celui-ci, e_v et e_h , de ceux appartenant au système et contrôlé par ce dernier, s_v et s_h . Une telle séparation (Figure 3-3) souligne d'un côté l'existence de phénomènes visibles par l'environnement et utilisés en W et en R (e_h , e_v et s_v), et d'un autre côté, les phénomènes visibles par le système et utilisé en P et en M (s_h , s_v et e_v). De cette manière, la spécification S serait exprimée sur les phénomènes visibles par l'environnement et le système (e_v et s_v). Elle se définirait formellement par :

$$\forall e, s. W \wedge S \Rightarrow R$$

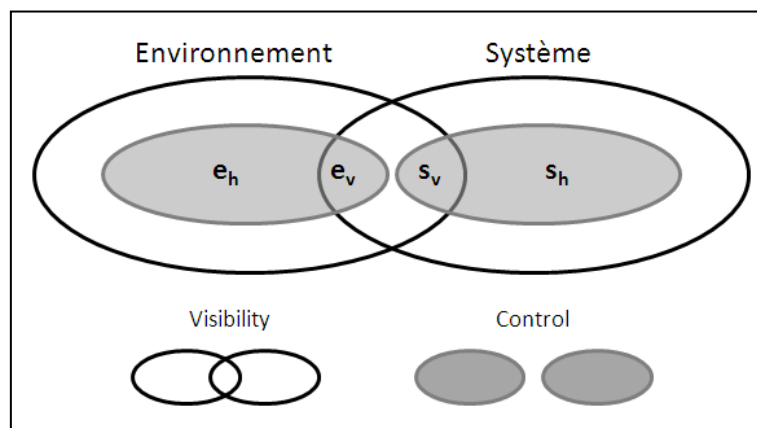


Figure 3-3 - Modèle de référence pour les exigences et les spécifications (Gunter et al, 2000) – niveau 2

Spécification de systèmes sociotechniques

Hall et Rapanotti (Hall & al. 2005) ont proposé d'appliquer le cadre des PF aux systèmes de nature sociotechnique (Figure 3-4). Pour cela, ils ont étendu le modèle de référence proposé par Gunter et Jackson afin de considérer l'humain (H) comme élément de solution supplémentaire. Les auteurs proposent ainsi d'ajouter, à l'espace de solution, le nouveau domaine H.

De cette manière l'humain H devient un élément du système dont il faut arriver à gérer la spécification d'exigence pour répondre au besoin en cohérence avec les spécifications techniques du domaine M (Brier et al., 2005). Ainsi, deux nouveaux éléments apparaissent : I (« Instructions ») qui prescrit les connaissances K (en. Knowledge) et le comportement attendu de l'humain (ou plus généralement les capacités humaines) ; UI (« User Interface ») qui prescrit l'Interface Homme-Machine.

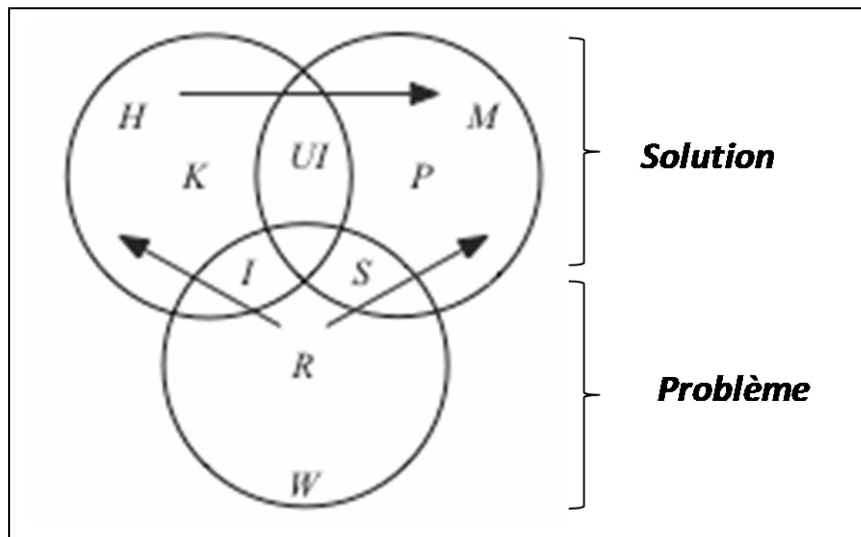


Figure 3-4 - Modèle d'analyse des exigences d'un système sociotechnique (Hall et al., 2005) et l'ordre du processus de spécification (Brier, 2005)

Une solution à un « problème sociotechnique » est alors prescrite au travers de spécifications des domaines de la machine **et** de l'humain selon :

$$W \wedge S \wedge I \wedge UI \Rightarrow R$$

Le processus de spécification débute du domaine du problème vers les domaines de solution technique et humain, en commençant par ce dernier. En effet, ce domaine peut imposer des contraintes supplémentaires sur la conception des systèmes techniques (marqué par les flèches).

3.1.1.2. Notre interprétation pour le processus de spécification d'un système homme-machine en ingénierie système

Dans cette partie, nous proposons de présenter notre construction d'un processus de spécification d'un Système Homme-Machine en Ingénierie Système, basée sur notre interprétation de l'approche des PF. Cette construction s'articule selon trois axes : 1/ les différents types d'exigences système requises pour spécifier un système homme-machine, 2/ notre vision structurale de l'exigence système (« *specification* »), et 3/ le processus de spécification d'exigences système d'un système homme-machine.

Notons que cette vision particularisée et spécifique au système homme-machine est cohérente avec les fondements de l'ingénierie des exigences en Ingénierie Système (en amont des phases d'architecture) tels que la spécification du Système comme un *TOUT* (fondement de l'approche *Systémique*) comme souligné dans (AFIS, 2009) (Fanmuy, 2012).

Concurrence de 3 types d'exigences pour spécifier le système homme-machine

Dans la continuité des travaux de (Dobre, 2010) (Bouffaron, 2012), nous réinterprétons le cadre de modélisation proposé par Hall et al. (Figure 3-5) en adaptant le prédicat à satisfaire :

$$W_{LL} \wedge I_{TW} \wedge I_{HW} \wedge I_{TH} \Rightarrow R_{LL}$$

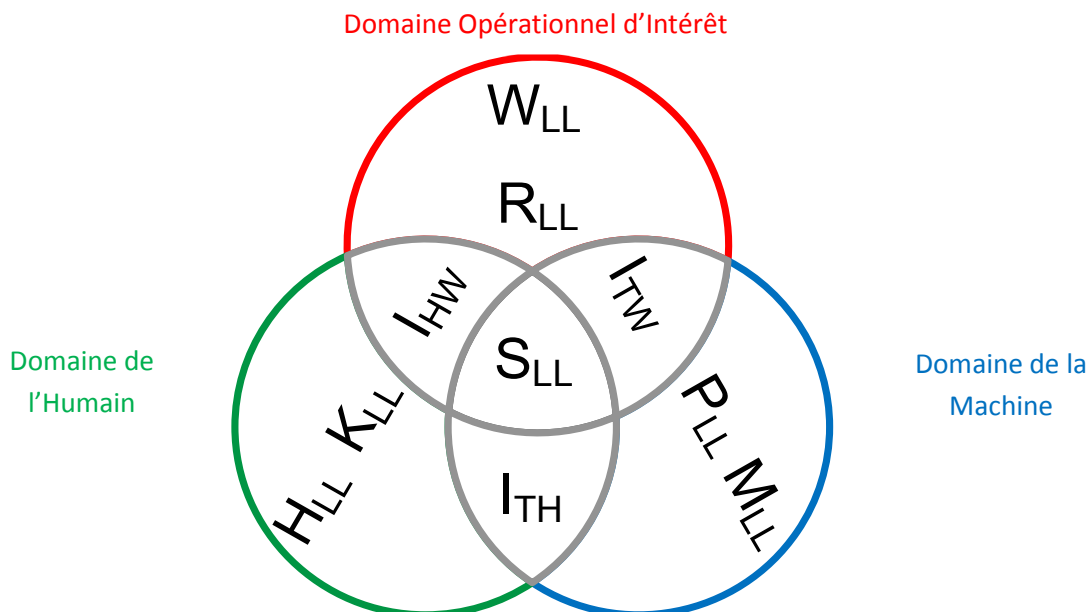


Figure 3-5 - Adaptation du Modèle de Référence d'un Système Sociotechnique de (Hall & Rapanotti, 2005) ; les intersections des trois ensembles représentent le système homme-machine à faire.

Ce prédicat met en évidence que trois types de spécifications (notées I_{TW} , I_{HW} , I_{TH}) concourent de façon itérative à la spécification système S_{LL} (P1) prescrivant le « système homme-machine de contrôle de l'état fermé **et** verrouillé des capots (comme un Tout) » pour satisfaire l'ensemble des exigences R (P2), selon :

$$I_{TW} \wedge I_{HW} \wedge I_{TH} \Rightarrow S_{LL} (P1)$$

Plus précisément,

- W_{LL} restreint, dans notre cas, le domaine d'intérêt au sous-domaine d'exploitation d'un aéronef pour spécifier le système homme-machine S_{LL} à faire afin de satisfaire l'exigence de remise en condition opérationnelle R_{LL} selon : $W_{LL} \wedge S_{LL} \Rightarrow R_{LL}$ (P2)
- I_{TW} spécifie les exigences techniques du système à faire prescrivant la procédure opératoire P_{LL} pour mettre en œuvre le mécanisme de fermeture-verrouillage M_{LL} en W_{LL} selon : $W_{LL} \wedge M_{LL} \wedge P_{LL} \Rightarrow I_{TW}$. I_{TW} est associé à la relation Artefact-Environnement.
- I_{HW} spécifie les exigences facteurs humains du système à faire prescrivant les capacités K_{LL} que doit avoir l'Humain H_{LL} (opérateur de maintenance) pour opérer en W_{LL} selon : $W_{LL} \wedge H_{LL} \wedge K_{LL} \Rightarrow I_{HW}$. I_{HW} est associé à la relation User-Environnement.
- I_{TH} spécifie les exigences d'interaction homme-machine du système à faire prescrivant les propriétés d'interface en W_{LL} selon : $W_{LL} \wedge K_{LL} \wedge P_{LL} \Rightarrow I_{TH}$. I_{TH} est associé à la relation Artefact-Utilisateur ('U-A').

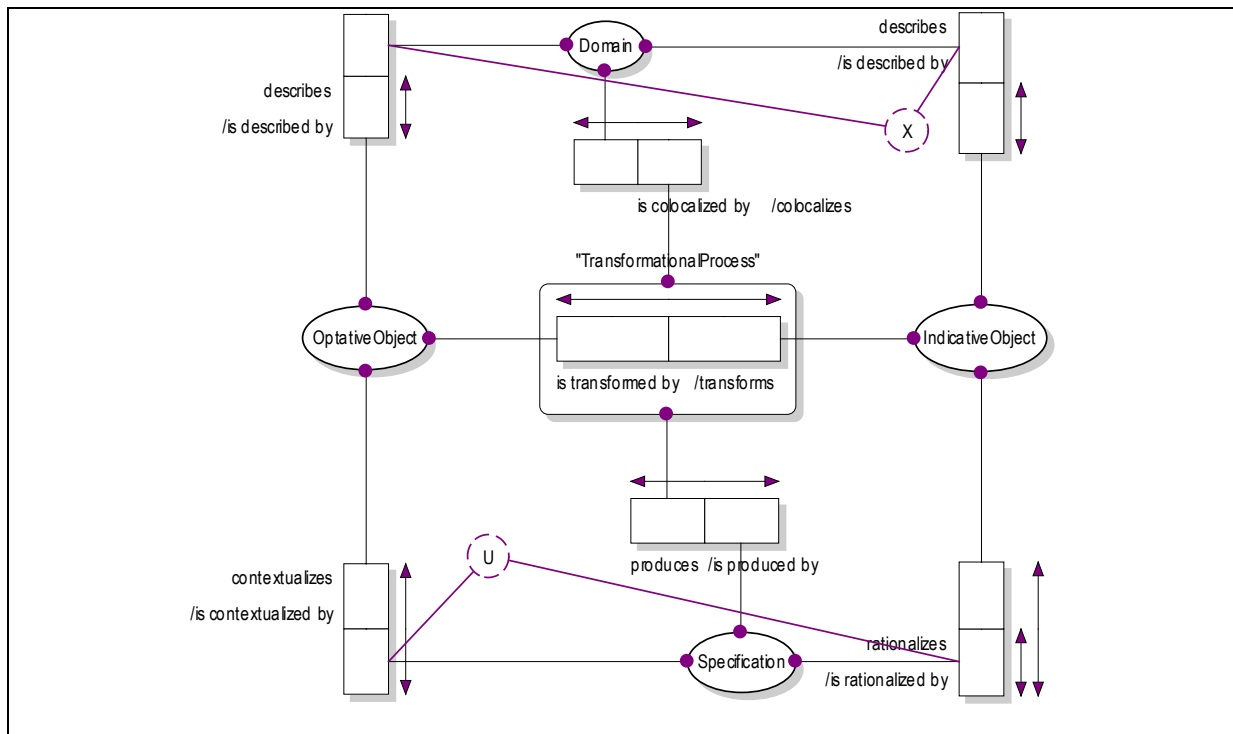
Notre objectif dans cette thèse n'est pas de spécifier le système comme un tout, puisque compte tenu des données dont nous disposons, nous ne remettons pas en cause les spécifications de type I_{TW} et I_{HW} sur notre système homme-machine d'intérêt. Comme notre but, relativement à ce que nous avons pu présenter en partie 1.2 de ce mémoire, est d'explorer la possibilité d'un processus non dichotomique de spécification entre domaine technique et facteurs humains, nous nous intéressons uniquement à la spécification de type I_{TH} .

Vision compositionnelle de l'exigence

L'exigence système, aussi appelée Spécification système, est le résultat d'un processus transformationnel à partir d'un besoin. Le cadre de spécification des PF nous permet de définir plus précisément cet objet clé pour les activités de conception système. En effet, comme souligné précédemment, un intérêt des travaux de (Jackson, 1997) est d'associer deux modes linguistiques pour spécifier une exigence, l'un « optatif » décrivant ce qui est requis (le besoin) par une exigence comme R_{LL} d'un domaine cible, l'autre « indicatif »

décrivant ce qui doit être connu (les connaissances) sur ce domaine comme W_{LL} pour prescrire une solution technique (Figure 3-6).

Aussi, dans le modèle NIAM/ORM ci-dessous, nous modélisons notre vision de l'exigence système au centre de notre processus de spécification. Un point important à souligner est que les exigences n'existent pas ex-nihilo mais qu'elles émergent de processus transformationnels co-localisés entre un domaine décrivant l'objet optatif (ou besoin) et un domaine décrivant l'objet indicatif (ou la connaissance requise pour spécifier une solution).



It is possible that some OptativeObject is transformed by more than one IndicativeObject and that some IndicativeObject transforms more than one OptativeObject.

It is possible that some TransformationalProcess produces more than one Specification and that some Specification is produced by more than one TransformationalProcess.

It is possible that some TransformationalProcess colocalizes more than one Domain and that some Domain is colocalized by more than one TransformationalProcess.

It is possible that some Specification is rationalized by more than one IndicativeObject and that some IndicativeObject rationalizes more than one Specification.

It is possible that some OptativeObject contextualizes more than one Specification and that some Specification is contextualized by more than one OptativeObject.

Exclusion constraint: For each Domain d, at most one of the following holds: Domain d describes some IndicativeObject; some OptativeObject is described by Domain d.

Uniqueness Constraint: {Specification} is rationalized by IndicativeObject; OptativeObject

contextualizes {Specification}.

Figure 3-6 - Modèle NIAM/ORM de notre vision de la Spécification, vu comme un objet émergeant d'un processus transformationnel et reliant une partie optative avec une partie indicative.

En ce sens, les résultats que nous avons présentés en chapitre 2 de ce mémoire approfondissent la connaissance « indicative » physico-physiologique devant être connue par l'ingénieur système pour spécifier des exigences mesurables du système homme-machine.

Par ailleurs, d'autres travaux du laboratoire ont interprété cette construction d'une exigence (Gouyon, 2013) pour mettre en évidence les relations de description-prescription entre espaces problème et solution de domaines spécialistes collaborant à une spécification système. Ces relations constituent la base de notre processus de spécification collaboratif, que nous proposons de présenter ci-dessous.

Un processus collaboratif récursif et itératif

L'application de cette approche et de cette vision du besoin et de la spécification en Ingénierie Système a amené, au sein de notre laboratoire, à interpréter le modèle de référence comme, dans un premier temps, une partition entre domaines, où l'environnement représente le domaine d'exploitation visé et où le système S représente le domaine d'IS ; et dans un deuxième temps, une partition entre le domaine de l'IS et les domaines métiers des composants du système (Figure 3-7).

De plus, cette interprétation du procédé d'IS considère qu'un domaine d'intérêt i est partitionné en espace problème (EP_i) et espace solution (ES_i), et généralise cette partition à l'ensemble des domaines impliqués dans le processus collaboratif d'ingénierie système. Chaque relation d'interopération entre un espace problème (EP_a) et un espace solution (ES_b) est considérée comme une spécification S_{ab} correspondant à une relation contractuelle de description/prescription entre ces deux espaces.

Dans le cadre des travaux de cette thèse, par analogie avec les artefacts essentiels de connaissance « Source/Puits » de la MTIP, nous formalisons plus précisément chacune des spécifications de façon récursive entre domaines par une relation descriptive entre EspaceProblème_{Source} **et** EspaceSolution_{Puits} et par une relation prescriptive entre EspaceSolution_{Source} **et** EspaceProblème_{Puits}. Cette relation de description **et** prescription est elle-même itérative entre un EspaceProblème (EP) et un EspaceSolution (ES). Le processus de spécification met ainsi en œuvre un ensemble de transformations_{Source et Puits} permettant

de construire une solution_{Puits}, de la vérifier puis de la valider en satisfaction d'un problème_{Source}.

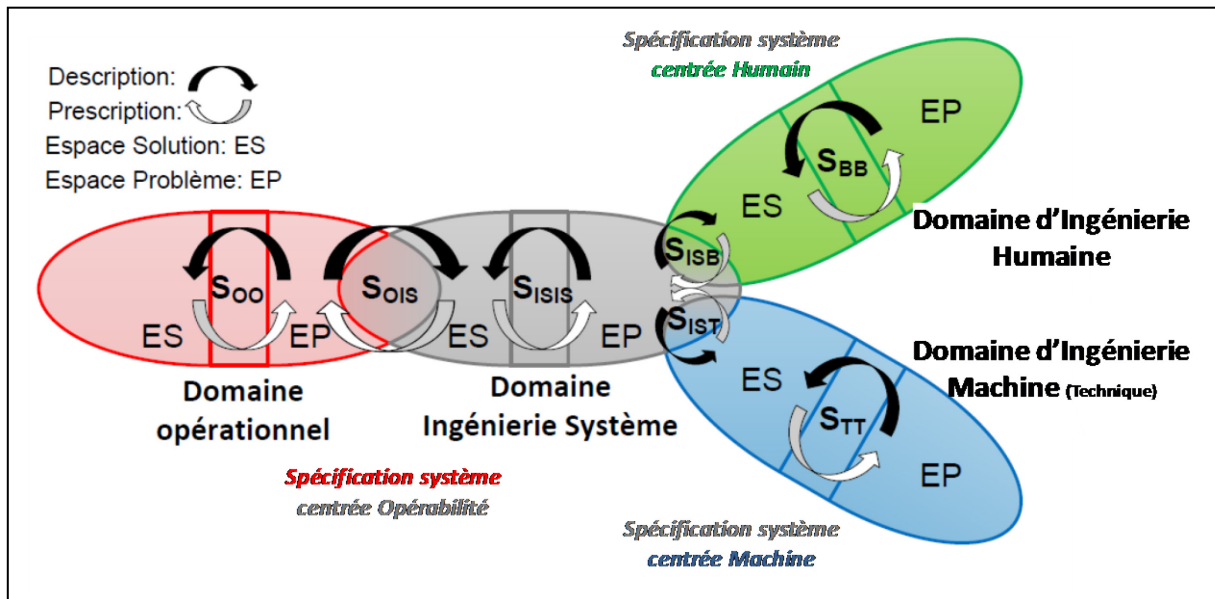


Figure 3-7 - Processus collaboratif récursif et itératif de spécification - Un phénomène opérationnel apparu dans l'ES du domaine opérationnel n'est visible par un ES du domaine de l'ingénierie système qu'à partir du moment où la non atteinte des objectifs fixés par l'ES opérationnel est avéré (il devient alors un phénomène de l'EP du même domaine) et que ce dernier n'est pas les connaissances pour identifier les éléments d'une solution, ce qui l'amène à décrire son problème à l'ES du domaine solution identifié. [adapté de (Bouffaron, 2012)]

3.1.2. Révision d'un scénario plausible de co-spécification d'exigences physico-physiologiques d'une interaction de perception visuelle

Dans cette partie, nous proposons de revisiter un scénario plausible de spécification système, qui se base sur les dysfonctionnements opérationnels constatés et présentés en chapitre 1, entre un ingénieur système de maintenance et les ingénieurs spécialistes, en tenant compte de notre vision du processus de spécification d'un système homme-machine présentée dans la partie précédente.

3.1.2.1. Présentation du scénario plausible de co-spécification

Plus précisément, ce scénario (Figure 3-8) met en avant que l'exigence opérationnelle R_{LL} n'a pas été remplie en opérations et qu'il a fallu, a posteriori, spécifier deux nouvelles exigences raffinant R_{LL} afin de garantir l'état fermé et verrouillé des capots moteurs. Tout d'abord, l'exigence A_{LL} est dérivée de la précédente à partir de l'analyse de l'exigence réglementaire

technique de type M_{LL} (Verries, 2010) liée à l'indépendance fonctionnelle et physique des mécanismes de fermeture et de verrouillage, qui révèle que cela peut induire des problèmes de prise de décisions quant à l'état des capots : les capots peuvent être non-verrouillés et malgré tout perçus comme fermés. Ceci est confirmé par des retours opérationnels et une première solution consiste à spécifier le contrôle de l'alignement des verrous avec la surface des capots (A_{LL}).

Mais cette exigence A_{LL} ne suffit pas. Cette exigence dérivée doit ensuite être raffinée pour définir le moyen de contrôle de cet alignement, une inspection visuelle, spécifiée au travers de RE_{CLL} .

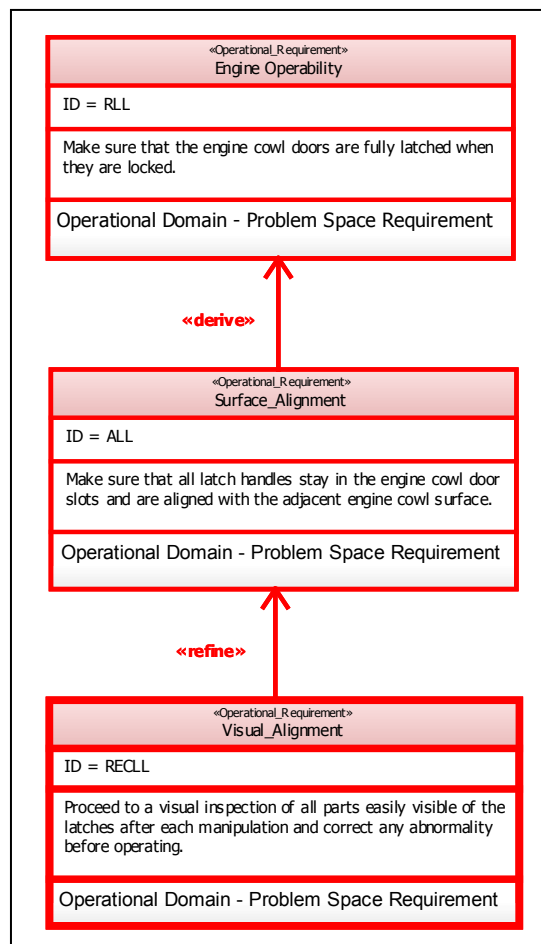


Figure 3-8 - Scénario plausible de co-spécification à revisiter

Ainsi, notre travail consiste à mettre en œuvre le processus de co-spécification a posteriori correspondant à ce scénario, pour assurer l'adéquation du moyen de contrôle visuel choisi (le signal de couleur orange) avec les exigences opérationnelles sources, et ainsi garantir R_{LL} .

Ce processus débute par un premier niveau d'itération dans le domaine de l'ingénierie système afin d'aboutir à une ou plusieurs exigences puits. Ensuite, vient un deuxième niveau d'itération, où les exigences puits précédentes deviennent à leur tour des exigences_{source}

interopérant avec les domaines spécialistes impliqués. Nous avons joué le rôle d'ingénieur système de maintenance faisant appel, pour mener à bien la spécification d'exigences système physico-physiologiques de l'interaction de perception visuelle, à un spécialiste en physiologie et en physique¹⁸.

A l'aide des artefacts de modélisation SysML, nous montrons les transformations_{Source} et _{Puits} de ces deux niveaux d'itérations permettant de construire une solution_{Puits}, de la vérifier puis de la valider en satisfaction du problème_{Source}. Notre objectif est de monter la construction itérative de la spécification système avec SysML et porterons une attention particulière à l'obtention d'*exigences physico-physiologique mesurables*.

3.1.2.2. Spécification système centrée opérabilité – premier niveau d'itération

L'activité de spécification commence ainsi par l'analyse des exigences opérationnelles par le domaine de l'ingénierie système. Ces exigences sont décrites au domaine de l'ingénierie système car elles sont actuellement non satisfaites par les solutions techniques mises en place dans le domaine des opérations d'intérêt : des capots s'ouvrent (encore) entraînant des incidents (voir chapitre 1). Le résultat de la transformation associée est l'exigence-système_{Puits} noté ITH_{LL} (Figure 3-9). Pour aboutir à cette exigence-système centrée opérabilité, l'ingénieur système aura dû identifier les phénomènes d'intérêt ou éléments de connaissances nécessaires (le *quoi*) permettant de réaliser cette transformation.

Plus précisément, le processus de transformation lié à ce premier niveau d'itération a débuté par l'identification d'un *problème* (équivalent à la partie *optative* de l'exigence) comme celui de la *manière de contrôler visuellement le processus de fermeture-verrouillage des capots* (« *How to visually control the fully latching-locking process ?* »). Cet élément est modélisé en SysML à l'aide de l'artefact de modélisation « *Problem* ».

Ensuite, l'ingénieur système, sur la base d'un ensemble de retours d'expérience connus à ce jour, identifie (dans son espace de solution) qu'une modalité visuelle pertinente dans le contexte des opérations de maintenance est le contrôle de la présence/absence d'une couleur orange qui traduit une situation anormale. Il s'agit là d'une connaissance opérationnelle sur les phénomènes du contexte d'intérêt. Cet élément est modélisé en SysML à l'aide de l'artefact de modélisation « *Rationale* ».

Ainsi, l'ingénieur système infère que l'application d'une couleur orange disposée sur les « latch » permettrait de pouvoir contrôler visuellement l'alignement des verrous, à condition

¹⁸ Ces deux spécialistes ont été joués par Jean-Marc Dupont, docteur en Physique ayant travaillé avec Gilbert Chauvet et s'étant progressivement formé et spécialisé en physiologie intégrative (Chauvet, P., Dupont, J-M., 2006). Il a travaillé au CRAN de Mars à Décembre 2012 dans le cadre d'un contrat Ingénieur de Recherche lié à notre projet de recherche.

bien sûr, que le mécanisme M_{LL} soit conçu de telle manière que lorsque les verrous sont à ras avec la surface des capots, c'est-à-dire que la couleur orange n'est pas visible, alors cela signifie qu'ils sont fermés **et** verrouillés. Cette condition fait alors l'objet de la formulation d'une exigence système centrée sur la machine (notée M_{LL}).

Le *problème* que se pose à présent l'ingénieur système est de savoir à qui attribuer la responsabilité de ce contrôle dans le cadre d'un système composé de deux types de constituants : Humain et Technique. Dans notre cas, le choix de la couleur orange comme moyen de contrôle visuel privilégié en environnement de travail oriente quelque peu le choix de l'attribution vers l'humain (voir Rationale). De plus, comme on ne peut pas embarquer de technologie sur cette partie de l'avion pour des raisons de coût, on s'intéresse à un utilisateur-contrôleur Humain (opérateurs de terrain ou « *ground operators* »). Mais la réponse à cette question aurait pu provenir d'une analyse du partage des tâches entre humain et machine selon des critères de faisabilité technique et ergonomique (Milot et al., 2011).

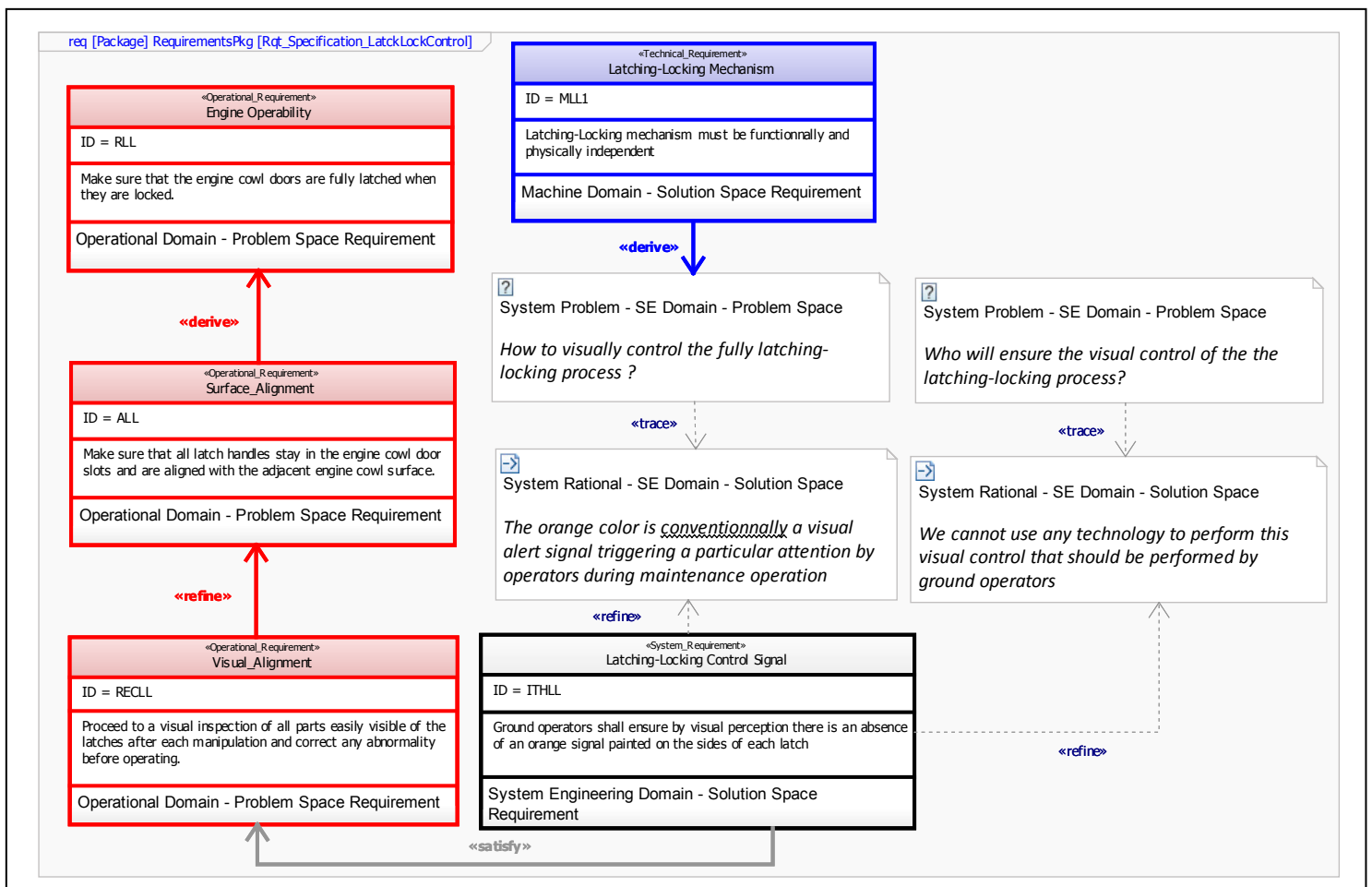


Figure 3-9 – Diagramme SysML des exigences associées à la Spécification système centrée Opérabilité (première itération)

Ainsi, sur la base des différents « Rationale » obtenus, l'ingénieur système peut définir/inférer une première exigence système centrée Opérabilité, notée ITH_{LL} , portant sur le contrôle visuel de l'alignement par la présence/absence d'une couleur orange et venant satisfaire REC_{LL} .

Les artefacts de modélisation « Problem » et « Rationale » viennent étayer le modèle des exigences associés et soulignent que le passage d'une exigence source à une exigence puits se fait par l'identification d'un problème lié à l'exigence source (ce que nous avons appelé « partie optative de l'exigence ») et d'élément de connaissance (ce que nous avons appelé « partie indicative de l'exigence ») pour arriver à inférer une exigence puits.

L'objectif de l'analyse des exigences système est d'aboutir à des exigences feuilles, c'est-à-dire qui ne peuvent plus être raffinées, mesurables qui puissent être utilisées pour les activités de conception. Les exigences que nous avons mis en avant jusqu'à présent peuvent être considérées comme des exigences intermédiaires et ne sont pas prises en compte en conception mais permettent la traçabilité et la documentation des exigences au cours du processus. Nous poursuivons ainsi l'analyse des exigences dans l'optique de respecter l'une des qualités principales d'une exigence-système : la mesurabilité.

3.1.2.3. Spécification système centrée humain – deuxième niveau d'itération

Compte tenu de l'ordre de sollicitation des domaines solutions au cours du processus de spécification défini par Brier sur le modèle de Hall et al., nous débutons cette deuxième itération sur l'exigence source ITH_{LL} d'interaction de perception visuelle en développant une première relation d'interopération avec le domaine (spécialiste) d'ingénierie humaine (« *Human Engineering* »).

A ce stade, l'ingénieur système possède, suite aux résultats mis en avant dans le chapitre 2, un ensemble de représentations/connaissances suffisantes sur la problématique de l'interaction homme-machine lui permettant de sélectionner le domaine spécialiste humain avec lequel il va interopérer pour définir une ou plusieurs exigences système centrée humain. En effet, l'artefact (objet artificiel) qu'est le verrou, 'affiche' (au travers de la couleur orange) une « propriété symbolique de danger », transmise sous la forme d'un flux physique lumineux et plus précisément un flux de photons capté par la fovéa.

L'ingénieur système s'interroge alors sur la quantité de photons que doit recevoir la fovéa pour permettre la perception de la couleur orange (aboutissant par la mise en correspondance avec la connaissance appropriée permettant l'exécution de l'action recherchée). Comme il n'a pas de réponse à cette question dans son domaine de solution, il décrit alors ce « Problem » à l'espace solution d'un domaine spécialiste de l'humain, celui de

la physiologie de l'œil. Ceci respecte la même structure que précédemment entre le domaine opérationnel et le domaine de l'ingénierie système (caractère récursif du processus de spécification).

Le spécialiste rassemble un ensemble de connaissances, dans son espace de solution, qu'il formule sous la forme d'un « Rational » et dont il se sert pour inférer une exigence système centrée humain qu'il prescrit à l'espace de problème de l'ingénierie système (elle devient alors une exigence source et satisfait ITH_{LL} ainsi que REC_{LL}). Plus précisément, le spécialiste physiologique informe l'ingénieur système que la couleur orange n'est pas la couleur idéale (physiologiquement parlant) pour être perçue dans les différents contextes de maintenance (de jour ou de nuit). Néanmoins, pour assurer une bonne perception, et compte tenu des hypothèses sur le fonctionnement des processus physiologiques présentés en chapitre 2, le spécialiste prescrit que le débit de photons requis par la fovéa doit être spécifié selon la loi : $nb\lambda = 2.10^{-13} / (h\nu) = 6.10^5 (s^{-1})$ (Annexe 3).

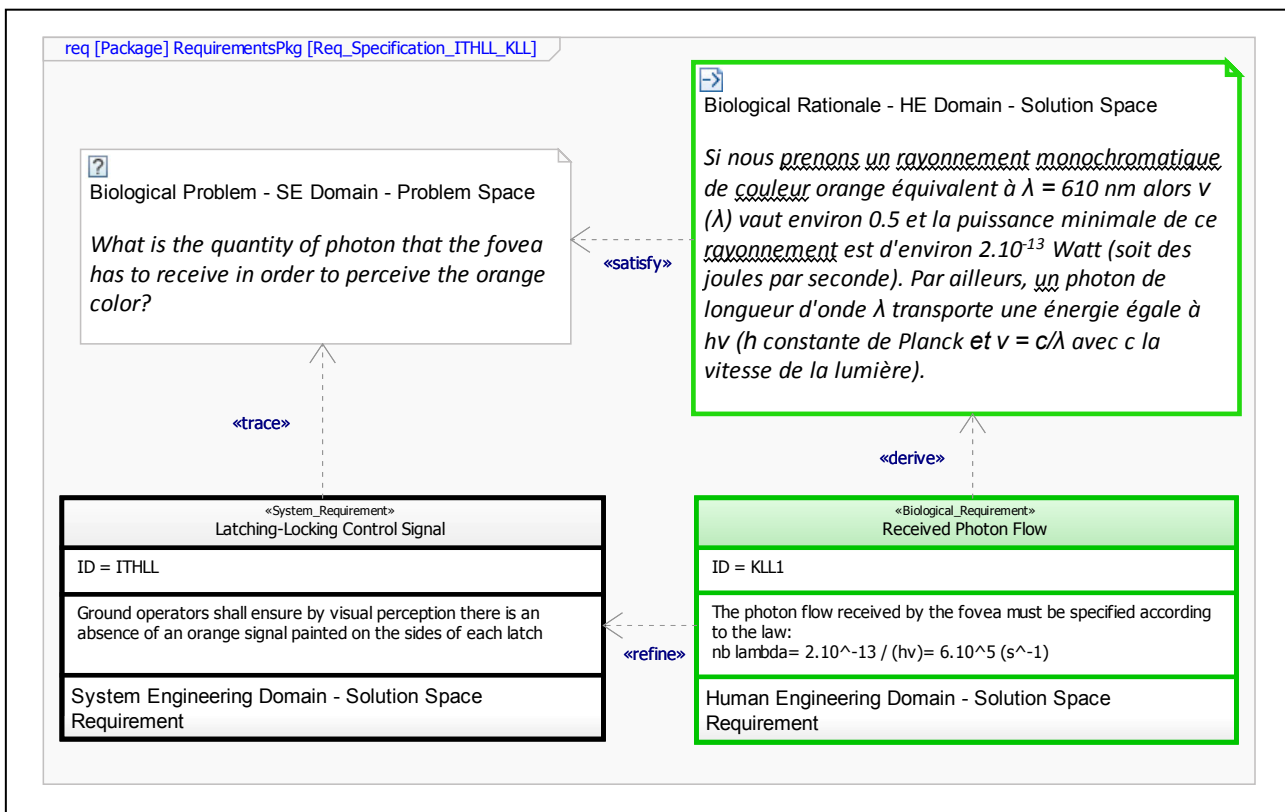


Figure 3-10 – Diagramme SysML des Exigences Système Physiologique K_{LL1} quant au flux de photons réfléchi

Cette exigence K_{LL1} raffine l'exigence source ITH_{LL} et est ainsi représentée en SysML à l'aide d'un lien « refine » (Figure 3-10). Par ailleurs, il s'agit d'une exigence feuille mesurable qui sera utilisée pour la vérification (partie 3.1.2.5). Elle satisfait ainsi l'exigence opérationnelle REC_{LL} et in fine R_{LL} . En pratique, il aurait fallu conserver la partie paramétrique de l'exigence (ici la loi) et la modéliser au travers d'un autre artefact de modélisation SysML appelé

« Constraint block » qui raffine l'élément textuel conservé au travers de l'artefact SysML « Requirement ». Nous conservons, pour les besoins de ce mémoire, l'aspect paramétrique (mesurable) dans la formulation et la modélisation de l'exigence.

3.1.2.4. Spécification système centrée machine – deuxième niveau d'itération

Cette dernière exigence physiologique mesurable amène l'ingénieur système à s'interroger sur les conditions physiques/techniques pour que la fovéa reçoive le débit de photons requis. En effet, le flux de photons requis par la fovéa dépend directement du flux de photons émis par le « Latch ». Il sollicite alors un domaine spécialiste de la machine afin de connaître les conditions physiques pour que le verrou émette le débit de photons spécifié par K_{LL1} (Figure 3-11).

Le spécialiste technique rassemble un ensemble de connaissances (*Rationale*) qu'il transforme pour prescrire une exigence mesurable M_{LL2} à l'espace problème de l'ingénierie du Système (elle devient $Exigence_{Source}$).

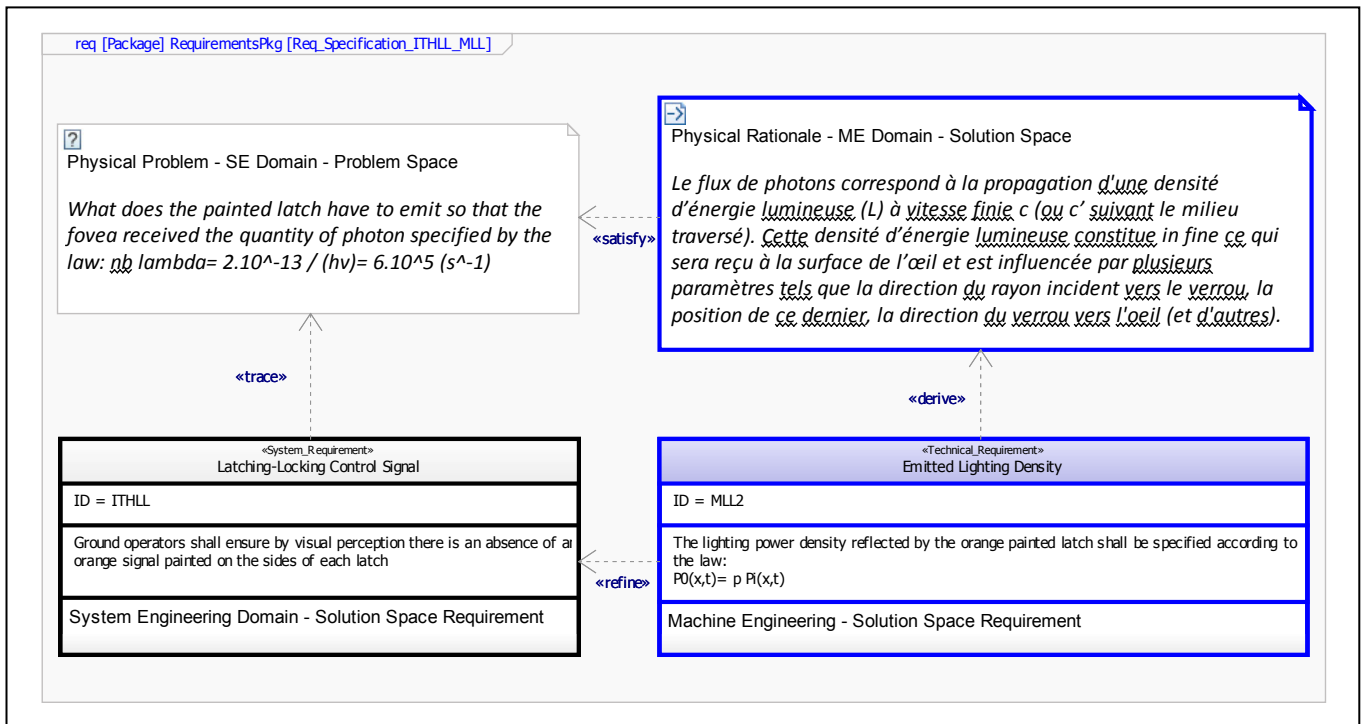


Figure 3-11 – Diagramme SysML des Exigences Système centrée Machine M_{LL2} quant à la densité lumineuse devant être émise par le latch

Plus précisément, le spécialiste technique prescrit que la densité de puissance lumineuse que l'objet orange doit refléter doit être spécifiée selon la loi : $P_0(x,t) = \rho P_i(x,t)$, où P_0 est la

puissance lumineuse réfléchiée par le verrou qui est une fraction de P_i représentant la puissance lumineuse qu'il reçoit par l'environnement (voir Annexe 4).

Cette exigence M_{LL2} vient raffiner l'exigence source ITH_{LL} et est ainsi représentée en SysML à l'aide d'un lien « refine ». De plus, au même titre que l'exigence K_{LL1} , il s'agit d'une exigence feuille mesurable. Elle satisfait donc REC_{LL} et in fine R_{LL} .

3.1.2.5. Vérification de l'exigence système centrée opérabilité ITH_{LL}

L'ingénieur système doit avoir les moyens de *vérifier* que le contrôle visuel de l'alignement par la couleur orange est *atteignable* dans le contexte opérationnel d'intérêt. La vérification de l'exigence système ITH_{LL} se fait donc à partir des exigences mesurables qui la raffine : en l'occurrence les exigences M_{LL2} et K_{LL1} . Cette vérification est nécessaire pour pouvoir in fine prescrire une solution au domaine opérationnel à l'origine client qui devra la valider (ou pas).

Pour réaliser cela, l'ingénieur système s'appuie entre autres sur la simulation des différentes lois prescrites en faisant varier certains paramètres afin d'obtenir plusieurs scénarios (ex : différentes longueurs d'onde). Ces lois, ou plus généralement aspects quantitatifs, peuvent être modélisés sous forme de contraintes dans un diagramme paramétrique en SysML (Figure 3-12), et couplés à une application *Matlab Simulink*® pour pouvoir les simuler.

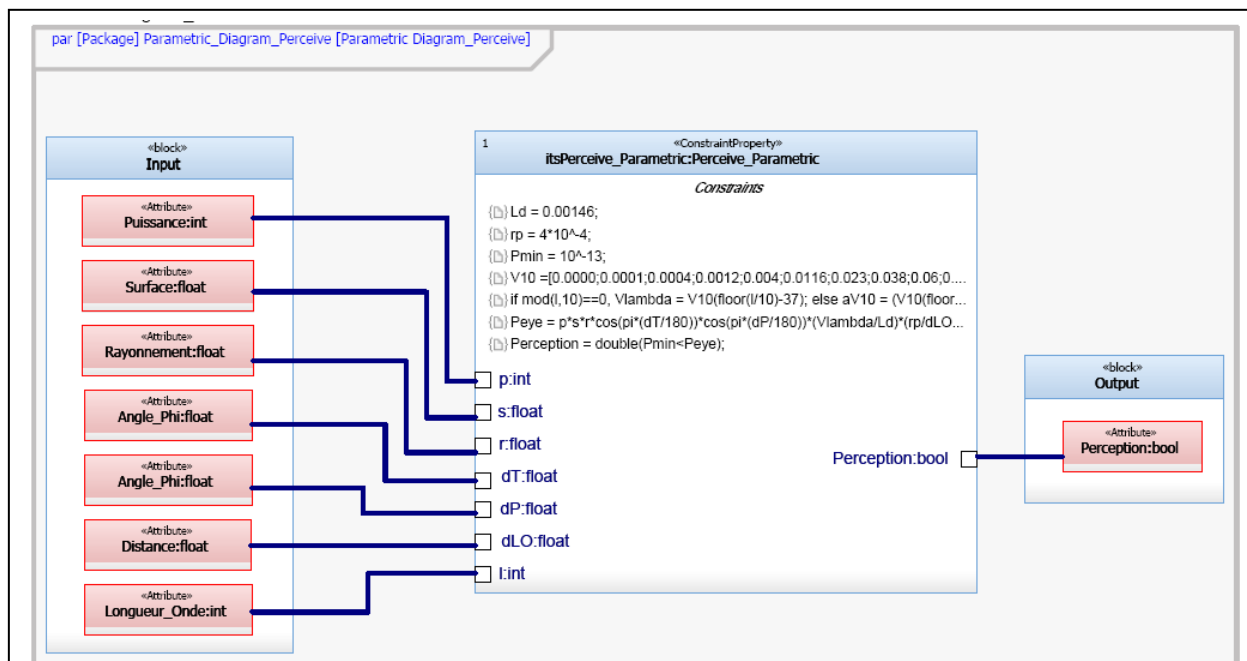


Figure 3-12 - Diagramme paramétrique SysML lié à l'exigence K_{LL1} et développements présentés en Annexe 3

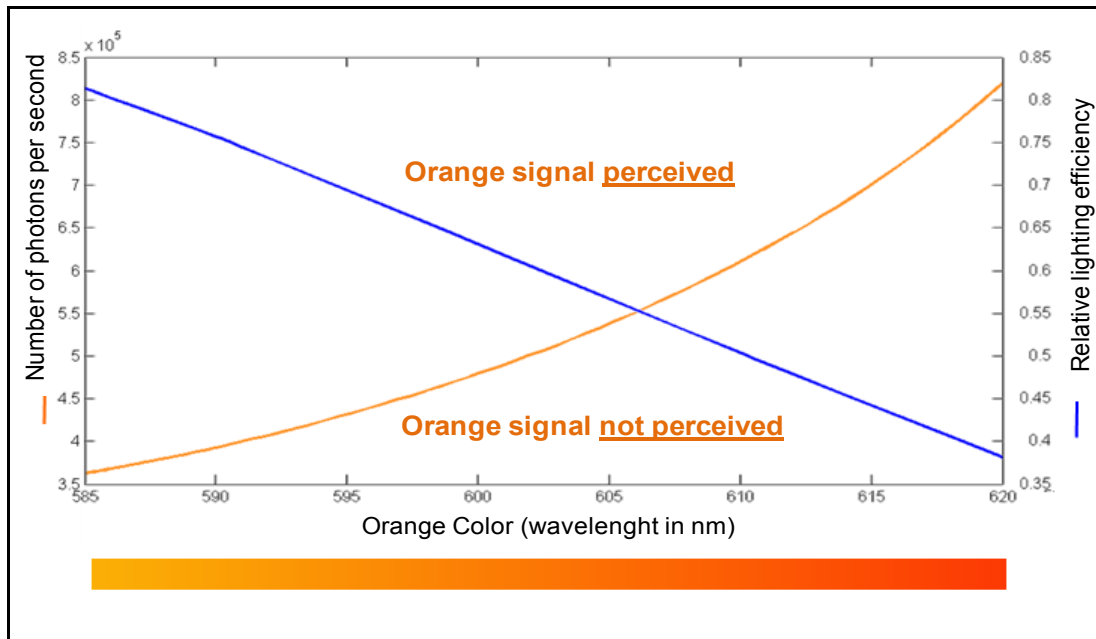


Figure 3-13 - Résultat de simulation - la longueur d'onde λ pour la couleur orange étant comprise entre 585 et 620 nm, et l'efficacité lumineuse dépendant de λ , il en résulte un nombre minimum requis de photons par seconde.

Par exemple, la simulation des aspects quantitatifs liés aux exigences prescrites par le domaine d'ingénierie humaine (Figure 3-13) permet de déterminer pour une longueur d'onde de couleur orange donnée le nombre minimum de photons par seconde requis et l'efficacité lumineuse relative minimum requise pour percevoir (ou non) physiologiquement parlant la couleur orange donnée, et ainsi assurer au mieux le contrôle visuel de l'alignement au travers de cette couleur.

3.1.3. Conclusion : L'intégration des facteurs humains physiologiques par la co-spécification d'exigences physico-physiologiques mesurables de l'interaction homme-machine

Dans cette partie 3.1, nous avons mis en œuvre *a posteriori* un scénario plausible de co-spécification système au cours duquel nous avons pu montrer la construction récursive et itérative des exigences avec SysML. Cette construction est basée sur un ensemble de transformations Source et Puits rationnelles nécessitant l'identification d'un ou plusieurs problèmes liés à une exigence source, et celle d'un ensemble de connaissances sur ce problème permettant in fine d'inférer une ou plusieurs exigences puits.

Dans notre cas, la spécification d'exigences système liée à l'exigence opérationnelle REC_{LL} a donné lieu à la fois à des exigences puits K_{LL} de type S_{ISSH} et M_{LL} de type S_{ISST}, démontrant ainsi un processus de spécification non dichotomique. Au cours de ce processus, l'ingénieur

système aura dû réaliser, dans son espace solution, un certain nombre de *compromis* entre l'ensemble des exigences prescrites par les domaines d'ingénierie humaine et d'ingénierie machine ou technique afin de satisfaire l'exigence système centrée opérabilité d'alignement visuel (notée ITH_{LL}) prescrit au domaine d'opérabilité (voir Annexe 6).

Plus précisément, pour arriver à spécifier de telles exigences de l'interaction homme-machine circonscrite à la modalité visuelle, notre travail aura consisté à progresser d'une vision fonctionnelle de l'interaction comme un tout, dont nous avons extrait le fait essentiel de l'objet interface entre l'objet humain et technique (en chapitre 2), à une vision organique, où nous avons étudié la nature de cet objet pivot d'un point de vue physico-physiologique à l'aide de spécialistes humains (physiologie) et techniques (physique).

Nous pouvons conclure que la spécification d'exigences mesurables de cette interaction passe nécessairement par une étude organique des flux physico-physiologiques échangés entre les éléments constitutifs du système étudié. Mais cette étude doit s'arrêter à un niveau d'échelle « cohérent » avec le niveau requis en ingénierie du système. Par ailleurs, nous nous sommes intéressés à la nature physico-physiologique de cette interaction homme-machine en tant que *condition nécessaire*, mais non suffisante d'un point de vue facteurs humains, pour qu'un opérateur perçoive bien un signal de couleur orange afin de prendre la bonne décision quant à l'état Fermé **et** Verrouillé des portes d'accès à l'équipement remis en conditions opérationnelles de fonctionnement.

Dans cette partie, nous nous sommes restreint à l'étude d'une modalité sensorielle, la vision, mais la même démarche pourrait s'appliquer pour les autres modalités sensorielles impliquées dans notre cas d'étude.

Par ailleurs, la mise en évidence d'exigences techniques et physiologiques mesurables en lien avec la spécification système invite à s'interroger sur le mode d'organisation de l'ingénierie système et les processus techniques d'ingénierie. En effet, les résultats présentés dans ce chapitre sont le fruit d'un travail collaboratif de spécification entre un ingénieur système et des spécialistes physiques et physiologiques, respectant un procédé de co-spécification concourant, itératif et récursif, dans un cadre temporel fixé (celui de la thèse) et à l'aide d'un ensemble d'outil de modélisation dédié à l'analyse des exigences (les différents artefacts de modélisation des diagrammes d'exigences SysML).

3.2. Proposition d'une organisation d'ingénierie d'un système_{homme-machine} support de maintenance aéronautique

Comme nous avons pu le montrer dans les parties précédentes, l'obtention du mode indicatif pour spécifier des exigences système requiert la sollicitation de plusieurs espaces de solution de domaines de connaissances spécialistes différents. Mais encore faut-il « maîtriser » ces diverses sollicitations pour répondre au mieux au besoin posé. Il est ainsi nécessaire de disposer d'un rôle équivalent à celui de maître d'ouvrage ou architecte qui pilote cette activité pouvant être appréhendée comme la coordination d'un ensemble de relation d'interopération. La dimension organisationnelle de l'Ingénierie Système représente alors un élément clé pour la réussite du processus technique de spécification d'exigences d'un système comme un Tout. Dans cette partie finale, nous proposons de présenter notre vision des conditions de mise en œuvre a priori pour l'Ingénierie Système.

3.2.1. Organisation des relations d'interopération au cœur du processus de co-spécification

Le processus de spécification que nous avons mis en œuvre a permis de mettre en avant plusieurs relations d'interopération entre domaines. En effet, l'ingénieur système a sollicité en premier le domaine de la physiologie, puis, en regard de la prescription physiologique fournie, le domaine technique.

Nous avons choisi (dans la partie précédente) de restreindre notre scénario à deux spécifications (mesurables) afin de montrer une approche de raffinement système non dichotomique. Si nous poursuivons le scénario, une nouvelle exigence système_{Puits} centrée Humain peut être inférée afin de poursuivre le raffinement de l'exigence ITH_{LL} (Figure 3-14).

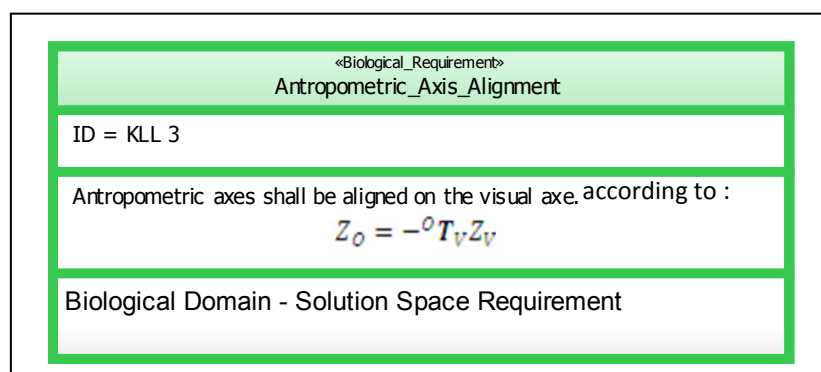


Figure 3-14 - Exigence K_{LL3} spécifiant la condition d'Alignement du verrou sur l'axe visuel

Plus précisément, selon la même logique itérative et d'identification de « Rationale » (voir annexe 5), le spécialiste prescrit tout d'abord une exigence d'alignement de la source objet

technique, non pas sur la pupille de l'œil mais sur la fovéa (K_{LL2}). Mais cette exigence d'alignement visuel source-puits doit être revisitée en tenant compte de la nature binoculaire de la perception visuelle chez l'humain ($K_{LL2.1}$) et de la « géométrie » anthropométrique en introduisant les plans frontal et sagittal, ce dernier séparant l'homme en deux parties symétriques gauche et droite où se trouve chaque œil (K_{LL3}).

Ainsi, du point de vue de l'organisation des relations d'interopération, on distingue au moins deux relations du domaine de l'ingénierie système vers des domaines « Spécialiste Humain ». En d'autres termes, il aura fallu solliciter au moins deux spécialités humaines pour progresser, d'un point de vue Facteurs Humains, dans la complétude de la spécification ITH_{LL} (Figure 3-15).

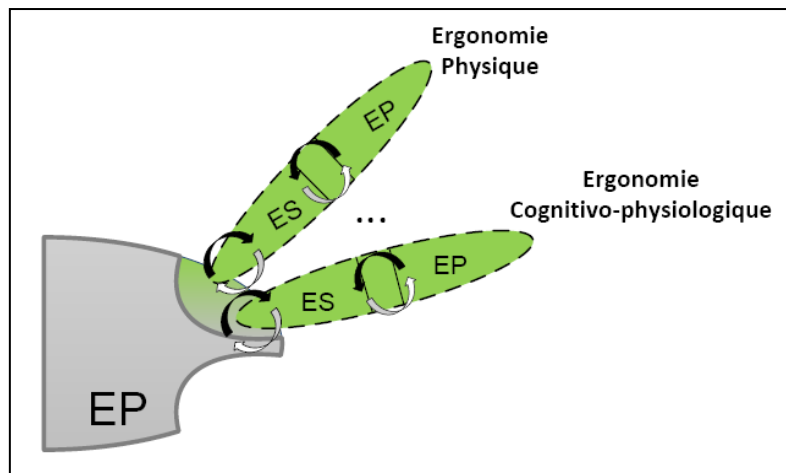


Figure 3-15 - Relations d'interopération avec deux domaines Facteurs Humains

Mais ces domaines spécialistes n'ont pas été sollicités dans n'importe quel sens ou ordre. En effet, cet ordre fut dicté par l'approche de modélisation de l'interaction homme-machine centrée sur l'objet interface puis les objets techniques et humains que nous avons adoptée.

Ce fait souligne ainsi la nécessité de piloter l'ensemble des espaces de solutions potentiels dans l'objectif de formuler les éléments de connaissance suffisants et nécessaires pour spécifier in fine une exigence système de type S_{ISSH} . De plus, il semble a priori très compliqué de pouvoir systématiquement mettre en perspective (faire des *compromis* entre) l'ensemble des connaissances spécialistes humaines en même temps en vue de la spécification système. Nous proposons alors de disposer d'un niveau équivalent à celui de l'architecte système mais au niveau du constituant humain. Ce pilotage serait assuré par un Architecte Système Humain (ASH) (Figure 3-16).

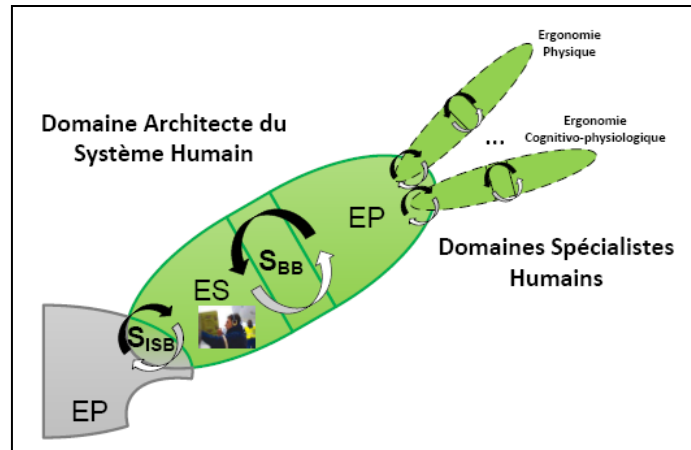


Figure 3-16 - Le domaine de l'architecte du système humain (ASH) comme pilote des domaines spécialistes humains relativement aux problèmes systèmes formulés

Par ailleurs, ces relations de spécification du domaine système humain peuvent amener à mettre en place d'autres relations de spécification du domaine système technique, pour arriver à spécifier l'interaction homme-machine au travers d'exigences notées K_{LLa} et M_{LLb} respectivement de type S_{ISB} et S_{IST} , puis au travers d' ITH_{LL} participant in fine à la spécification système globale. Ainsi, de manière symétrique, nous proposons que le pilotage dans le domaine système technique soit assuré par un Architecte Système Technique (AST) dont le périmètre est l'ensemble des domaines spécialistes de systèmes techniques (Figure 3-17).

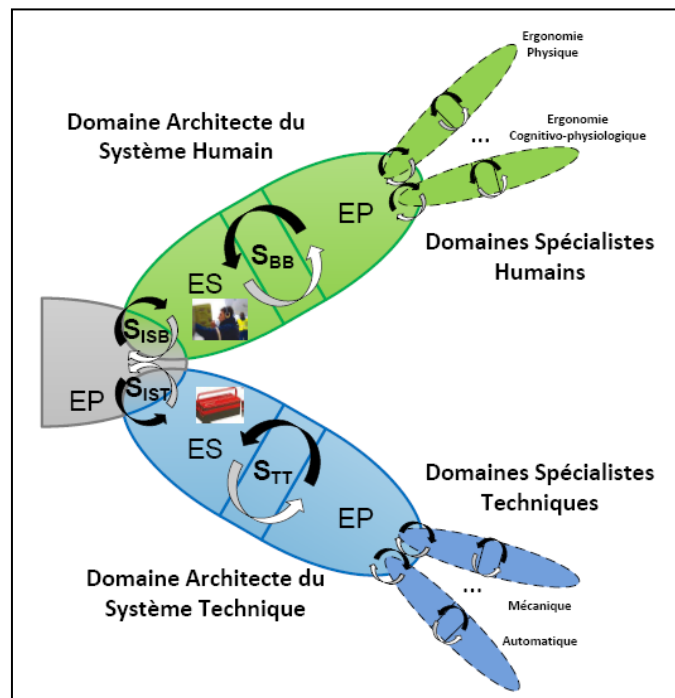


Figure 3-17 - Relations d'interopération système humain et système technique pour la co-spécification

Ces interopérations entre les domaines système humain et système technique soulignent ainsi la nature collaborative du processus d'ingénierie. Elles sont déclenchées via l'espace problème du domaine de l'ingénierie de système comme un tout (Figure 3-18) qui sollicite les espaces solutions d'un ou plusieurs domaines, relativement au problème qui lui a été posé (le besoin des parties prenantes utilisatrices du système).

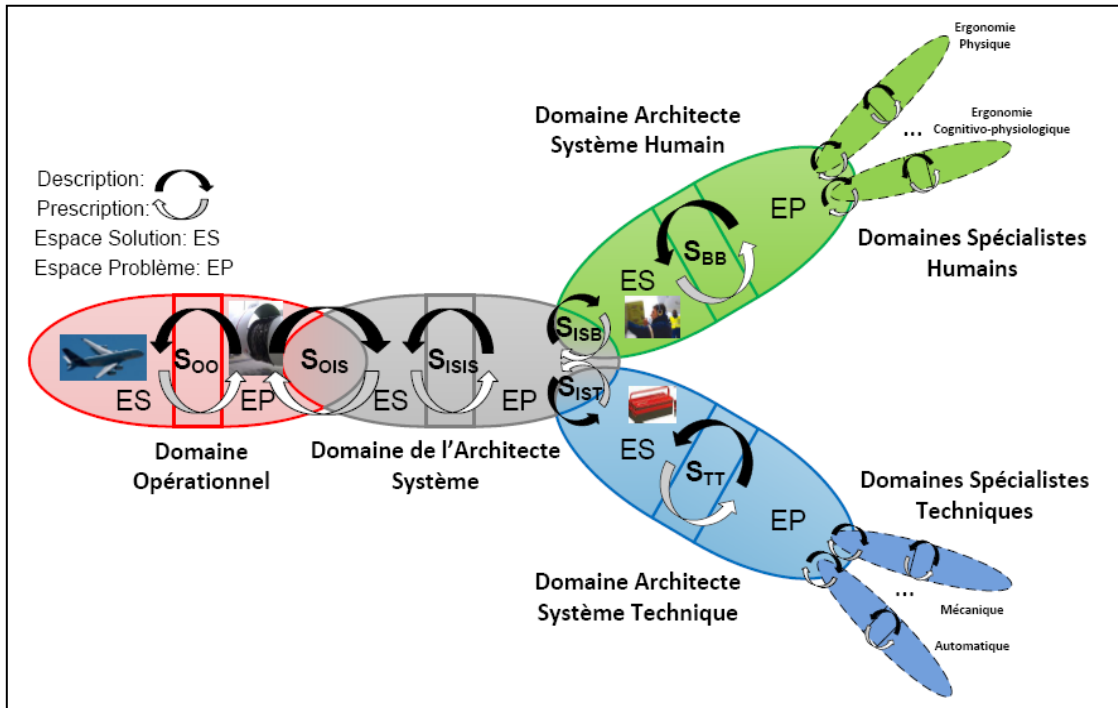


Figure 3-18 -Proposition d'une organisation d'Ingénierie d'un Système_{Homme-Machine} support de maintenance au travers du processus de spécification système [adaptée de (Bouffaron, 2012)]

Plus précisément, le processus de spécification d'un système homme-machine met en œuvre un ensemble de transformations S_{Source} et P_{uits} permettant de construire et vérifier une solution P_{uits} puis de la valider en satisfaction d'un problème S_{ource} . Par exemple, l'Exigence S_{ource} REC_{LL} de l'Espace $P_{roblème}$ du domaine opérationnel d'exploitation de l'avion devient Exigence P_{uits} dans l'Espace $S_{olution}$ du domaine «Ingénierie Système».

Relativement à notre exemple, il s'agit dans un premier temps de la même exigence qui devient Exigence S_{ource} REC_{LL} d'un processus expert qui la transforme en Exigence P_{uits} ITH_{LL} , qui devient elle-même source d'un processus itératif conduisant in-fine en une ou plusieurs Exigences P_{uits} (exemple : K_{LL1}) satisfaisant R_{LL} . Ce processus de spécification nécessite en pratique la propagation de cette interaction Source **et** Puits vers d'autres domaines spécialistes pour d'autres spécifications. Par exemple, le problème opérationnel support de notre étude de cas est source dans l'Espace $P_{roblème}$ de l'Ingénierie Système d'un ensemble d'interopérations de spécification avec les Espace $S_{olution}$ des domaines Spécialistes de Systèmes Humains et de Systèmes Techniques.

Le domaine du système comme un tout est traditionnellement sous la responsabilité de l'ingénieur système que nous proposons de nommer Architecte Système (AS) et dont la responsabilité principale est de coordonner deux flux de spécifications pour que ces dernières répondent de manière collaborative et intégrative au besoin émis par le domaine opérationnel. Nous faisons ainsi grossir le périmètre des responsabilités de l'architecte système (AS, ASH et AST) et justifions par là même le rôle clé de l'ingénierie système que la nature hétérogène des systèmes requiert pour la mise en place d'une approche comme un TOUT afin de coordonner les nombreuses spécialités impliquées dans la conception.

Dans la partie suivante, nous identifions les impacts potentiels de l'application de cette nouvelle vision organisationnelle de l'ingénierie système pour l'opérabilité et le domaine des architectes intégrateurs.

3.2.2. Impact pour l'opérabilité et le domaine des architectes intégrateurs : proposition du rôle d'architecte du composant principal humain

Nous avons montré précédemment l'imbrication des spécifications entre les domaines techniques et Humains, questionnant quant à un processus de spécification actuel trop dichotomique qui ne permet pas d'appréhender la performance du système comme un tout. Nous pensons ainsi que l'interopération entre domaines s'adressant à des objets de natures différentes pourrait gagner à s'organiser différemment. Néanmoins, le pré requis fort pour une telle mise en place dans une organisation aussi orientée sur la technique que celle de notre entreprise d'accueil passe par une décision stratégique qui reconnaît aux facteurs humains en maintenance une place principale, au même titre que les facteurs techniques (ou machine), dans le processus de spécification des « support product » et « end product ».

3.2.2.1. Evolution organisationnelle de l'équipe architecte intégrateur, pilote de deux canaux de spécification

L'organisation technique actuelle mise en place est une organisation traditionnelle d'ingénierie système qui fait du métier d'Architecte Système, le pivot vers les différents métiers spécialistes. Le domaine spécialiste de l'humain n'est pas aujourd'hui, à proprement parlé, considéré comme un métier spécialiste d'un composant du système. Le rôle principal que nous attribuons aux facteurs Humains permettrait d'entrevoir un changement au niveau du rôle clé d'architecte intégrateur.

L'impact de nos travaux amènerait à préciser le périmètre et les responsabilités de l'architecte afin de synchroniser deux flux de spécifications, l'un technique et l'autre humain, initié au même moment.

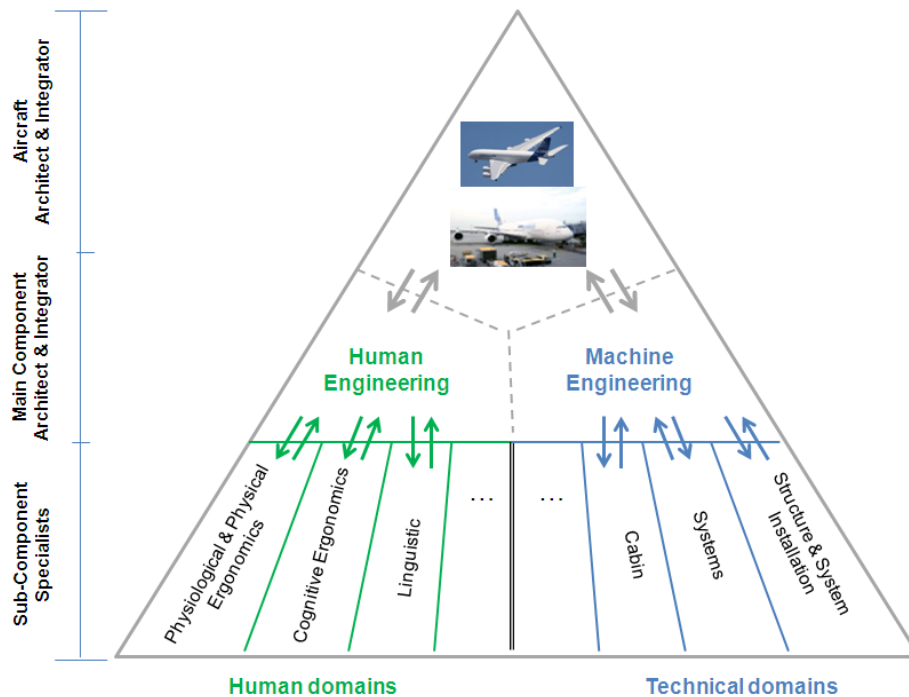


Figure 3-19 - Proposition d'un modèle d'organisation

Les coopérations entre niveaux de l'organisation, marquées par les flèches aller-retour (grises, bleues et vertes), traduisent les nécessaires synchronisations qui relèvent pour les premières de la responsabilité de l'AS, que nous appelons « Aircraft Architect & Integrator », et pour les secondes des ASH et AST, que nous appelons « Main Component Architect & Integrator ».

3.2.2.2. Evolution des rôles et responsabilités de l'équipe architecte intégrateur

Dans cette partie, nous proposons de présenter les nouvelles responsabilités qui incombent à l'architecte intégrateur et l'architecte du composant principal humain.

Nouvelles responsabilités de l'architecte intégrateur

Dans cette vision, outre les responsabilités déjà admises, l'architecte intégrateur aurait également les responsabilités suivantes :

- Il doit gérer les interactions entre le domaine des opérations aéronautiques (« Operability Engineering), dans notre cas les opérations de maintenance, et les deux architectes des composants principaux afin d'aboutir à un compromis agréé qui répond aux exigences opérationnelles.
- Il doit mener l'analyse fonctionnelle externe du système.
- Il doit s'assurer de la mise en œuvre des bonnes pratiques de l'ingénierie des exigences, notamment les critères présentés en introduction de ce chapitre.

Nouvelles responsabilités de l'architecte du composant principal humain

Dans cette partie, nous ne parlons pas de l'Architecte du Composant Principal Technique car c'est celui qui est majoritairement répandu dans une organisation aussi centrée sur la technique que celle de notre entreprise d'accueil. Nous nous concentrons sur l'architecte du composant principal humain.

Ce dernier aurait les responsabilités suivantes:

- Il doit gérer les interactions entre les différents domaines humains impliqués relativement aux problèmes à résoudre, afin d'aboutir à un compromis agréé qui répond aux exigences cascades par l'architecte système (analyse fonctionnelle interne).
- Il doit gérer le réseau des métiers humains spécialistes afin de les faire collaborer et converger au cours de la phase d'analyse fonctionnelle interne consistant à étudier la nature fonctionnelle et organique de l'interaction entre les composants humain et technique.
- Il doit s'assurer de la mise en œuvre d'un processus de développement et de capitalisation des connaissances sur les capacités humaines.

Notons à nouveau que cette responsabilité, faisant partie du domaine de l'ingénierie système, c'est-à-dire orienté sur la satisfaction du besoin client (domaine opérationnel) et impliqué dans l'analyse fonctionnelle du système, est légitime à condition de retravailler la vision de base du système tel que présenté en chapitre 1.

Remarque : Les spécialistes sont les experts du domaine de l'humain couvrant les aspects physiologiques, physiques et cognitifs, qui seront sollicités pour la spécification. Leurs responsabilités sont celles communément admises pour un expert à savoir de disposer d'une connaissance, non en largeur, mais en profondeur sur l'un des différents aspects mentionnés ci-dessus. En effet, l'analyse fonctionnelle des exigences amène à s'interroger sur

l'adéquation entre ce que le composant « doit faire et doit être » et ce qu'il « peut faire et est » (« Human Capabilities »). Il est donc nécessaire de capitaliser ces connaissances expertes.

3.2.3. Conclusion : le processus de spécification d'un système homme-machine, compromis entre exigences méthodologiques et cycle-projet

Au cours de la révision d'un scénario plausible de co-spécification de l'interaction homme-machine, nous avons étudié le stimulus physique pour spécifier techniquement les conditions nécessaires, mais non-suffisantes, pour le déclenchement de processus physiologiques aboutissant à la stimulation de P_{LL} (partie 3.1.2) ainsi que l'alignement de la source en fonction des axes anthropométriques de l'opérateur (partie 3.2.1). Ces résultats nous ont permis de souligner les nombreuses relations d'interopérations entre domaines pouvant prendre place au sein du processus technique de spécification système lorsque l'on cherche à étudier la nature organique de l'interaction homme-machine.

Ces relations se doivent d'être *organisées* pour arriver à spécifier l'interaction comme un tout. En effet, elles soulignent la nécessaire dimension intégrative de l'approche de co-spécification d'un Système_{Homme-Machine} qui, à notre sens, ne peut être mise en place qu'à condition de revoir les organisations d'ingénierie en place ainsi que les rôles et compétences des acteurs des processus techniques.

Le modèle final de l'organisation de l'ingénierie d'un Système_{Homme-Machine} support de maintenance tel que nous le proposons favorise cette spécification comme un tout car elle positionne l'ingénierie système en élément pivot entre le domaine opérationnel, représentant l'environnement de mise en œuvre de la solution, et les domaines spécialistes impliqués dans la réalisation des composants du système solution. Elle renforce ainsi son rôle central pour arriver à passer d'un besoin à une solution intégrée opérationnelle.

En revanche, cette position en pivot présente l'inconvénient de filtrer le domaine opérationnel aux domaines spécialistes qui ne voient celui-ci qu'à travers ce qu'en dit l'architecte système. Ceci peut impacter la réactivité du processus par la mise en œuvre de nombreuses relations de description (entre AS, ASH et Spécialistes Humains) visant à s'assurer que chacun comprenne bien le périmètre de la prescription qu'il doit réaliser, d'où notre proposition que le domaine de l'architecte du système humain possède un ensemble minimum de compétences (dites opérationnelles) sur les différents mondes des opérations cibles pour atténuer cet impact. Mais ce fait souligne davantage que le cycle de ce processus clé d'ingénierie doit être correctement dimensionné en termes de cycle-projet et qu'il résulte d'un compromis entre complexité de mise en œuvre d'une ingénierie d'un système (comme un tout) et planning de développement (dicté par le besoin client).

3.3. Conclusion : un cadre intégratif pour l'ingénierie basée sur des modèles d'un système homme-machine support de maintenance aéronautique

Ce chapitre, dont le développement est fortement lié au chapitre 2 de ce mémoire, constitue notre proposition d'un cadre intégratif pour l'ingénierie d'un système homme-machine basée sur des modèles. Nous avons ainsi contribué, sur une expérience donnée, à montrer la faisabilité d'unifier le domaine de l'ingénierie humaine avec celui de l'ingénierie système, comme envisagé par (Boy, 2013)¹⁹, mais surtout celle d'unifier l'ingénierie de systèmes humains **et** l'ingénierie de systèmes techniques avec l'ingénierie des opérations²⁰ (*Operability Engineering*) dans une approche globale d'ingénierie système.

Les recommandations que nous formulons, quant à l'application de cette proposition au contexte d'ingénierie d'un système support de maintenance aéronautique ainsi qu'à son organisation sous-jacente, touchent à une dimension complexe de notre entreprise d'accueil, du fait de la culture d'entreprise qui prévaut actuellement ainsi que de sa taille. Aussi, il faut voir ces recommandations organisationnelles comme un moyen rationalisé de tendre vers la mise en place d'un processus de spécification système réduit à trois domaines essentiels d'ingénierie. Mais la reconnaissance du domaine de l'architecte système humain comme une compétence clé de l'équipe architecte domaine, indépendant « organisationnellement parlant » des différents domaines techniques spécialistes ou opérationnels, est un élément clé. Il devra néanmoins s'accompagner d'un développement fort de connaissances expertes sur les capacités humaines au sens d'ingénieries capacitaires (ou de capacités) humaines.

Notre proposition représente ainsi une condition nécessaire, mais non suffisante, pour atteindre ce cadre intégratif industriel d'ingénierie soutenant la spécification de l'interaction homme-machine comme un tout. En effet, les résultats de formalisation du processus de spécification doivent s'accompagner de développements d'outils de modélisation et de simulation appropriés permettant d'étendre la syntaxe du langage de modélisation système *SysML* par une sémantique opérationnelle précise et de faire interopérer les différents modèles des parties d'un système hybride tel que le système homme-machine support de maintenance aéronautique. Nous soulignons plus en détails ces perspectives technologiques dans la conclusion générale de ce mémoire.

¹⁹ (Boy, 2013) – Keynote on *Human-System Integration: Unifying Systems Engineering and Human-Centered Design*, 12th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems, Las Vegas 2013.

²⁰ L'environnement W du modèle de Hall, que nous avons restreint aux domaines des opérations de maintenance, peut être appréhendé à la fois comme une connaissance opérationnelle mais aussi comme un domaine d'ingénierie.

Conclusion et Perspectives

Les travaux présentés dans ce mémoire s’inscrivent dans le cadre de la mise en place d’une démarche d’intégration des facteurs humains²¹ physiologiques en ingénierie basée sur des modèles d’un système support de maintenance aéronautique. Les résultats exploratoires présentés contribuent à l’étape de la *formalisation* d’une telle démarche (centrée sur le processus de spécification) et à un premier niveau de *démonstration de faisabilité* que nous associons au niveau TRL2 de l’échelle de mesure de maturité d’une technologie²² définie par la NASA. Dans cette conclusion, nous synthétisons les éléments clés contribuant aux trois niveaux de cette première catégorie et soulignons les perspectives de travail dans l’objectif d’atteindre les niveaux de maturité plus avancés pour atteindre la catégorie de l’*applicabilité industrielle* (Figure 0-7).

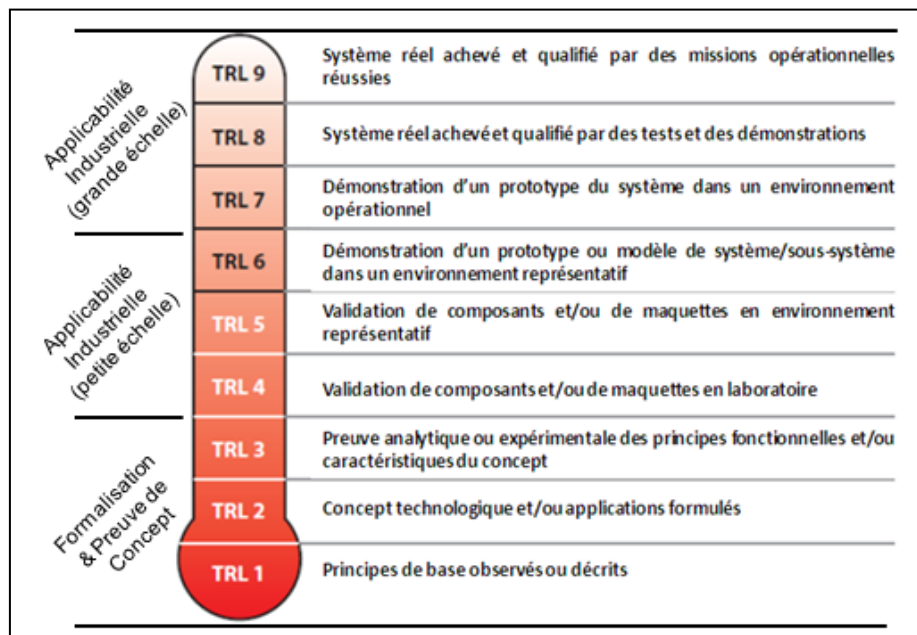


Figure 0-7 - Echelle d’évaluation de la maturité technologique adaptée de (Mankins, 1995) – nous adaptons cette échelle pour évaluer la maturité de notre proposition sous trois catégories : Formalisation et Preuve de Concept (TRL1-2-3), Applicabilité Industrielle (TRL4-5-6) et Applicabilité à grande échelle (TRL7-8-9)

Plus précisément, sur un cas d’étude pour lequel nous disposons de suffisamment de données, nous avons, dans cette thèse, exploré la spécification d’un processus physico-

²¹ Les termes « intégration des facteurs humains » peuvent se retrouver dans la littérature sous d’autres appellations dont la plus connue est « intégration des systèmes humains » traduit de l’anglais « Human Systems Integration (Booher, 2003).

²² **Technology Readiness Level (TRL)** is a measure used to assess the maturity of evolving technologies (devices, materials, components, software, work processes, etc.) during its development and in some cases during early operations (Wikipedia).

physiologique de contrôle visuel de fermeture **et** verrouillage d'un capot moteur par un opérateur Humain en opération de maintenance aéronautique. Nous nous sommes placés en situation collaborative pour explorer plus spécifiquement la spécification I_{TH} de l'interopération de l'Ingénierie du Système Support du Système d'Intérêt (le TOUT) avec les Ingénieries Spécialistes des deux composantes (Parties) Humaines et Techniques.

Nous avons étudié la modélisation de ce processus de perception dans le cadre de la théorie des affordances de Gibson afin de mettre en exergue que la communication symbolique entre objets humain et technique passe par un objet interface, dont nous avons spécifié les conditions de perceptibilité en explorant la dimension physiologique (*physiologicalisation*), au travers des travaux en physiologie de la perception et de l'action puis de ceux en physiologie intégrative, ainsi que la dimension physique (*physicalisation*). Cette étude de la nature physico-physiologique de l'interaction entre objet humain et technique nous a ainsi permis de montrer la faisabilité de mesurer des exigences physiologiques en accord avec notre objectif de faciliter l'intégration des facteurs humains en IS. Cependant, les postulats que nous avons dû poser pour progresser dans notre démarche montrent que des études approfondies sont nécessaires pour obtenir des modèles physiologiques « plus poussés » de la perception, entre autre visuelle mais également auditive et tactile²³, voire de l'action et de son contrôle.

Par ailleurs, nous avons également souligné que la mise en avant d'exigences facteurs humains mesurables permettait de placer les parties prenantes du processus de spécification système dans un *continuum fonctionnel* en amont du processus d'allocation sur des composantes techniques et humaines, préservant ainsi le paradigme fonctionnel systémique clé véhiculé par l'Ingénierie d'un Système comme un Tout pour la définition d'une solution répondant bien au problème posé par le domaine opérationnel.

Bien qu'exploratoires, les résultats que nous avons produits montrent qu'un processus de spécification rationnel permet de mieux cibler les exigences facteurs humains pour lesquelles des mesures, accessibles dans l'état actuel des connaissances, sont nécessaires. Notre proposition quant à l'organisation de l'ingénierie d'un système support de maintenance tient compte de cet état de fait et souligne la nécessaire coopération entre Architecte-Système (Principal et Support), Architecte-Système Humain et Architecte-Système Technique, eux-mêmes interagissant avec leurs Ingénieries-Spécialistes respectives, tout au long du cycle de vie système²⁴. Nous contribuons ainsi à montrer la nécessité de prendre en compte au plus tôt les propriétés physiologiques de certaines interactions, notamment en spécification de systèmes fortement contextualisés comme un système support de maintenance.

²³ L'exploration des modalités sensorielles auditive et tactile est en cours de recherche dans notre laboratoire.

²⁴ Romain Lieber, Jean-Marc Dupont et Fabien Bouffaron ont joué ces rôles respectifs dans notre scénario de co-spécification à l'échelle de notre étude de cas

Un autre résultat important est de mettre en évidence la nécessité que la fonction cognition soit correctement stimulée par un flux physico-physiologique adéquat alors que beaucoup de travaux considèrent de façon isolée le processus de cognition. Il s'agit d'une contribution importante pour l'Ingénierie Système qui est avant tout une Ingénierie d'Interactions pour faire de deux Parties de nature différente, en l'occurrence Homme **et** Machine, un Tout.

Par ailleurs, ce résultat peut également être vu comme complémentaire de travaux menés par l'équipe SDC²⁵ à l'ENIT dans le domaine de la maintenance sur le développement de systèmes décisionnels et cognitifs pour l'aide à la décision en vue de l'amélioration des performances de systèmes sociotechniques complexes et distribués, en mettant en exergue qu'il faut également s'interroger sur le stimulus que de tels systèmes doivent véhiculer aux opérateurs dans le cadre du processus de création de la décision en contexte.

Nous avons dû revisiter pour cette activité de spécification d'exigences Facteurs Humains le cadre scientifique de la MTIP, à l'origine des travaux de cette thèse, qui nécessite des données difficilement disponibles actuellement pour vérifier par exécution de modèles une spécification physiologique. Cependant, ne serait-ce que par son potentiel explicatif, il semble pertinent de poursuivre ce chemin scientifique pour faire de la MTIP une théorie de modélisation physiologique processive, à l'instar du cheminement scientifique qui a conduit, par exemple, à faire de la Théorie du Système Général de (Le Moigne, 1977) une théorie de modélisation.

Sur la base de cette expérience, ce chemin scientifique est poursuivi actuellement dans le cadre des travaux de thèse de Fabien Bouffaron en « Spécification d'un système de contrôle distribué pour la conduite interactive d'un procédé industriel critique²⁶ ». Il s'agit de systèmes dont la conduite est en grande partie opérée par des humains. Ces travaux explorent la possibilité de faire interopérer des modèles de système et de processus hétérogènes (humains et techniques), définis dans des outils et formalismes spécialistes, au travers d'un bus de co-simulation²⁷ (Figure 0-8).

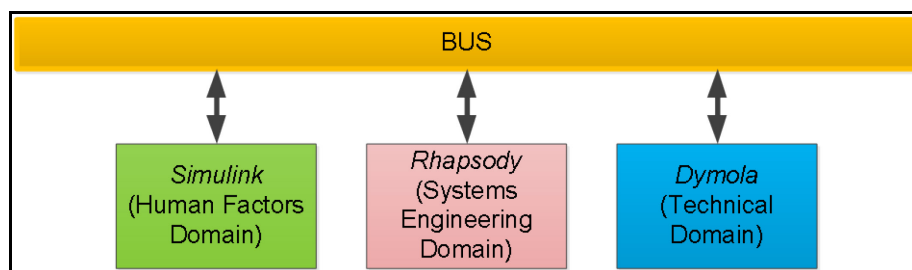


Figure 0-8 - Bus de co-simulation entre les différents domaines d'ingénierie concernés par la spécification d'un système constitué par deux types de composants : humain et technique

²⁵ Equipe Systèmes Décisionnels et Cognitifs (SDC) de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (ENIT)

²⁶ <https://www.cluster-connexion.fr/>

²⁷ <http://www.chiastek.com/>

La mise en œuvre de ce bus de co-simulation, entre les différentes ingénieries spécialistes, constitue un pré requis à tout déploiement « à grande échelle » pour une véritable ingénierie système basée sur des modèles.

Ces travaux contribuent à compléter le niveau de démonstration de la faisabilité d'une telle démarche (TRL 4-5-6) en phase avec la vision 2020 de l'ingénierie système par l'INCOSE (INCOSE, 2007) (AFIS, 2012) quant à l'anticipation des performances des systèmes critiques et la maîtrise de leur développement au plus tôt du projet, via des modèles numériques. Ces travaux sont aussi en ligne avec les approches «*Model in the loop*» et «*System in the loop*» des rapports BGLE²⁸ recommandant l'utilisation de modèles physiques numériques en liaison avec des éléments réels pour la conception et le test des systèmes embarqués.

L'enjeu pour l'industrie de systèmes critiques, aéronautiques ou nucléaires, dans le cadre de la démarche que nous proposons est de maîtriser a priori les performances des systèmes en opérations, c'est-à-dire de pouvoir vérifier la spécification système au plus tôt par exécution de modèles. Relativement à cela, au sein du groupe EADS, plusieurs initiatives, via le centre de recherche « Innovation Works », ont été menés et font entre autre usage des mannequins numériques pour simuler ces opérations impliquant des opérateurs humains. Nos travaux apportent une vue différente à leur usage substituant l'approche incarnée par une approche centrée sur le procédé physique à opérer dite «*affordante*», où l'objet technique guide le mannequin dans sa tâche (Alboussière, 2011). Par exemple, l'exigence d'alignement d'une Source_{Technique} sur un Puits_{Biologique} infèrerait la posture anthropométrique d'un mannequin numérique et in-situ d'un opérateur. En ce sens, nous avons aussi envisagé sur le cas de l'antenne de localisation (présentée en chapitre 1), mais avec des développements en physiologie qui dépassaient le cadre de cette thèse, la spécification physiologique d'un tournevis guidé par la spécification technique (torseur des actions) du tournevis mécanique.

Ces pistes montrent la pertinence de ces premiers travaux, bien que très exploratoires, pour améliorer de façon mesurable la synergie entre Facteurs Humains et Techniques en Ingénierie Système pour la spécification d'interaction homme-machine.

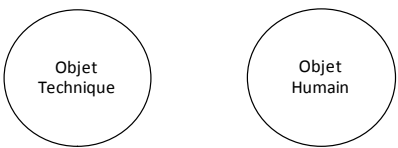
²⁸ Briques Génériques du Logiciel Embarqué (Potier, 2010).

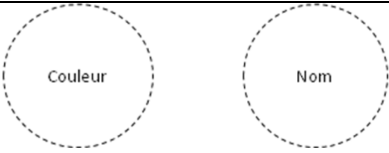
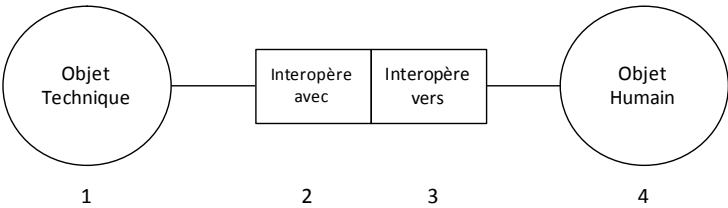
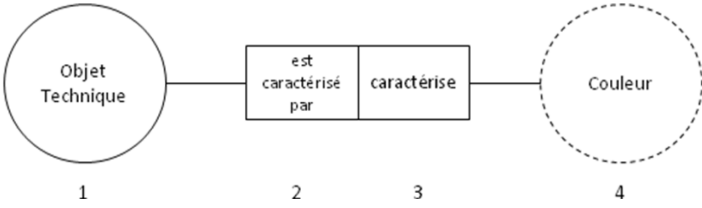
4. Annexes

Annexe 1 : NIAM/ORM

Cette variante orientée-fait (www.ormfoundation.org) de NIAM diffère des méthodes orientées objet en privilégiant la formalisation en Langage Naturel Binaire de faits élémentaires exprimant des relations entre objets d'un Univers du Discours. Notre univers du discours est celui de l'interaction technico-humaine en opérations de maintenance. Ci-dessous, nous présentons les éléments clés du formalisme NIAM utilisé au cours du chapitre 2 pour la modélisation de type ORM (réalisée avec VisioModeler). Nous partirons pour cela de l'atome élémentaire d'interaction lié à notre univers (du discours) d'intérêt : l'interaction entre un objet technique et un objet humain.

Remarque : Les travaux de la « ORM Foundation » ont donné lieu à de nouvelles évolutions de la modélisation orientée-fait au travers de « *Object Role Modeling 2* » (ORM2) et de l'outil support *Norma*. Ce dernier présente l'avantage de conserver les différents modèles, et donc les instances de ces modèles, et permet également de réaliser du Model Checking en ligne.

<u>1^{er} niveau de modélisation de faits orientés objet – Les objets du modèle</u>	
<p>Représentation d'un NOLOT :</p> <p>Un NOLOT correspond à « <i>NO</i>n <i>Lexical Object Types</i> » et permet de représenter les choses de l'univers du discours d'intérêt.</p> <p><u>Remarque</u> : Les NOLOT correspondent aux entités</p>	 <p>Dans notre cas, les premières entités, constituant l'atome élémentaire d'interaction de notre univers du discours, sont l'<i>objet technique</i> et l'<i>objet humain</i>. Ils sont représentés dans le langage graphique ORM par des cercles continus.</p> <p>Dans notre cas d'étude, les instances de ces entités sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Objet technique : le Verrou, la Bielle, le Crochet ou le Capot • Objet Humain : le TEA, le CMO, le CE, la Fovéa, le Cortex cognitif
<p>Représentation d'un LOT :</p> <p>Un LOT correspond à « <i>Lexical Object Types</i> » et permet de représenter les mots.</p>	

<p><u>Remarque</u> : Les LOT correspondent aux attributs des entités encore appelés <i>Value Type</i>.</p>	 <p>Dans notre cas, nous n'avons pas utilisé cet objet de modélisation. Néanmoins, à titre d'exemple, l'objet technique est par exemple caractérisé par une couleur (la couleur orange du verrou), et l'objet humain est par exemple caractérisé par un Nom (le Nom du TEA impliqué dans l'opération de maintenance).</p>
<p>Représentation d'une Idée (sans contraintes sur les rôles entre objets) :</p> <p>Une Idée met en relation deux NOLOTS</p> <p><u>Remarque</u> : 2 et 3 sont appelés des rôles</p>	 <p>Dans le langage graphique, une idée est représenté comme ci-dessus. Elle peut se lire :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1-2-4 : Objet Technique interopère avec Objet Humain ex : Technical Object "Latch" interoperates to Human Object "TEA" • 4-3-1 : Objet Humain interopère vers Objet Technique ex : Human Object "TEA" interoperates from Technical Object "Latch"
<p>Représentation d'un « pont de dénomination » (sans contraintes sur les rôles entre objets) :</p> <p>Le pont de dénomination met en relation un NOLOT et un LOT</p> <p><u>Remarque 1</u>: 2 et 3 sont appelés des rôles</p>	 <p>Ce pont de dénomination peut se lire :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1-2-4 : Objet Technique est caractérisé par Couleur • 4-3-1 : Couleur caractérise Objet Technique <p>Dans nos modèles, nous n'avons pas utilisé cette représentation conventionnelle pour modéliser les ponts de dénominations. En effet, nous sommes restés plus générique sur les « value type » des entités modélisés (« physic », « physiologic », « affordance) et les avons modélisées en utilisant une notation condensée entre NOLOT et LOT (à l'intérieur des NOLOT). Ces « value type » sont in</p>

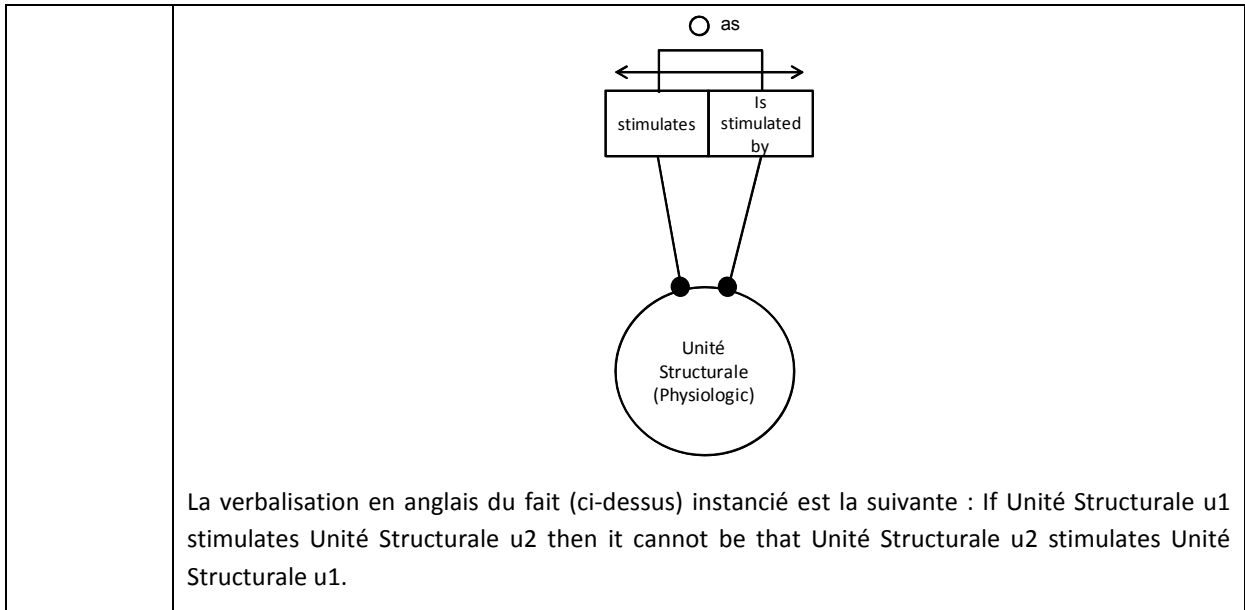
	<p>fine les type de mesure (« measured by ») que nous pouvons avoir sur ces objets :</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 10px; text-align: center;">Objet Technique (Physic)</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 10px; text-align: center;">Objet Humain (Physiologic)</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 10px; text-align: center;">Objet Interface (Affordance)</div> </div>
--	--

Aux faits exprimés au travers des **idées** et des **ponts de dénomination**, nous pouvons apporter plus de précisions par des *contraintes relationnelles* (voir tableau ci-dessous) :

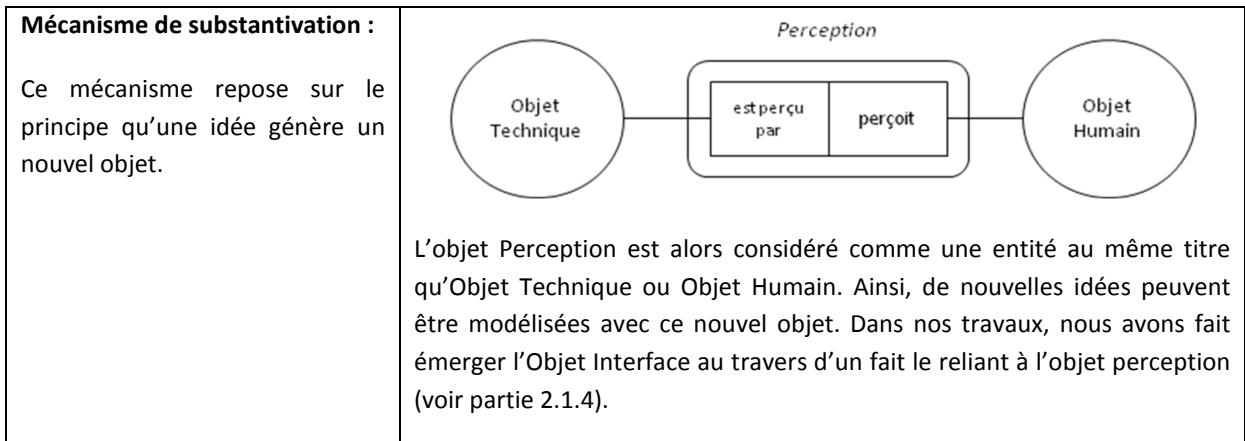
<u>2^{ème} niveau de modélisation de faits orientés objet – Les contraintes relationnelles</u>			
<u>Contrainte</u>	<u>Signification</u>	<u>Représentation</u>	<u>Commentaires</u>
Unicité sur rôle	Au plus un		A joue r1 au plus une fois, B joue r2 n fois.
			A joue r1 au plus une fois, B joue r2 au plus une fois.
			A joue r1 n fois, B joue r2 n fois.
Totalité	Chaque, Tout		Chaque A joue r1
Totalité entre rôles	Au moins un		Tout A joue au moins r1 ou r2
<p>Ci-dessus un exemple représentatif de ces types de contraintes par rapport à notre sujet d'étude. La verbalisation en anglais est la suivante : <i>It is possible that some Technical Object interoperates to more than one Human Object and that some Human Object interoperates from more than one Technical Object.</i></p>			

<p>Unicité entre rôles (Uniqueness Constraint)</p>	<p>Une combinaison de rôle permet de définir un objet</p>	<p>ci-dessous</p>	<p>Un objet interface est défini de façon unique par la combinaison d'un objet technique source et d'un objet humain puits</p>
<p>Ci-dessous un exemple représentatif de ce type de contraintes par rapport à notre sujet d'étude. La verbalisation en anglais d'un fait instancié est la suivante : For each Human Object "TEA" and Technical Object "Latch" there is at most one Interface Object that stimulates Human Object "TEA" and is emitted from Technical Object "Latch"</p>			
<p>Exclusion entre rôles (Exclusion constraint)</p>	<p>Si l'un pas l'autre</p>	<p>ci-dessous</p>	<p>Une unité structurale ne peut jouer à la fois le rôle d'émission et de réception du produit physiologique</p>

<p>Sous-ensemble (subset constraint)</p>	<p>Un si l'autre</p>	<p>ci-dessous</p>	<p>Si l'objet technique contextualise l'objet humain alors il est opéré par ce dernier</p>
<p>Asymmetric Ring constraint</p>	<p>Cette contrainte relationnelle s'applique uniquement sur des faits où les deux rôles sont joués par la même entité (mais pas les mêmes instances). Cette contrainte est ainsi particulièrement adaptée pour représenter l'interaction fonctionnelle entre au moins deux unités structurales physiologiques (voir définition partie 2.2). La contrainte « asymmetric » permet de modéliser la propriété de non-symétrie de l'interaction.</p>		



Par ailleurs, les fondements ensemblistes en logique du 1^{er} ordre et l’outillage graphique offrent la possibilité de réifier une relation entre deux objets, exprimée au travers d’une idée, par le mécanisme de substantivation. Ce mécanisme permet d’exprimer le fait qu’une relation (un verbe) entre deux objets donne lieu à un nouvel objet permettant de réifier la relation d’origine dans un niveau d’abstraction ou dans un domaine différent de celui du fait initial.



Annexe 2 : Ingénierie et modélisation système

Présentation générale de l'ingénierie système

Il existe actuellement plusieurs référentiels de l'ingénierie système qui vise à en proposer un cadre normatif par la présentation de ses bases conceptuelles. Parmi ces référentiels, on trouve celui du *Systems Engineering Body of Knowledge* (SeBok) développé par (Pyster, 2012) dans le cadre du projet BKCASE. Ce référentiel, à l'instar d'autres initiatives à échelle locale (AFIS, 2009) (Nasa, 2007), vise à fonder à l'international le référentiel des artefacts de l'ingénierie système. Aussi, l'ingénierie système admet plusieurs définitions qui se recoupent. Nous avons choisi, ci-dessous, de présenter les définitions de ces trois référentiels.

D'après (AFIS, 2009), l'ingénierie système peut se définir comme « *une démarche méthodologique coopérative et interdisciplinaire qui englobe l'ensemble des activités adéquates pour concevoir, développer, faire évoluer et vérifier un ensemble de produits, processus et compétences humaines apportant une solution économique et performante aux besoins des parties prenantes et acceptable par tous. Cet ensemble est intégré en un système, dans un contexte de recherche d'équilibre et d'optimisation sur tout son cycle de vie* ».

D'après (Nasa, 2007), “*Systems engineering is the art and science of developing an operable system capable of meeting requirements within often opposed constraints. Systems engineering is a holistic, integrative discipline, wherein the contributions of structural engineers, electrical engineers, mechanism designers, power engineers, human factors engineers, and many more disciplines are evaluated and balanced, one against another, to produce a coherent whole that is not dominated by the perspective of a single discipline*”.

D'après (Pyster, 2012), “*Systems engineering is an interdisciplinary approach and means to enable the realization of successful systems*”.

Ces définitions mettent en évidence le caractère multidisciplinaire de cette démarche et les nécessaires interopérations entre l'ingénierie du métier d'architecte système, appréhendant le système comme un tout, et les ingénieries des métiers de développement des « parties-du-Tout » (techniques et humains), pour passer d'un besoin à une solution.

Cette démarche, construite autour de la notion clé de *système*, véhicule « un mode de pensée et une façon d’appréhender les affaires par une approche structurée et systématique pour passer d’un besoin à une solution ». Plus précisément, l’adoption d’une vision ou *approche système* en ingénierie consiste à garder à l’esprit que le système répond à une finalité, qu’il est plongé dans un environnement, qu’il représente une solution aux attentes et exigences de ses parties prenantes et que cette solution résulte souvent de compromis entre des exigences pas toujours convergentes (AFIS, 2009). Ainsi, le système, représentant l’objet à faire ou construire, résulte d’un ensemble d’activités organisées dans plusieurs types de processus, identifiés dans la norme ISO/15288 (2008), qui sont regroupés en processus techniques, processus du projet, processus de l’entreprise et processus contractuels. L’ingénierie système ne doit pas seulement être envisagée comme une ingénierie technique mais regroupe également les aspects de pilotage de projet : le *système pour faire le système à faire*.

Dans nos travaux, nous nous intéressons aux processus techniques d’ingénierie et à une famille bien précise, celle du processus de définition des exigences. Cette famille met en œuvre des sous-processus fonctionnant en parallèle bien que séquentiels dans un premier temps. Les propositions que nous formulons dans ce mémoire de thèse sont liées au sous-processus de spécification des exigences (Figure 4-1).

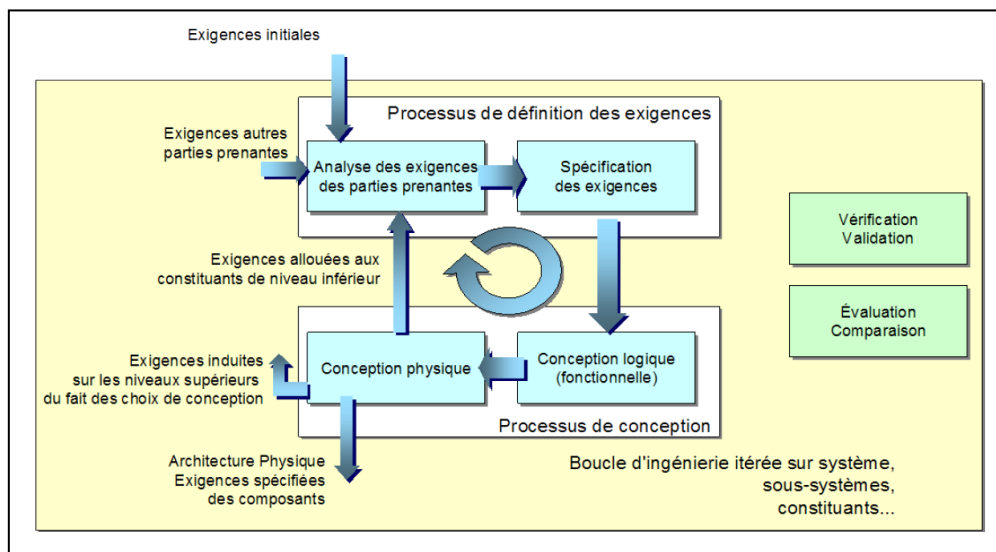


Figure 4-1 - Vision synthétique de la boucle d’ingénierie (AFIS, 2009)

Relativement à ces sous-processus, l’ingénierie système met en œuvre un certain nombre de bonnes pratiques en modélisation système, issues du paradigme systémique fonctionnel sur lequel se base la notion de système, afin de mieux comprendre les interactions du système à faire avec son environnement (Figure 4-2). Tout d’abord, d’un point de vue opérationnel, le système est vu comme une boîte noire rendant les services attendus à son environnement (analyse fonctionnelle externe). Ensuite, d’un point de vue fonctionnel, le système est vu au

travers de ses fonctions internes (analyse fonctionnelle interne) et de leurs agencements dans le temps. Enfin, d'un point de vue physique, le système est vu comme un ensemble intégré d'organes réalisant les fonctions définies précédemment.

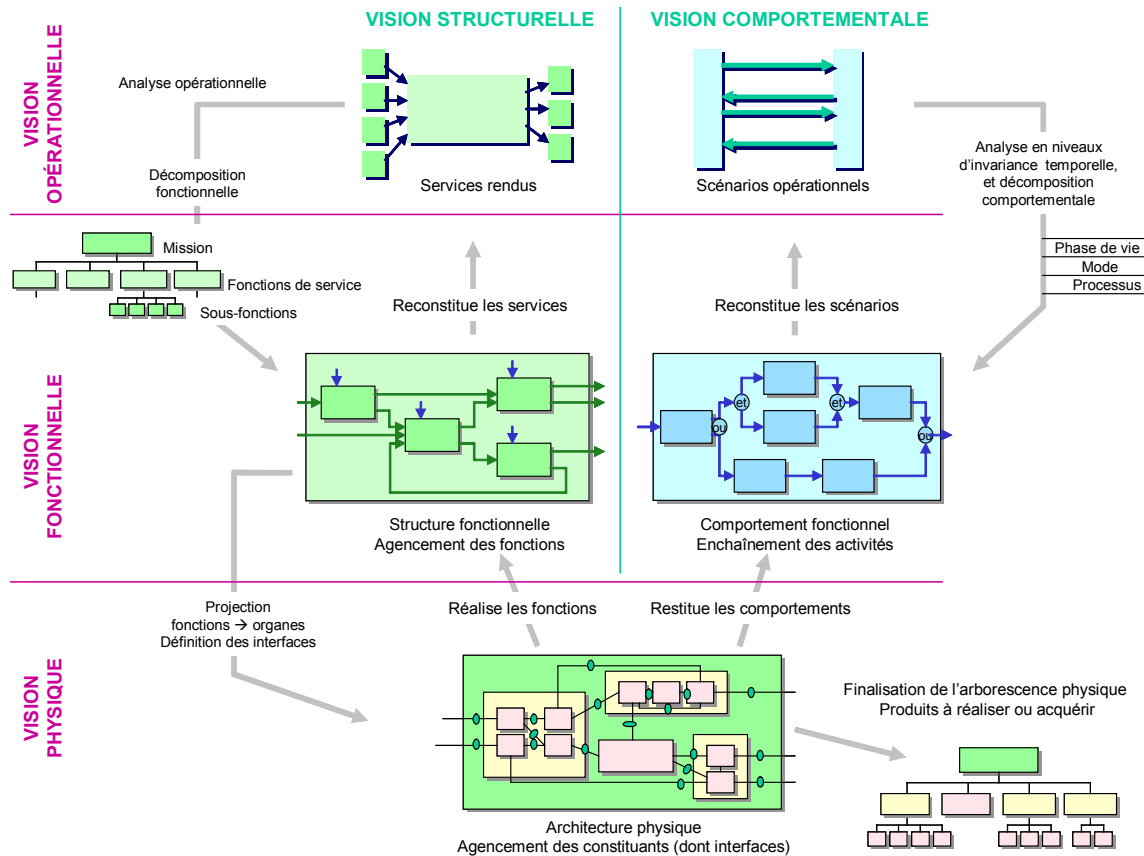


Figure 4-2 - Modélisation systémique traditionnelle (AFIS, 2009)

Cette démarche de modélisation, corrélée aux artefacts essentiels d'ingénierie tels que les exigences, a amené la communauté d'IS à développer un langage de modélisation structurée dédié, SysML (OMG, 2008), qui est considéré comme le langage standard de-facto permettant la construction du système au travers de plusieurs types de diagrammes pour une ingénierie système basée sur les modèles.

SysML : System Modelling Language

(SysML, 2008) est un langage standardisé, appartenant aux langages semi-formels, dont la syntaxe est orientée métier de l'Ingénierie Système et qui a pour objectif de supporter l'Ingénierie Système Basée sur des Modèles (ISBM). Il trouve son origine dans l'intérêt des ingénieurs système pour la conception orientée objet et le langage UML, ce dernier étant orienté vers l'ingénierie informatique, et fut initié par une collaboration entre l'INCOSE et

l'OMG en 2001. Ainsi, SysML est un profil UML2 qui réutilise des éléments de ce dernier et ajoute certaines extensions propres à l'ingénierie système.

En effet, SysML permet de supporter les activités du cycle de vie d'un système comme la spécification des exigences, la modélisation des différents constituants avec leur structure et leur comportement, l'intégration, ainsi que la spécification des scénarios pour la vérification et la validation. Pour cela, il existe plusieurs types de diagrammes SysML pouvant être regroupés en quatre catégories (Figure 4-3).

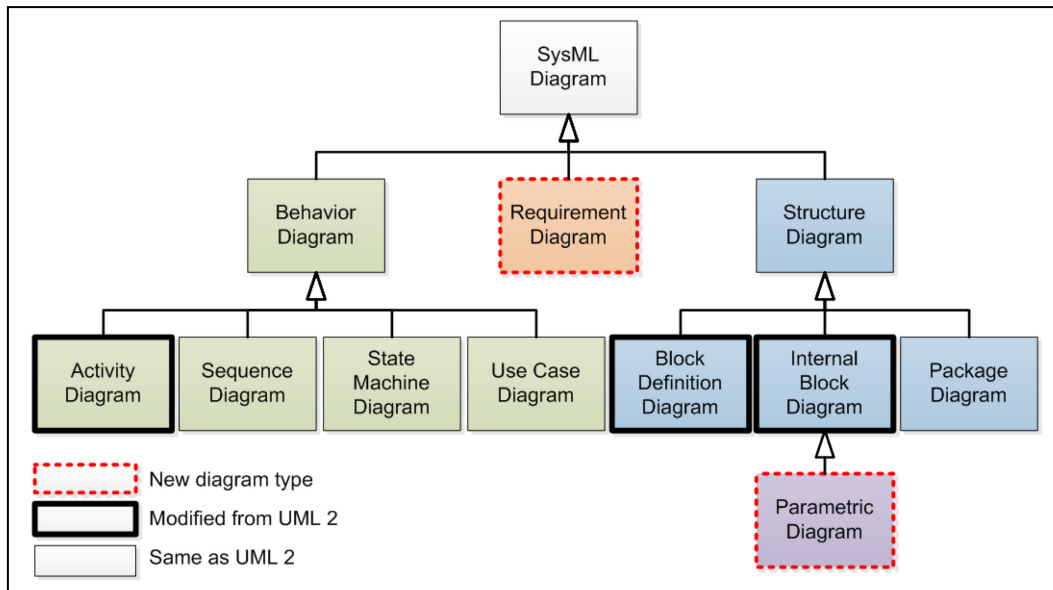


Figure 4-3 - Les différents diagrammes SysML (OMG, 2008)

Plus précisément, on y retrouve :

- Les diagrammes d'exigences (« Requirement Diagram ») qui permettent de représenter la hiérarchie des différentes exigences mises en avant au cours d'un exercice d'analyse des exigences. Il permet également d'en assurer la traçabilité.
- Les diagrammes paramétriques (« Parametric Diagram ») qui permettent à l'ingénieur système de réaliser des simulations du système et de ses composants. En effet, à l'aide d'outils de simulation tels que Matlab Simulink, les modèles formalisés en langage SysML peuvent être émulés, offrant ainsi la possibilité à l'ingénieur système de prototyper son système et ensuite de le vérifier par exécution de modèles.
- Les diagrammes comportementaux (« Behavior Diagram ») qui permettent de modéliser les fonctions et les différents comportements du système d'intérêt.

- Les diagrammes structuraux (« Structure Diagram ») qui permettent de représenter l'organisation structurelle d'un système ainsi que les interfaces (statiques) entre ses composants.

Annexe 3 : Développements liés à l'exigence K_{LL1} (Dupont et al., 2012)

Le niveau d'éclairement de l'environnement dans lequel l'opérateur réalise ses tâches de maintenance joue un rôle prépondérant dans la perception des couleurs. La littérature experte dans le domaine estime à 10^{-3} candela/m² le seuil de luminance à partir duquel les bâtonnets et les cônes sont conjointement activés permettant ainsi la perception des couleurs, et notamment celle de la couleur orange. En-dessous, seuls les bâtonnets sont activés (vision scotopique), et au-dessus d'une dizaine de candela/m² seuls les cônes sont activés (vision photopique).

De manière plus précise, on distingue trois familles de cônes dénommés "bleu", "vert" et "rouge" ou respectivement S (pour Short), M (pour Medium) et L (pour Long) en anglais. Ces cellules se répartissent de manière non-homogène au niveau de la fovéa (Figure 4-4). Par ailleurs, chacune de ces familles de cônes est caractérisée par une sensibilité préférentielle à une longueur d'onde donnée même s'il reste sensible partiellement aux autres.

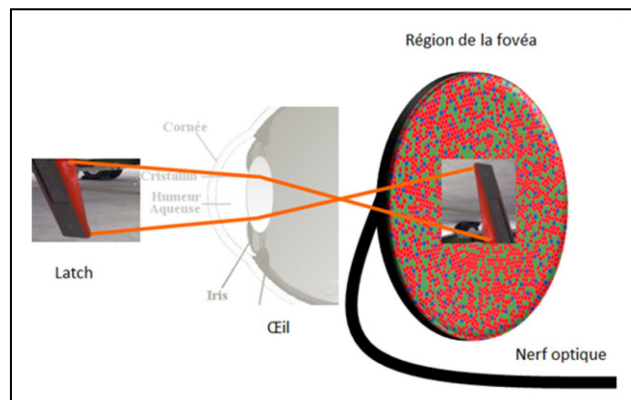


Figure 4-4 - Image du verrou sur le réseau des champs rétinien composé d'une répartition des différents cônes

Ces différentes propriétés photo-physiologiques traduisent en fait une sensibilité de l'œil humain à la puissance lumineuse émise, notée ϕ_λ , par la source verrou. L'œil percevrait un flux lumineux, noté F_λ , dépendant de la longueur d'onde et du moment de la journée (jour : vision diurne ou photopique ; nuit : vision nocturne ou scotopique). Selon (Dartt, 2010), ce flux F_λ s'écrit en relation avec la puissance lumineuse ϕ_λ :

$$F_\lambda = \frac{V_\lambda}{L} \phi_\lambda$$

où L est une valeur numérique qui vaut 0.00146 (W/lm) pour la vision diurne et 0.000587 (W/lm) pour la vision nocturne, avec V_λ désignant l'efficacité lumineuse relative (Figure 4-5).

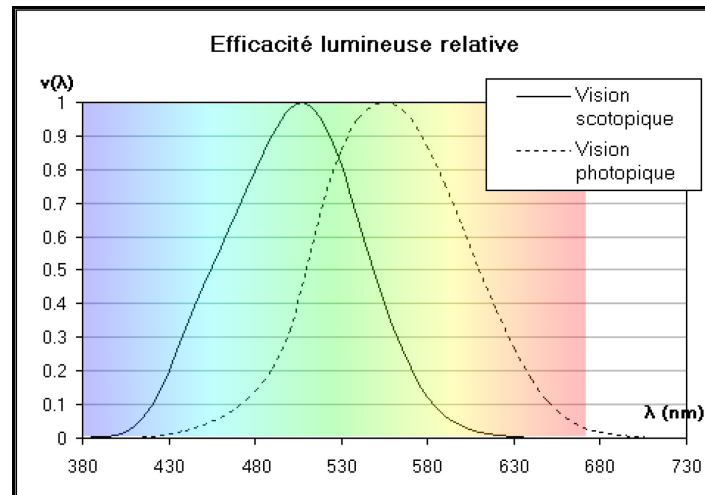
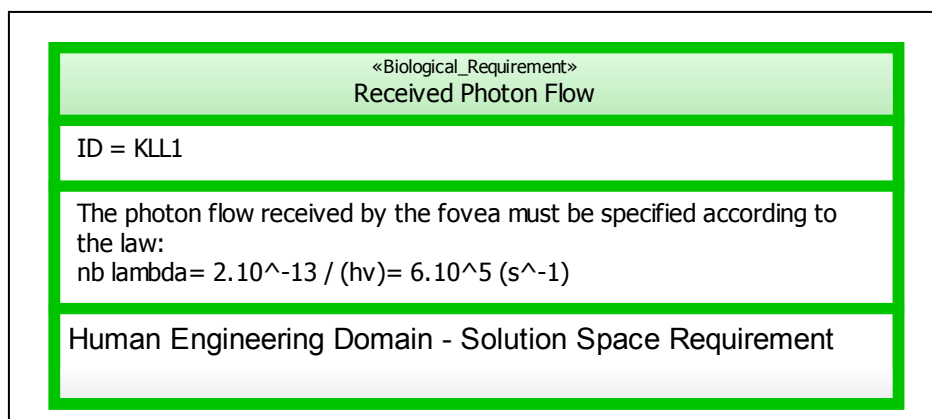


Figure 4-5 - Efficacité lumineuse relative

Il en découle diverses propriétés de perception d'une couleur qui dépendent aussi du type de vision. Par exemple, la puissance lumineuse perçue par l'œil sera différente selon le rayonnement monochromatique émis (la couleur). Si nous prenons un rayonnement monochromatique de couleur orange équivalent à $\lambda = 610$ nm alors $v(\lambda)$ vaut environ 0.5 et la puissance minimale de ce rayonnement est d'environ $2 \cdot 10^{-13}$ Watt (soit des joules par seconde). Par ailleurs, un photon de longueur d'onde λ transporte une énergie égale à $h\nu$ (h constante de Planck et $\nu = c/\lambda$ avec c la vitesse de la lumière).

Ce nouvel élément de connaissance fournit par notre expert nous amène à formuler une nouvelle exigence mesurable qui spécifie le débit de photons requis par la fovéa, en posant nb_λ le nombre minimal de photons que doit recevoir la fovéa par unité de temps (seconde) :



Annexe 4 : Développements liés à l'exigence M_{LL2} (Dupont et al., 2012)

1/ Formulation de l'équation :

Une première équation générique (Eq.1), établie par notre expert sur la base des travaux de (Pharr, 2010), peut ainsi être formulée pour spécifier la propagation de cette densité, encore appelée *radiance* L , ainsi que l'influence de paramètres tels que la longueur d'onde, le temps, la direction du verrou vers l'œil, la direction d'un rayon incident vers le verrou ou encore la position de ce dernier :

$$L_0(x, \omega, \lambda, t) = L_e(x, \omega, \lambda, t) + \int_{\Omega} f_r(x, \omega, \omega', \lambda, t) L_i(x, \omega', \lambda, t) (-\omega' \cdot \mathbf{n}) d\omega' \text{ (Eq.1)}$$

Avec pour les notations et quantités introduites :

\mathbf{x} = position d'un point de la surface du verrou ou du verrou s'il est considéré comme une source ponctuelle secondaire (réflexion).

ω, ω' = direction du verrou vers l'œil, direction d'un rayon incident vers le verrou en \mathbf{x}

λ = longueur d'onde (en nm) "porteuse" de la couleur du verrou (orange)

t = temps (s)

L_0 = radiance totale dirigée suivant ω , au temps t partant de la position du verrou \mathbf{x} ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$).

L_e = radiance émise en \mathbf{x} ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)

Ω = domaine/hémisphère des différentes directions de rayonnement incident vers \mathbf{x}

$\int_{\Omega} \dots d\omega'$ = Intégrale sur la surface de réflexion centrée en \mathbf{x}

$f_r(\)$ = BDRF ou Fonction de Distribution de la Réflectance Bidirectionnelle (exprimée en sr^{-1}), autrement dit une fonction qui traduit la proportion de lumière venant de ω' en \mathbf{x} à l'instant t .

L_i = radiance de longueur d'onde λ provenant de la direction ω' vers \mathbf{x} ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)

$-\omega' \cdot \mathbf{n}$ = Atténuation due à l'angle d'incidence.

Remarque : Notons que la radiance L_i , exprimée en $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ (en watts par steradian²⁹ par mètre carré), permet d'introduire la puissance du rayonnement naturel et/ou artificiel qui va éclairer l'endroit où se trouve le verrou. Ainsi, suivant sa position, le verrou peut être directement et/ou indirectement éclairé.

²⁹ Le steradian (noté sr) est l'unité de mesure des angles solides

2/Résolution de l'équation :

Certaines approximations sont envisageables pour obtenir une équation simplifiée afin de faciliter un prototypage numérique raisonnable de ce rendu lumineux. Nous proposons ci-après de présenter les différentes étapes aboutissant à la résolution de l'équation (Eq.1).

En considérant le modèle de Lambert, on peut faire l'hypothèse que la lumière soit réfléchie de manière équiprobable dans toutes les directions, indépendamment de x , du temps et de la longueur d'onde. La surface est dite alors parfaitement diffuse :

$$f_r(x, \omega, \omega', \lambda, t) = \frac{1}{2\pi}$$

Les surfaces réelles ne réfléchissent cependant qu'une partie de la lumière en fonction de la longueur d'onde. Cette fraction de lumière, appelée réflectance, dépend de la longueur d'onde λ et est notée ρ :

$$f_r(x, \omega, \omega', \lambda, t) = \frac{\rho(\lambda)}{2\pi}$$

De plus, la radiance L_e est nulle puisque le verrou est un objet qui n'émet pas par lui-même un rayonnement lumineux. D'où :

$$L_0(x, \omega, \lambda, t) = L_0(x, \lambda, t) = \frac{\rho(\lambda)}{2\pi} \int_{\Omega} L_i(x, \omega', \lambda, t) (-\omega' \cdot n) d\omega'$$

Malgré tout, des approximations peuvent être envisagées pour obtenir des valeurs moyennes. Ainsi, en supposant un rayonnement incident homogène ou moyen qui peut être mesuré par un radiomètre dans le domaine de la lumière visible, l'expression peut se simplifier.

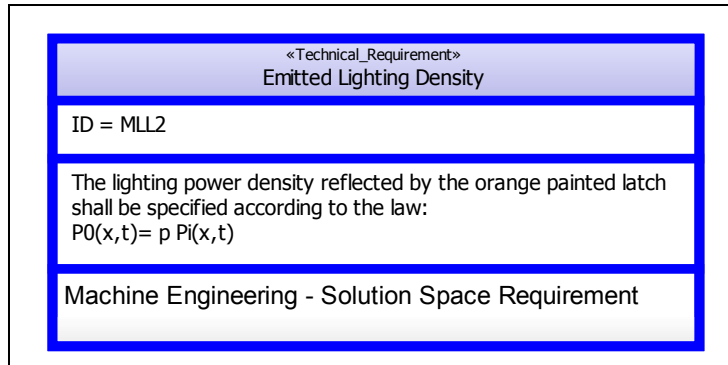
Ensuite, chaque type d'éclairage naturel ou artificiel possède une certaine composition spectrale avec une certaine intensité lumineuse suivant la longueur d'onde, soit D_{ξ}^{ξ} :

$$L_0(x, t) = \int_{D_{\xi}^{\xi}} \frac{\rho(\lambda)}{2\pi} \int_{\Omega} L_i(x, \omega', \lambda, t) (-\omega' \cdot n) d\omega' d\lambda$$

En multipliant par 2π l'expression précédente, on l'exprime ainsi en W/m^2 et on pose P_0 :

$$P_0(x, t) = \int_{D_{\xi}^{\xi}} \rho(\lambda) \int_{\Omega} L_i(x, \omega', \lambda, t) (-\omega' \cdot n) d\omega' d\lambda$$

En introduisant P_i la puissance moyenne incidente mesurée par un radiomètre qui intègre sur une surface donnée l'ensemble des L_i reçues, l'expression précédente devient :



Avec ρ le facteur de réflectance global qui dépend de la nature du matériau et de la nature spectrale du rayonnement incident sur le verrou. D'ailleurs, en l'absence de transmission de ce rayonnement, la somme de ce facteur à celui d'absorption vaut 1 (Figure 4-6).

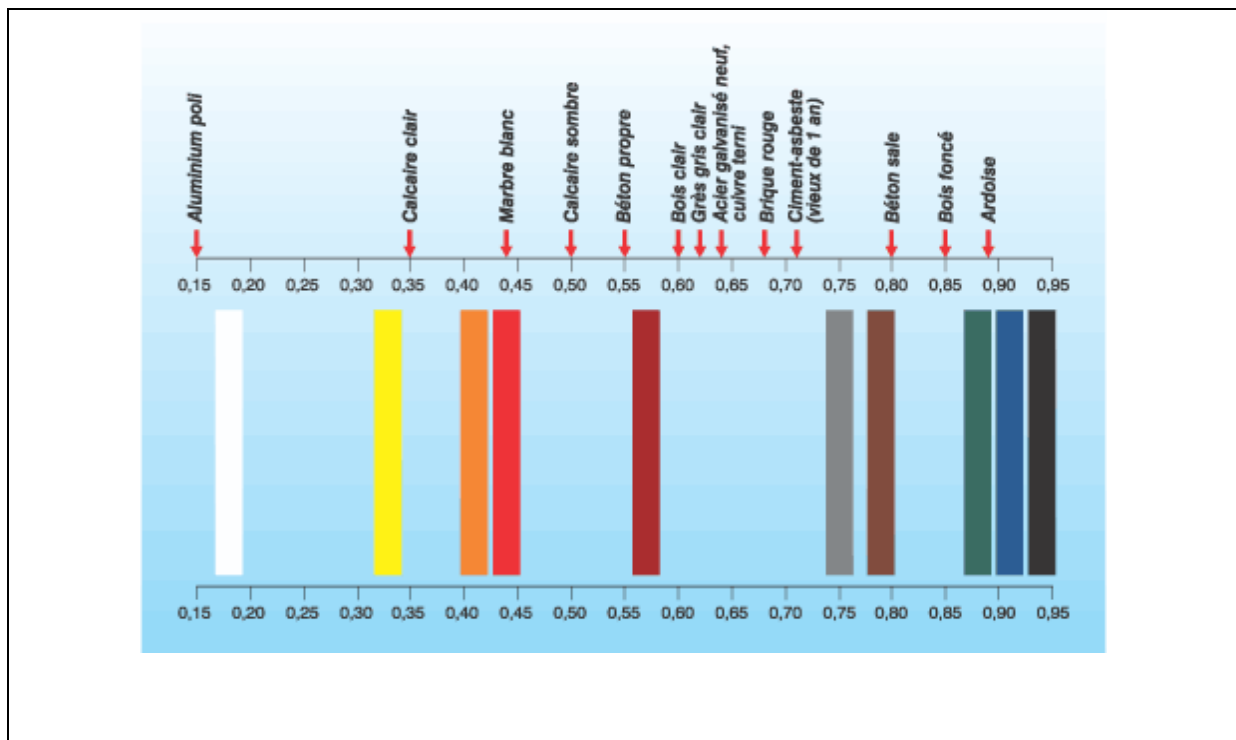


Figure 4-6 - Coefficients d'absorption pour différents matériaux et différentes couleurs (<http://www.energies-renouvelables.org/>)

Annexe 5 : Développements liés aux exigences d'alignement visuel K_{LL2} et K_{LL3} (Dupont et al., 2012)

Le flux de photons traverse l'œil et est dévié en passant par la cornée, puis focalisé par le cristallin qui joue le rôle de lentille biconvexe adaptative. En fonction de la distance de la source verrou, des muscles, appelés ciliaires, peuvent modifier la courbure des deux faces du cristallin pour assurer la formation de l'image au niveau de la rétine (Figure 4-7). Ce phénomène correspond à l'accommodation ou mise au point.

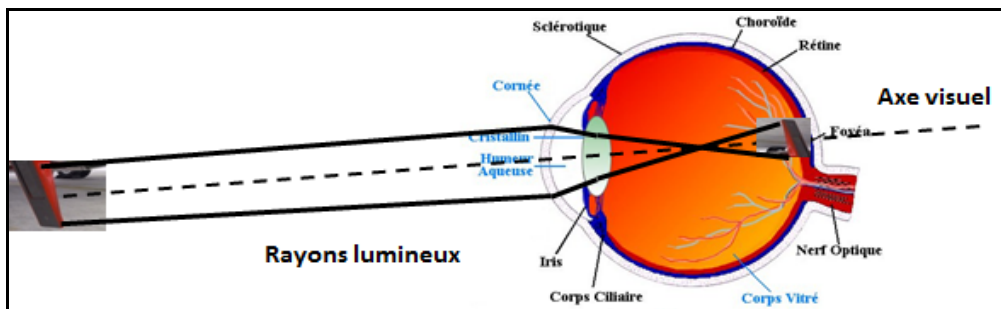


Figure 4-7 - Alignement de l'image du verrou sur la rétine

Dans la littérature, on trouve plusieurs modèles physiques de l'œil, de complexité variable, qui décrivent les éléments de ce phénomène. Notre expert nous oriente tout d'abord sur le modèle proposé par (Herman, 2007) pour sa facilité de compréhension et son caractère générique.

Ce modèle envisage la cornée et le cristallin comme un dioptre sphérique et caractérise les différents milieux traversés (humeur aqueuse, corps vitré) par un indice de réfraction (Figure 4-8). Ainsi, nous comprenons que les indices de réfraction des milieux traversés par la lumière dépendent de la longueur d'onde du signal visuel. En conséquence, si l'objet observé est constitué de plusieurs couleurs, autrement dit de plusieurs longueurs d'onde, alors le plan-image de l'objet observé est décalé. Ce phénomène est appelé aberration chromatique. Une fois l'humeur vitrée traversée, ce flux de photons converge sur la rétine qui est tapissée dans sa couche la plus profonde, par une mosaïque de cellules photo-réceptrices.

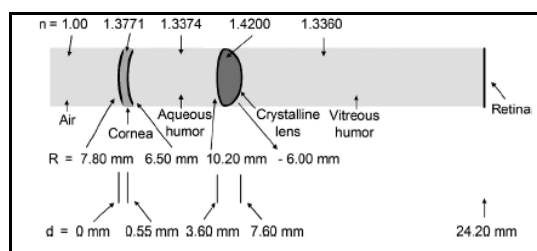


Figure 4-8 - Un modèle simplifié de l'œil (Herman 2007)

En conclusion, pour assurer une bonne perception de la couleur d'un objet au niveau de la rétine, **il faut donc que son image se forme sur la fovéa**. La fovéa est la zone de la rétine où la vision des détails (notamment la couleur) est la plus précise. Elle constitue une surface circulaire de rayon d'environ égal à 0.3 mm.

La question se pose à présent de connaître les conditions physiques permettant cette formation de l'image sur la fovéa. Notre expert nous invite alors à considérer le modèle de Listing qui ramène l'œil à « un dioptre sphérique de centre optique N » situé à 17mm de la rétine (Figure 4-9).

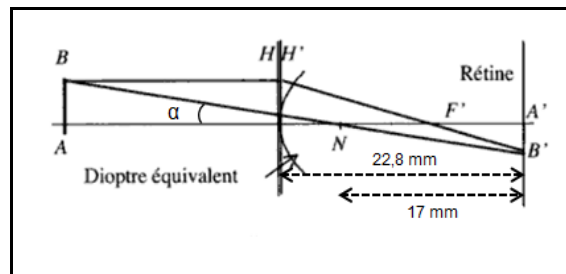


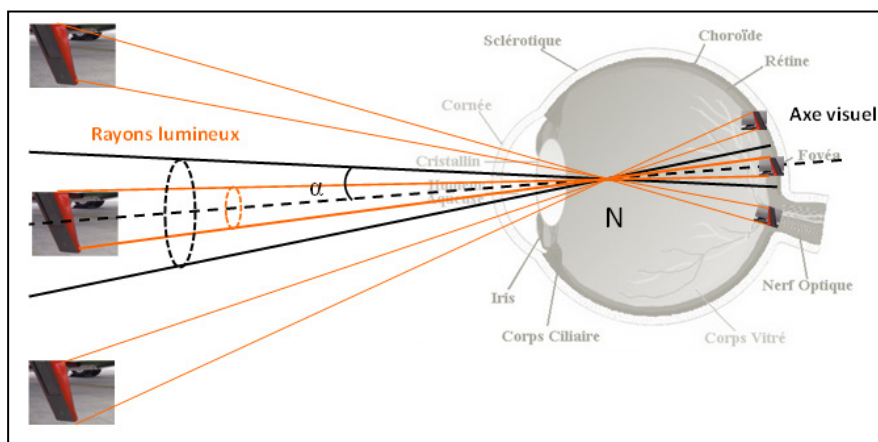
Figure 4-9 - Modèle de Listing

Ce modèle nous permet de déduire que quand l'œil fixe un point dans une direction donnée et qu'il est immobile, il peut détecter les couleurs dans une zone limitée qui est un cône d'ouverture d'environ 1 degré :

$$\tan(\alpha) = \frac{A'B'}{A'N}$$

Avec $A'B' \approx 0.3\text{mm}$ et $A'N \approx 17\text{mm}$, on obtient $\alpha \approx 1^\circ$

Ainsi, pour que l'image du verrou se forme au niveau de la fovéa, le verrou doit se trouver dans ce champ de vision. Ceci traduit une exigence qui contraint l'alignement de la Source Verrou sur la Fovéa de l'œil pour une bonne perception de la couleur (Figure 4-10).



« System_Requirement, Biological_Requirement » Visual_Axes_Alignment

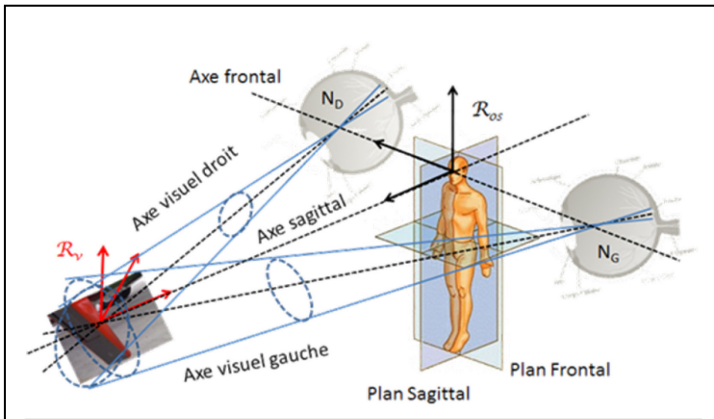
ID=KLL2

The visual sink (Eyes) shall be aligned on the signal source (Orange Object).

Biological Domain – Solution Space Requirement

Figure 4-10 - Cône de vision pour former une image du verrou sur la fovéa

Par ailleurs, la perception visuelle de l'humain est de nature binoculaire. Il s'agit donc de la formation de l'image du verrou au niveau de deux fovéas (Figure 4-11). Ceci traduit une exigence d'alignement de l'axe sagittal sur la Source Verrou, lieu de recoupement des axes visuels droit et gauche.



« System_Requirement, Biological_Requirement » Sagittal_Axes_Alignement
ID=KLL2.1
The sagittal sink shall be aligned on the signal source (Orange Object).
Biological Domain – Solution Space Requirement

Figure 4-11 - Prise en compte de la nature binoculaire de la perception visuelle chez l'humain et de sa « géométrie » anthropométrique

Ainsi, même si les conditions restent identiques pour une bonne perception de la couleur, l'exigence physiologique doit alors non seulement tenir compte de cette spécificité mais également de la géométrie anthropométrique introduisant les plans frontal et sagittal.

Le centre optique de l'œil N ne peut ainsi évoluer que dans une région limitée de l'espace en fonction de l'ensemble des postures possibles que peut avoir l'opérateur et qui dépendent également de son environnement de travail (Figure 4-12). De plus, l'œil ou plus précisément l'axe visuel peut également se mouvoir dans l'orbite crânienne suivant 3 axes. Ainsi, selon le contexte (de maintenance par exemple), le champ de vision ne peut explorer qu'une partie de l'espace dans lequel se trouve l'opérateur.

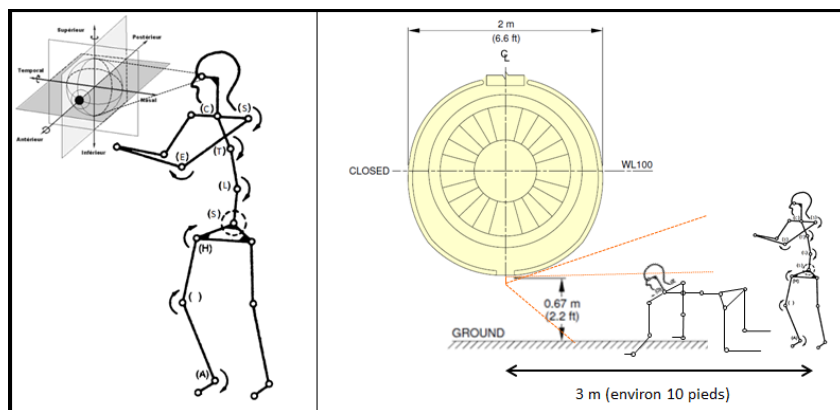


Figure 4-12 - Les différents degrés de liberté du corps humain et de l'œil en opération de contrôle du bon verrouillage du verrou

La satisfaction de l'Exigence d'Alignement nécessite donc de spécifier la condition d'alignement du verrou suivant l'axe visuel. En fonction de la position de l'axe visuelle par rapport à la surface du verrou, seule la surface apparente est visible (Figure 4-13).

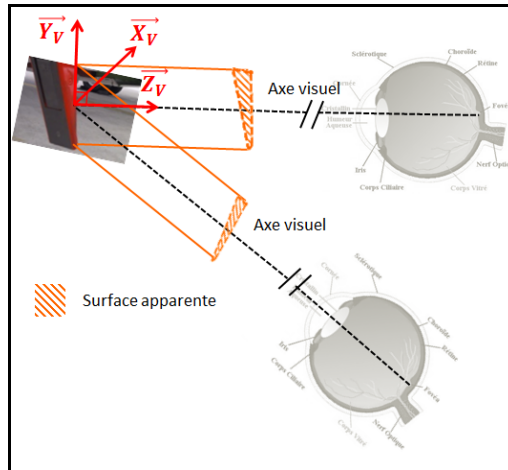


Figure 4-13 - Visibilité du Verrou selon l'axe visuel

La position optimale est l'alignement de la normale (\vec{Z}_V) à la surface plane du verrou sur l'axe visuel de l'œil de l'opérateur. La matrice de transformation vT_O permet de passer du repère R_V au repère R_O selon :

$${}^oT_V = [{}^o s_V \quad {}^o n_V \quad {}^o a_V \quad {}^o P_V] = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & P_x \\ s_y & n_y & a_y & P_y \\ s_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Où ${}^o s_V$, ${}^o n_V$ et ${}^o a_V$ désignent respectivement les vecteurs unitaires suivant les axes X_V , Y_V et Z_V du repère R_V exprimés dans le repère R_O et où ${}^o P_V$ est le vecteur exprimant l'origine du repère R_V dans le repère R_O (Figure 4-14).

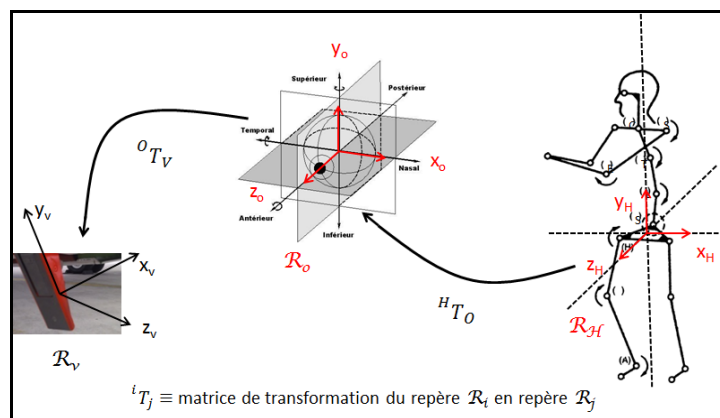


Figure 4-14 - Matrice de Transformation Verrou et Opérateur selon l'axe visuel

Ceci permet d'aboutir à la spécification d'une condition d'alignement du verrou sur l'axe visuel :

«Biological_Requirement» Antropometric_Axis_Alignment
ID = KLL 3
Antropometric axes shall be aligned on the visual axe. $Z_O = -^O T_V Z_V$
Biological Domain - Solution Space Requirement

Annexe 6 : Diagramme des exigences système ITH_{LL}

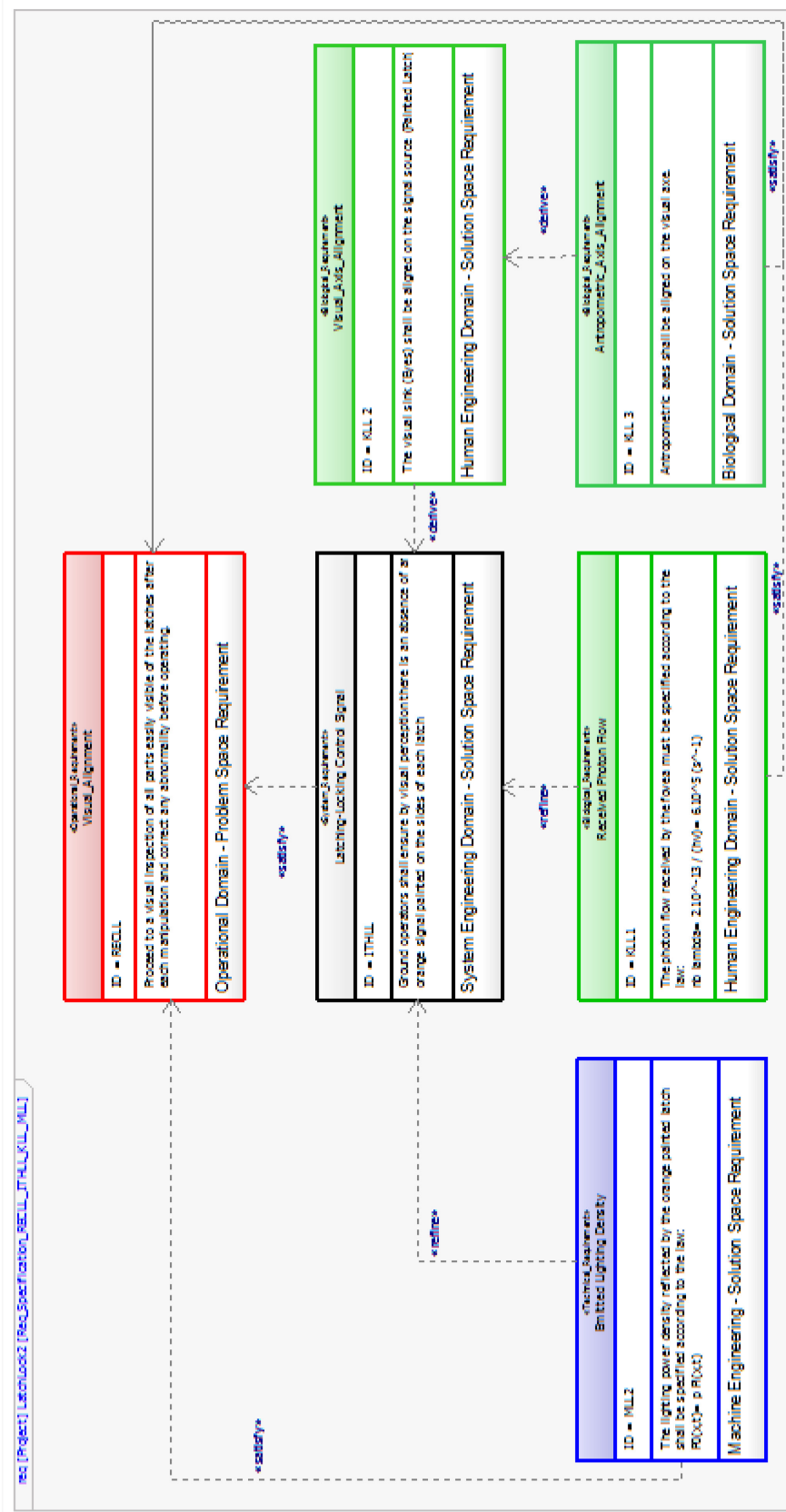


Figure 4-15 - Diagramme SysML des exigences système ITH_{LL} satisfaisant les exigences opérationnelles

Annexe 7 : Perception de deux signaux sensoriels dans le cadre d'une tâche intentionnelle (Mery et al., 2012)

Dans le rapport (Dupont et al., 2012), nous nous sommes interrogés sur la capacité cognitive d'un humain d'interpréter en un temps court plusieurs sources d'informations sensorielles, notamment pour exécuter plus de deux tâches intentionnelles comme dans le cas des recommandations établies par le Rapport BST. Certains travaux récents dans le domaine des sciences cognitives (Charron et al., 2010) montrent que l'on ne peut pas exécuter simultanément plus de deux tâches intentionnelles (Figure 4-16).

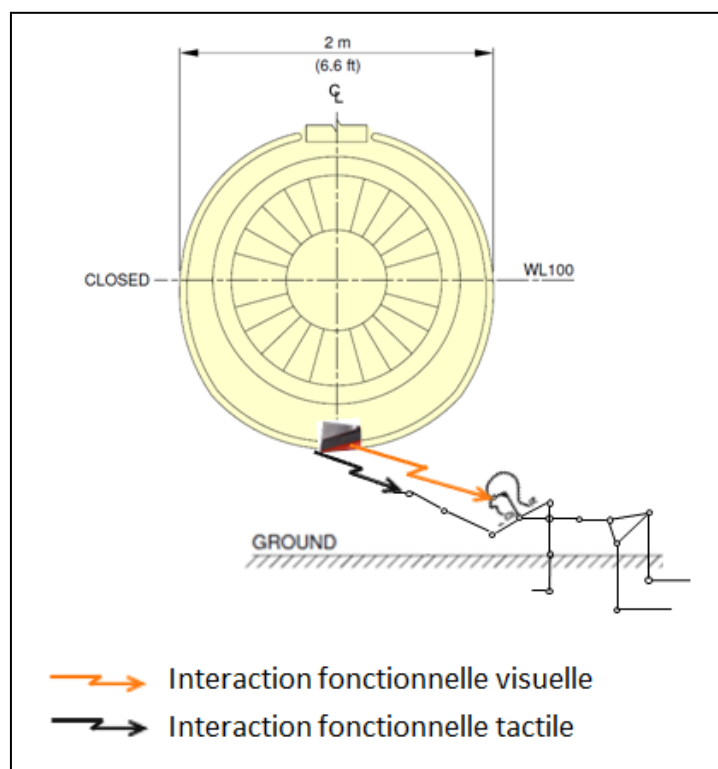


Figure 4-16 - Interactions fonctionnelles visuelle et tactile dans le cadre du contrôle de l'état Fermé et Verrouillé des capots moteurs

Cette limite du nombre de signaux interprétables par un humain nous a amenés à nous interroger sur la logique formelle de l'interaction objet technique-objet humain pour assurer la fermeture verrouillée d'un capot.

Ce problème est identique à celui de la fermeture et verrouillage d'une porte (Figure 4-17). En effet, à l'image du latch, pour assurer le verrouillage de la porte, un bouton sur le côté intérieur de la porte est soit en position enfoncée (à ras pour le latch) soit en position libérée (pendant pour le latch).

Figure 4-17 - Système de fermeture **et** verrouillage d'une porte

Nous avons alors cherché (Mery et al., 2012) à modéliser formellement cette interaction en partant de cette analogie, à l'aide de la méthode de modélisation formelle « event-B » et de la plateforme Rodin. Le principe a alors consisté à modéliser ce qu'un observateur externe au dispositif de Fermeture **et** Verrouillage doit logiquement percevoir. Plus précisément, l'idée est de donner une vue du système technique P_{LL} et M_{LL} tel qu'il doit être perçu dans l'état Fermé **et** Verrouillé de façon à ce que «rien de mauvais ne puisse lui arriver» satisfaisant ainsi R_{LL} .

```

VARIABLES
  pos, seeclose, seelatch, s
INVARIANTS
  inv1 : seelatch ∈ STATES
  inv2 : seelatch = ko ⇒ s = UNLOCKED
  inv3 : seelatch = ok ⇒ s = LOCKED
  inv4 : seeclose = ok ∧ seelatch = ok ⇔ s = LOCKED ∧ pos = 0

```

Figure 4-18 : Invariant logique de Fermeture **et** Verrouillage

La construction prouvée de ce modèle conduit à spécifier que deux signaux «*seeclose*» et «*seelatch*» semblent nécessaires pour garantir la perception requise. L'analyse conduit à un ensemble de variables modélisant d'une part les opérations d'ouverture et de fermeture et d'autre part les variables d'observation liées à l'observateur (TEA). L'exigence de sûreté R_{LL} est interprétée par l'invariant logique 4 (en rouge) à préserver tout au long du processus de raffinement dans l'espace_{Solution} d'ingénierie système (Figure 4-18).

Ce résultat logique est à mettre en miroir de la limite d'interprétation simultanée de 2 taches intentionnelles précédemment soulignée.

5. Glossaire

Artefact

The sense of artifacts as tangible by products is similar to the use of the term artifact in science to refer to *something that arises from the process in hand rather than the issue itself*, i.e., a result of interest that stems from the means rather than the end. [Wikipedia]

Cortex Cognitif

Nous avons construit cette expression afin de souligner a priori les différentes spécificités du cortex impliqués dans la perception, la décision et l'action (nous n'abordons que très peu la partie émotion). Le cortex cognitif est considéré comme un tout impliqué dans la partie décisionnelle, même si anatomiquement et physiologiquement on peut distinguer des sous-systèmes avec des « fonctionnalités » bien précises (ex : cortex frontal, pré-frontal, pariétal).

Ingénierie Système Basée sur les Modèles

L'ingénierie système basée sur les modèles peut se définir comme l'application formelle de méthodes et outils de modélisation pour soutenir les activités de spécification d'exigences système, les activités de conception d'architecture système, ainsi que celle de vérification et validation, depuis la phase de définition du système, en passant par son développement et jusqu'à ses phases de vies opérationnelles les plus avancées. Elle représente un but à atteindre selon la vision 2020 de l'INCOSE pour pouvoir maîtriser a priori la performance et les coûts de système à sécurité critique, faciliter la réutilisation de modèles de programme en programme, assurer la traçabilité.

Comme le souligne (Friedenthal et al., 2009) à l'occasion d'un workshop Model-Based Systems Engineering organisée par l'INCOSE, il s'agit de passer d'une ingénierie système centrée sur les documents à une ingénierie système centrée sur l'utilisation des modèles à toutes les phases du cycle de vie système (Figure 5-1).

SysML est ainsi préconisé comme LE langage de base de l'ingénierie système pour appuyer cette démarche basée sur les modèles.

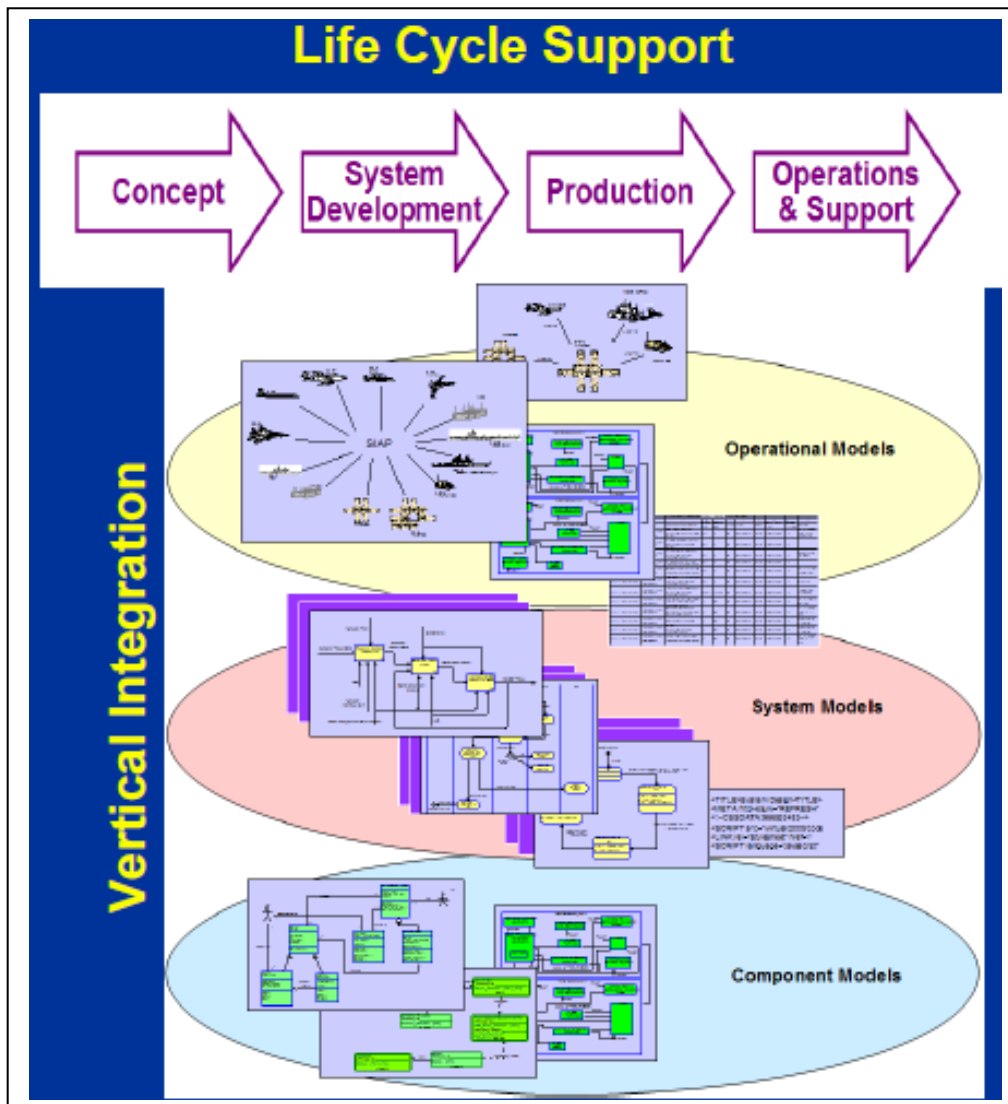


Figure 5-1- Illustration de la vision de l'ingénierie système basée sur les modèles par (Friedenthal et al., 2009)

Ingénierie et modélisation des systèmes complexes

Le système est un concept générique permettant d'appréhender une réalité et ainsi de mieux comprendre les interactions au sein d'un phénomène ou d'un ensemble de phénomènes d'intérêt. Parmi les systèmes, certains peuvent être qualifiés de complexes. De tels systèmes peuvent se définir de la manière suivante : « *Un **système complexe** est un ensemble constitué d'un grand nombre d'entités en interaction qui empêchent l'observateur de prévoir sa rétroaction, son comportement ou évolution par le calcul* » (Wikipedia).

Ainsi, pour arriver à faire l'ingénierie de tels systèmes, il est nécessaire de disposer de guide structurant pour garder à l'esprit, du fait de la multiplication des points de vue de modélisation sur un système, que ce dernier est un tout. Les travaux menés par (Pénalva, 1997) autour de la méthode Sagace proposent une telle grille d'analyse systémique pour

penser globalement système et intégrer les différents points de vue sur le système. Nous proposons de présenter cette grille d'analyse (Figure 5-2) mais ne développons la démarche méthodologique qui sous-tend la méthode dont le lecteur peut trouver une présentation (plus succincte que le mémoire de thèse) sur : <http://www1.agora21.org/ari/penalva1.html>

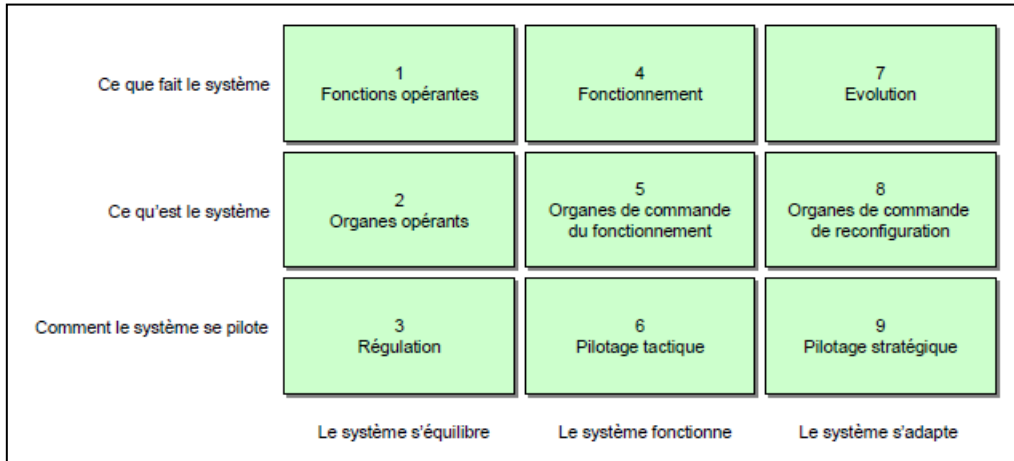


Figure 5-2 - Grille d'analyse des systèmes complexes de la méthode SAGACE (Pénalva, 1997)

Cette grille est constituée de 9 cases qui correspondent à 9 points de vue sur le système. On trouve (en ligne) trois visions du système : ce que fait le système ou vision fonctionnelle, ce qu'est le système ou vision organique, et comment le système se pilote ou vision opérationnelle. Ces visions sont croisées avec les différents aspects temporels liés au fonctionnement du système (en colonne): le système s'équilibre avec son environnement à tout instant (aspect achronique) ; le système fonctionne, c'est-à-dire qu'il enchaîne ses modes et ses activités de fonctionnement en se synchronisant sur l'environnement (aspect synchronique) ; le système s'adapte et évolue du fait des changements pouvant apparaître dans son environnement ou à ceux liés à ses missions (aspect diachronique).

Cette grille permet de structurer la modélisation des systèmes complexes et guide ainsi l'observateur, par exemple l'ingénieur système, à analyser le problème à résoudre et étudier le système complexe pour réaliser son ingénierie.

Invariant perceptif

La notion d'invariant perceptif telle qu'utilisée dans la théorie écologique de la perception visuelle de Gibson est à comprendre comme la structure des éléments visuels qui n'évolue pas dans une fenêtre de temps donnée et qui permet à l'individu d'identifier des « *similitudes* » fonctionnelles entre les objets de l'environnement, dans le cadre d'un projet donné. Par exemple, un individu, face à une table, voulant s'asseoir, identifie au travers des

aspects structurels de cette dernière des similitudes fonctionnelles avec celles d'une chaise (ne faisant pas partie de la scène) et l'utilisera pour s'asseoir.

Mode Optatif et Mode Indicatif

Le cadre de spécification des « Problem Frames » de (Jackson, 1997) sur lequel nous nous appuyons pour mettre en œuvre les relations de spécifications entre les différents espaces problèmes-solution de différents domaines, associe deux modes linguistiques pour spécifier une exigence, l'un « optatif » décrivant ce qui est requis par un domaine d'intérêt comme R_{LL} , l'autre « indicatif » décrivant ce qui doit être connu sur le domaine d'intérêt comme W_{LL} pour prescrire une solution technique.

Dans les chapitres 2 et 3 de ce mémoire, le mode indicatif de la spécification est la **connaissance** que nous avons extraite des experts en physiologie et physique pour aboutir in fine à la formulation des exigences que nous prescrivons.

Physiologicalisation et Physicalisation

Nous avons construit le terme *Physiologicalisation* à partir du mot anglais « *physicalize* » qui signifie '*exprimer en termes physiques*' pour matérialiser le fait que la relation objet interface–objet humain est un objet d'étude à part entière devant être étudié en termes physiologiques.

Pour *physicalization*, nous avons juste adapté le terme anglais « *physicalize* » pour matérialiser le fait que la relation objet interface–objet humain est un objet d'étude à part entière devant être étudié en termes physiques.

Signifiant-Signifié

Ces concepts sont issus des travaux menés par Ferdinand de Saussure (Saussure de, 1915) en linguistique et de son concept de signe (linguistique) décrit comme une unité d'expression du langage. Le signifié désigne la représentation mentale du concept associé au signe, tandis que le signifiant désigne la représentation mentale de la forme et de l'aspect matériel du signe. Relativement à notre exemple, le signifiant est associé au percept véhiculé par le verrou (la couleur orange) et le signifié correspond à la connaissance apprise par l'opérateur relativement à cette couleur orange (la procédure).

Spécification Système

Ceci traduit la spécification au niveau système, c'est-à-dire la spécification d'exigences du système comme un tout, appartenant au processus de définitions des exigences (voir Annexe 2). L'objectif est de spécifier d'abord le système comme un tout intégré, avant d'allouer les exigences aux différents constituants pour ensuite leur conception détaillée.

Plus précisément, le processus de définition des exigences (Figure 5-3) démarre par l'analyse des besoins et contraintes des parties prenantes utilisatrices afin d'aboutir à une description du problème à résoudre sous la forme de la spécification d'exigences système, prenant en compte les contraintes des autres parties prenantes concernées par la réalisation, auxquelles devra satisfaire la solution pour rendre les services rendus.

La spécification système constitue la référence technique pour la conception, elle regroupe les données d'entrée nécessaires à la conception de la solution, et la vérification/validation, elle permet de construire les plans de vérification/validation. Elle représente aussi l'engagement du concepteur et porte sur un système au sens de l'arborescence de développement des systèmes (System Breakdown Structure).

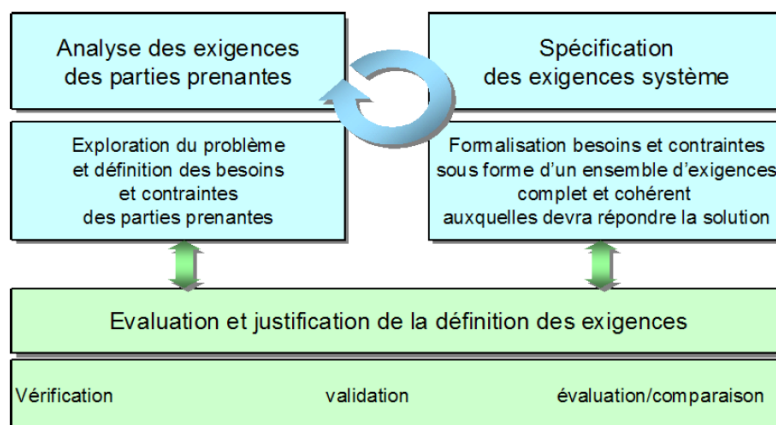


Figure 5-3 - Les sous-processus de la définition des exigences et leurs interactions (AFIS, 2009)

Liste des figures

Figure 0-1 - Représentation dans le formalisme de la MTIP du couplage d’une “boucle sensorimotrice artificielle” (rouge et verte) avec un système biologique (Fass, 2006).....	16
Figure 0-2 - Représentation Intégrative des éléments essentiels de modélisation d’un système biologique et d’un système artificiel (Lieber & Fass, 2011)	16
Figure 0-3 - a) Tâche de remise en conditions opérationnelles de l’Artefact, le mécanisme de fermeture et verrouillage (« <i>Latch Lock</i> ») des portes d’un capot moteur, par un Utilisateur faisant partie d’une Organisation, l’opérateur de maintenance, après intervention selon une procédure dans une Situation opérationnelle contextualisée; b) Modèle « AUTOS Pyramid » (Boy, 2011) présentant les différents domaines d’un système homme-machine à prendre en compte pour la conception centrée sur l’humain ; Les relations entre les domaines (les nœuds du graphe) définissent des « <i>Human-Machine Interaction issues</i> » à appréhender en conception.	17
Figure 0-4 - Proposition d’une organisation d’ingénierie d’un système homme-machine support de maintenance. La spécification d’un tel système consiste en la mise en œuvre de relations d’interopération de description-prescription notées S, entre les espaces problème (EP) et solution (ES) intra et inter domaines ; adapté de (Bouffaron, 2012).	19
Figure 0-5 -Démarche du projet de thèse et Organisation du mémoire – le chapitre 1 est le chapitre de construction de la problématique où nous abordons le Système à Faire (partie 1.1) et le Système Pour Faire (1.2) ; le chapitre 2 est un développement détaillé relativement à la partie 1.1 ; le chapitre 3 est un développement détaillé (jusqu’à la proposition) relativement à la partie 1.2.	21
Figure 1-1 - Diagramme des exigences réglementaires liées à la gestion et la prise en compte des erreurs humaines de maintenance établies par les autorités de certification du transport aérien (EASA & FAA)	24
Figure 1-2 - Opérations de maintenance programmée.....	26
Figure 1-3 -Opérations de maintenance non-programmée en ligne	27
Figure 1-4 - Répartition des erreurs de maintenance selon le type d’opérations de maintenance (Airbus, 2006)	30
Figure 1-5 - Catégorisation des types d’erreurs de maintenance pour les opérations d’installation (Airbus, 2006)	30
Figure 1-6 – a) l’objectif à atteindre ; (b) une seule manière de démonter et (c) plusieurs manières de remonter les écrous	31
Figure 1-7 - Exigence Opérationnelle R_{LL}	32
Figure 1-8 - Recommandations complémentaires REC_{LL} sous forme d’exigence.....	32
Figure 1-9 - Capot moteur d'un avion au sol.....	33

Figure 1-10 - Vue latérale schématique du système et mécanisme de fermeture et verrouillage	33
Figure 1-11 - Structuration d'une procédure de maintenance	34
Figure 1-12 - Séquence formelle de Fermeture et Verrouillage (adaptation de la méthode KOD (Vogel, 1988))	34
Figure 1-13 - Exigence de contrôle de d'alignement des verrous avec la surface des capots	35
Figure 1-14 - Scénario opérationnel de Fermeture et Verrouillage d'un capot-moteur en opération de maintenance aéronautique, basé sur (Rapport BST)	36
Figure 1-15 - Retour d'expérience REX _{LL} sous forme d'exigence	37
Figure 1-16 - Contrôle par perception d'un signal visuel orange de l'état de Fermé et Verrouillé d'un capot moteur (Rapport BST)	38
Figure 1-17 - Concept de Building Block (EIA 632, 1999) - La définition de ce concept est récursive. Pour chaque produit, pouvant être appréhendé au travers du Building Block, on retrouve la même décomposition.....	41
Figure 1-18 - Cascade des exigences entre les différents niveaux de décomposition système et les processus de V&V associés.....	44
Figure 1-19 - Localizer antenna (réf. 3RT) et son environnement direct	47
Figure 1-20 - Cycle de vie de l'antenne	48
Figure 1-21 - Mannequin numérique représentant l'opérateur de montage dans la zone de travail où se situe l'antenne	49
Figure 1-22 - Qualitative Maintainability Analysis (QMA) - Mannequin numérique représentant l'opérateur de maintenance en position pour déconnecter les connecteurs de l'antenne. On voit ici que l'opérateur atteint l'antenne en passant par la caisse de train avant, c'est-à-dire en ne se présentant pas par l'avant de l'appareil comme indiqué par la flèche noire FWD.	50
Figure 1-23 - Maintenance Human Error Analysis (M-HEA) - L'objectif des analyses des erreurs de maintenance est d'identifier les problèmes de mauvaise perception, de mauvaise compréhension, de mauvaise interprétation qui peuvent se dérouler au cours de la réalisation des tâches de maintenance. Il s'agit ensuite de trouver les solutions pour éliminer ou réduire l'impact de ses erreurs.....	50
Figure 2-1 Modèle ORM de l'atome élémentaire d'interaction (F0) basé sur les éléments présentés en Chapitre1 – Nous représentons la nature physique de l'objet technique et physiologique de l'objet humain par un attribut « measurement » (marqué entre parenthèse dans les NOLOT) qui souligne la nécessité d'arriver à caractériser quantitativement ces objets pour respecter les attributs d'une exigence en IS (détails en Annexe1).....	56

Figure 2-2 - Modèle ORM de « Agir en contexte » - Nous raffinons le modèle précédent à partir de l'ensemble des faits élicités et soulignons au travers du F1.3 (contraintes entre les rôles des F1.1 et F1.2) la dépendance à l'égard du contexte de la manière d'opérer de l'objet humain..... 59

Figure 2-3 - Modèle ORM du « Percevoir pour agir en contexte » (1^{ère} itération) – Nous raffinons le modèle précédent par l'élicitation d'un nouveau fait F1.4 qui conduit, relativement aux éléments bibliographiques sélectionnés, à de nouveaux faits (F1.5, F1.6, F1.7) qui ajoutent des contraintes entre les différents rôles du modèle. 61

Figure 2-4 - Modèle ORM du « Percevoir pour agir en contexte » (2^{ème} itération) – Nous raffinons le modèle précédent en soulignant que l'étude de l'interaction homme-machine doit s'orienter sur la relation de Perception (notre objet d'intérêt) ; nous modélisons cela en utilisant le mécanisme de substantivation (F1.8)..... 62

Figure 2-5 - Modèle ORM de l'interaction de perception pour agir en contexte – Nous raffinons le modèle précédent en faisant émerger l'objet interface affordant (F2 & F3) au centre de la relation de perception (F4.1 & F4.2) ; cet objet interface représente l'élément synergique entre objets hétérogènes techniques et humains (F5) qu'il faut arriver à mesurer (cette nécessité de mesure est représentée par '(Affordance)' dans l'objet interface. 64

Figure 2-6 - Illustration de l'affordance en design selon Norman (a) et appliqué à notre cas d'étude en maintenance (b) 66

Figure 2-7 - En haut : Représentation laminaire du cortex cérébrale en 6 couches (Guénard, 2001) - Les couches I à III gèrent la liaison entre les différentes zones corticales. La couche IV reçoit les entrées sensorielles depuis le thalamus. Les couches V et VI fournissent l'information corticale à d'autres structures du cerveau; En bas : Principe du modèle Bijama (Ménard, 2006) - (a) illustre l'organisation des différentes colonnes corticales, définies individuellement comme un groupe de neurones dont les champs de réception sont identiques et envisagées comme les unités de base, au sein des cartes corticales, (b) une colonne corticale ou unité reçoit des entrées sensorielles (partie en gris clair) depuis le prosencéphale (thalamus et amygdale); chaque type d'entrée fait l'objet d'une activité de reconnaissance obtenue par la comparaison entre les entrées reçues et un prototype interne spécifique au type d'entrée, et fournit une activité partielle (partie en gris foncé) ; ensuite, ces activités partielles sont regroupées pour constituer l'activité globale de sortie (partie en noir) . 68

Figure 2-8 - Modèle ORM de l'analyse organique de l'interaction homme-machine de perception par « physicalisation » et « physiologicalisation » - A présent, nous focalisons notre travail sur la perception et faisons apparaître par raffinement du modèle précédent, ainsi qu'à l'aide du mécanisme de substantivation, le périmètre de l'étude (physiologique et physique) à explorer pour arriver à mesurer des propriétés de l'objet interface afin qu'il puisse être plus facilement pris en compte en ingénierie. 71

Figure 2-9 - a) Vision des voies afférentes impliquées dans la vision (de la lumière au cortex visuel) et des aires corticales impliquées dans la perception visuelle ; b) Représentation schématique du traitement de l'information visuelle adaptée de (Rolls, 2007), du cortex visuel aux centres de décision et de programmation de l'action constituant en partie le cortex pré-frontal et plus généralement du cortex cognitif, pour aboutir à la mise en place de la procédure P_{LL} (représentée dans la bulle). 72

Figure 2-10 - Modèle ORM de l'interaction de perception visuelle entre un Objet technique de couleur orange et un Opérateur humain, envisagée comme la mise en correspondance d'un percept, la couleur orange, et d'une propriété cognitive ou connaissance de l'opérateur, la procédure de fermeture-verrouillage apprise. 74

Figure 2-11 - a) Interface de l'outil PhysioMatica ; b) Schéma fonctionnel de l'outil de modélisation et simulation PhysioMatica – le noyau de calcul correspond à l'outil de résolution des équations mathématiques représentant le système et sa dynamique (Bennani, 2011). 75

Figure 2-12 - Interaction Fonctionnelle entre la Source $U'(r')$, unité de structure à la position r' , et le Puits $U(r)$, unité de structure à la position r . Puits et Source peuvent devenir tour à tour Source ou Puits (Chauvet, 1995). 76

Figure 2-13 - En haut : Schéma illustrant l'interaction fonctionnelle entre u' et u , passant par les niveaux inférieurs de l'organisation hiérarchique structurelle. En bas : Exemple d'équation du champ avec une intégration de volume pondérée par une densité de population notée ρ correspondant à la densité d'unités sources et où $[P\Phi(r)]$ représente les éventuels mécanismes qui suivent le passage de ce message au niveau du puits situé en r (Chauvet, 1995). 77

Figure 2-14 - Modèle ORM de l'atome élémentaire d'interaction fonctionnelle d'un processus physiologique - L'interaction fonctionnelle émerge de la relation de stimulation entre deux unités structurales et est prescrite in fine par le produit émis par la source u_1 ou reçu par le puits u_2 qui traverse des discontinuités structurales ; de telles propriétés des mécanismes physiologiques conduisent à une structuration de l'organisme vivant en niveaux d'organisation hiérarchique de ses unités structurales, l'architecture organique, ainsi que de ses processus physiologiques, l'architecture fonctionnelle. 78

Figure 2-15 - Modèle explicatif de l'interaction fonctionnelle - Analogie entre a) un diagramme de Chauvet et b) un diagramme électrique de type Thyristor pour représenter l'Interaction fonctionnelle de perception visuelle. 79

Figure 2-16 - a) exemple modèle computationnel dit Bloc-diagramme ; b) un tissu nerveux qui est lié à un certain nombre de densités cellulaires; les cellules neurales sont associées à un certain nombre de densités synaptiques (Bennani, 2011). 80

Figure 2-17 - Représentation anatomique de l'œil et histologique de la rétine. 81

Figure 2-18 - Modèle ORM de l'analyse organique de l'interaction homme-machine de perception instancié et adapté à notre cas d'étude au regard des résultats présentés dans la partie 2.2 de ce chapitre. 81

Figure 2-19 - Interaction fonctionnelle entre la source CT_i et le puits CP_j qui transporte DTP_{ij} (le produit de l'interaction ψ_{ij}) à travers une discontinuité de structure. 83

Figure 3-1 - Interaction fonctionnelle entre le Verrou_{source} et la Fovéa_{puits} 85

Figure 3-2 - Modèle de référence pour les exigences et les spécifications (Gunter et al, 2000) – niveau 1 88

Figure 3-3 - Modèle de référence pour les exigences et les spécifications (Gunter et al, 2000) – niveau 2.....	89
Figure 3-4 - Modèle d'analyse des exigences d'un système sociotechnique (Hall et al., 2005) et l'ordre du processus de spécification (Brier, 2005)	90
Figure 3-5 - Adaptation du Modèle de Référence d'un Système Sociotechnique de (Hall & Rapanotti, 2005) ; les intersections des trois ensembles représentent le système homme-machine à faire.....	91
Figure 3-6 - Modèle NIAM/ORM de notre vision de la Spécification, vu comme un objet émergent d'un processus transformationnel et reliant une partie optative avec une partie indicative.	94
Figure 3-7 - Processus collaboratif récursif et itératif de spécification - Un phénomène opérationnel apparu dans l'ES du domaine opérationnel n'est visible par un ES du domaine de l'ingénierie système qu'à partir du moment où la non atteinte des objectifs fixés par l'ES opérationnel est avéré (il devient alors un phénomène de l'EP du même domaine) et que ce dernier n'est pas les connaissances pour identifier les éléments d'une solution, ce qui l'amène à décrire son problème à l'ES du domaine solution identifié. [adapté de (Bouffaron, 2012)]	95
Figure 3-8 - Scénario plausible de co-spécification à revisiter	96
Figure 3-9 – Diagramme SysML des exigences associées à la Spécification système centrée Opérabilité (première itération).....	98
Figure 3-10 – Diagramme SysML des Exigences Système Physiologique K_{LL1} quant au flux de photons réfléchi.....	100
Figure 3-11 – Diagramme SysML des Exigences Système centrée Machine M_{LL2} quant à la densité lumineuse devant être émise par le latch.....	101
Figure 3-12 - Diagramme paramétrique SysML lié à l'exigence K_{LL1} et développements présentés en Annexe 3.....	102
Figure 3-13 - Résultat de simulation - la longueur d'onde λ pour la couleur orange étant comprise entre 585 et 620 nm, et l'efficacité lumineuse dépendant de λ , il en résulte un nombre minimum requis de photons par seconde.....	103
Figure 3-14 - Exigence K_{LL3} spécifiant la condition d'Alignement du verrou sur l'axe visuel	105
Figure 3-15 - Relations d'interopération avec deux domaines Facteurs Humains	106
Figure 3-16 - Le domaine de l'architecte du système humain (ASH) comme pilote des domaines spécialistes humains relativement aux problèmes systèmes formulés.....	107
Figure 3-17 - Relations d'interopération système humain et système technique pour la co-spécification	107
Figure 3-18 -Proposition d'une organisation d'Ingénierie d'un Système _{Homme-Machine} support de maintenance au travers du processus de spécification système [adaptée de (Bouffaron, 2012)].....	108
Figure 3-21 - Proposition d'un modèle d'organisation	110

Figure 0-7 - Echelle d'évaluation de la maturité technologique adaptée de (Mankins, 1995) – nous adaptons cette échelle pour évaluer la maturité de notre proposition sous trois catégories : Formalisation et Preuve de Concept (TRL1-2-3), Applicabilité Industrielle (TRL4-5-6) et Applicabilité à grande échelle (TRL7-8-9)	115
Figure 0-8 - Bus de co-simulation entre les différents domaines d'ingénierie concernés par la spécification d'un système constitué par deux types de composants : humain et technique	117
Figure 4-1 - Vision synthétique de la boucle d'ingénierie (AFIS, 2009).....	126
Figure 4-2 - Modélisation systémique traditionnelle (AFIS, 2009).....	127
Figure 4-3 - Les différents diagrammes SysML (OMG, 2008).....	128
Figure 4-4 - Image du verrou sur le réseau des champs rétinien composé d'une répartition des différents cônes.....	130
Figure 4-5 - Efficacité lumineuse relative	131
Figure 4-6 - Coefficients d'absorption pour différents matériaux et différentes couleurs (http://www.energies-renouvelables.org/)	134
Figure 4-7 - Alignement de l'image du verrou sur la rétine	135
Figure 4-8 - Un modèle simplifié de l'œil (Herman 2007)	135
Figure 4-9 - Modèle de Listing.....	136
Figure 4-10 - Cône de vision pour former une image du verrou sur la fovéa.....	136
Figure 4-11 - Prise en compte de la nature binoculaire de la perception visuelle chez l'humain et de sa « géométrie » anthropométrique.....	137
Figure 4-12 - Les différents degrés de liberté du corps humain et de l'œil en opération de contrôle du bon verrouillage du verrou.....	137
Figure 4-13 - Visibilité du Verrou selon l'axe visuel	138
Figure 4-14 - Matrice de Transformation Verrou et Opérateur selon l'axe visuel.....	138
Figure 4-15 - Diagramme SysML des exigences système ITH _{LL} satisfaisant les exigences opérationnelles	140
Figure 4-16 - Interactions fonctionnelles visuelle et tactile dans le cadre du contrôle de l'état Fermé et Verrouillé des capots moteurs	141
Figure 4-17 - Système de fermeture et verrouillage d'une porte	142
Figure 4-18 : Invariant logique de Fermeture et Verrouillage	142
Figure 5-1- Illustration de la vision de l'ingénierie système basée sur les modèles par (Friedenthal et al., 2009).....	144

Figure 5-2 - Grille d'analyse des systèmes complexes de la méthode SAGACE (Pénalva, 1997) 145

Figure 5-3 - Les sous-processus de la définition des exigences et leurs interactions (AFIS, 2009) 147

Bibliographie

- AFIS. (2009). Découvrir et Comprendre l'Ingénierie Système (éd. 3). Association Française d'Ingénierie Système.
- AFIS. (2012). Livre blanc: « Ingénierie Système: la vision AFIS pour les années 2020-2025 ». Editions Cépaduès.
- Airbus Policy 2574, Human Factors in Maintenance Centered Design.
- Airbus. (2006). Maintenance Briefing Notes, MAINT-HUM_PER_SEQ 02 – REV 01.
http://www.airbus.com/fileadmin/media_gallery/files/safety_library_items/AirbusSafetyLib_-MAINT-HUM_PER-SEQ02.pdf
- Airbus. (2008). A350 XWB Requirement Management Plan, version 2.0, réf: V00PL0602037.
- Alboussière, B. (2011). Prise en compte du comportement de l'Humain dans le prototypage d'un mannequin numérique. Rapport de projet Master Ingénierie de Systèmes Complexes, Université Henri Poincaré, Nancy.
- ARP4754. (2010). Certification Considerations for Highly-Integrated Or Complex Aircraft Systems. SAE International.
- Bennani, O. (2011). Etude mathématique d'un système complexe biologique de l'hippocampe in vivo à l'hippocampe in silico. Thèse de doctorat, Ecole Pratique des Hautes Etudes, Paris.
- Berthoz, A. (1997). Le sens du mouvement. Paris, Odile Jacob.
- Berthoz, A. (2006). Phénoménologie et physiologie de l'action, Paris, Odile Jacob.
- Berthoz, A. (2009). La simplicité. Paris, Odile Jacob.
- Berthoz A. (2012). Bases neurales de la décision. Une approche de neurosciences cognitives, Annales Médico-psychologiques, 170(2), 115-119, Elsevier Masson.

- Blaise, J-C. (2000). Blaise J.C., Apport d'une modélisation de l'information normative à l'intégration des règles de sécurité des machines en conception. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy.
- Boeing (1994). Maintenance error decision aid. Seattle, WA : Boeing.
- Boisacq-schepens, N., Crommelinck, M. (1994). Neuro-psycho-physiologie. Paris, Masson.
- Booher, H.R. (2003). Handbook of Human Systems Integration. Wiley, Hoboken.
- Bouffaron F., Gouyon D., Dobre D., Morel G. (2012). Revisiting the interoperation relationships between Systems Engineering collaborative processes, IFAC-INCOM 2012, Roumanie.
- Boy, G. (2011). The handbook of human-machine interaction: a human-centered design approach. Ashgate Publishing Limited.
- Boy, G. (2013). Keynote on *Human-System Integration: Unifying Systems Engineering and Human-Centered Design*, 12th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems, Las Vegas, August 2013.
- Brier, J. (2005). Capturing Change in Socio-technical System with Problem Frames. Technical report n°2005/01. Department of Computing, The Open University, London.
- Cameron, B. (2002). La maintenance des appareils. Encyclopédie de sécurité et de santé au travail, vol. 3, Genève: Bureau International du travail.
- Chapouthier, G. (2006). Biologie de la mémoire, Editions Odile Jacob.
- Charron, S., Koechlin, E. (2010). Divided representation of concurrent goals in the human frontal lobes, *Science*, vol. 328, no. 5976, pp. 360-363.
- Chauvet, G. (1993). Hierarchical functional organization of formal biological systems: A dynamical approach. *Philosophical Transaction in Biological Sciences*, pp. 425-481.
- Chauvet, G. (1995). La vie dans la matière: Le rôle de l'espace en biologie. Flammarion, Paris.
- Chauvet G. (2002) On the mathematical integration of the nervous tissue based on the S-propagator formalism.I.Theory, *Journal of Integrative Neuroscience*, 1(1), 31-68.

- Chauvet P., Dupont J.M., Chauvet G. (2006) On the integration of physiological mechanisms in the nervous tissue using the MTIP: synaptic plasticity depending on neurons-astrocytes-capillaries interactions, *Journal of Integrative Neuroscience* 5(3), 443-82.
- Chemero, A. (2003). An outline of a theory of affordances. *Ecological Psychology*, 15 (2), 181-195.
- Clancey, W. (1997). *Situated Cognition: on Human Knowledge and Computer Representations*. Cambridge University Press.
- Dartt D. A., Besharse J., Dana R. (2010) (Sous la direction de), *Encyclopedia of the Eye*, Academic Press Inc.
- Devic, C., Morilhat, P. (2013). CONNEXION CONtrôle Commande Nucléaire Numérique pour l'EXport et la rénovatiON: Coupler génie logiciel et ingénierie système: source d'innovations. *Génie logiciel* (104), 2-11.
- Dhillon, B.S. (2006). Human error in maintenance : a review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 12, No. 1, pp. 21-36.
- Dobre, D. (2010). Contribution à la modélisation d'un système interactif d'aide à la conduite d'un procédé industriel. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy.
- Dupont, J-M., Lieber, R., Morel, G., Bouffaron, F., Mery, D. (2012). Rapport complémentaire confidentiel de Convention Industrielle de Formation par la Recherche n° 393/2008 (partie 1).
- EASA (ex-Joint Aviation Authorities). (s.d.). JAR 25.1309, System design and analysis.
- EASA (2003). *Règlement (CE) No 2042/2003*. Document accessible sur <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2003R2042:20060510:FR:PDF>
- EIA-632. (1999). GEIA Standard processes for engineering a System.
- Fanmuy, G. (2012). *Guide Bonnes Pratiques en Ingénierie des Exigences*, Collectif AFIS, Editions Cépaduès.

- Fass, D. (2002). Base de connaissances multimodales et esthétique de la connaissance, aide à l'action et réalité virtuelle : théorie et expériences. Neurosciences et comportements. Nancy, Université Henri Poincaré. PhD. (2002).
- Fass, D. (2006). Rationale for a model of human systems integration: The need of a theoretical framework. *Journal of Integrative Neurosciences*, Vol. 5, No. 3, pp 333-354.
- Fass, D., Lieber, R. (2009). Rationale for a Human Modeling in human in the loop systems design. Proceedings of the 3rd Annual IEEE Systems Conference, Vancouver, Canada.
- Fodor, J. (1981). Fodor, J. A., & Pylyshyn, Z. (1981). How direct is visual perception? Some reflexions on Gibson's "Ecological Approach". *Cognition*, 9, 139-196.
- Friedenthal, S., Griego, R., Sampson, M. (2009). Presentation at INCOSE Model-Based Systems Engineering (MBSE) Workshop. February 1-3, 2009.
- Galara, D. (2011) Vers un langage de représentation des schémas mentaux des exploitants de systèmes de production complexes et à risques, *Génie Logiciel*, 96, 11-22.
- Gibson, J. J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Boston, MA: Houghton Mifflin Co.
- Gibson, J. J. (1977). *The Theory of Affordances. Perceiving, Acting and Knowing*. R. Shaw and J. Bransford. Hillsdale New Jersey, Lawrence Erlbaum Associates: 67-82.
- Gibson, J. J. (1979/1986). *The ecological approach to perception*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Gouyon, D., Bouffaron, F., Morel, G. (2013). Specifying some key SE training artifacts. Proceedings of CSDM'13, Paris, France.
- Gunter, C. A., Gunter, E. L., Jackson, M., & Zave, P. (2000). *A Reference Model for Requirements and Specifications*. *IEEE Software*, 17 (3), 37-43.
- Habrias, H. (1988). *Le modèle relationnel binaire. Méthode I.A. (NIAM)*, Editions Eyrolles.

- Hall, J. G., Rapanotti, L. (2005). *Problem Frames for Socio-Technical Systems*. Dans A. Silva, & J. L. Maté (Éds.), *Requirements Engineering for Socio-Technical Systems* (pp. 318-339). Idea Publishing Group.
- Halpin, T. (1989). *A logical analysis of information system*. Thèse de doctorat, University of Queensland, Brisbane.
- Herman, I. P. (2007). *Physics of the Human Body: A Physical View of Physiology*. Springer.
- Hollnagel, E., Woods, D.D., & Leveson, N. (2006). *Resilience engineering. Concepts and precepts*. Hampshire, England : Ashgate.
- Hutchins, E. (1995). *Cognition in the wild*. MIT Press, Cambridge, MA.
- INCOSE. (2007). *Systems Engineering Vision 2020, v2.03*. International Council of Systems Engineering.
- INCOSE. (2008). *Integrating the Human in Every System*. Journal INSIGHT, International Council of Systems Engineering.
- ISO/IEC 15288 (2008) : « *Systems and software engineering - System life cycle processes* ».
- Jackson, M. (2001). *Problem Frames: Analysing & Structuring Software Development Problems*, ISBN020159627X.
- Jackson, M. (1997). "The meaning of requirements," *Annals of Software Engineering*, vol. 3, pp. 5–21, January 1997.
- Jenkins, H.S. (2008). Gibson's "Affordances": Evolution of a Pivotal Concept, *Journal of Scientific Psychology*, pp. 34-45.
- Jimenez, M. (1997). *La psychologie de la perception*. Flammarion, Collection *Dominos*.
- Koffka, K. (1935). *Principles of gestalt psychology*. New York: Harcourt Brace.
- Kuras, M.L. (2006). "A Multi-Scale Definition of a System." M. T. Report, ed. (Bedford, MA: The MITRE Corp.), Report MTR 06B0000060, August, www.mitre.org.

- Lahlou, S. (2008). L'installation du monde. de la représentation à l'activité en situation ; Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Provence.
- Le Gallou, F., Bouchon-Meunier, B. (1992). Systémique – Théorie et Application. Technique & Documentation, Edition Lavoisier.
- Le Moigne, J-L. (1977). La théorie du système général : théorie de la modélisation. Paris, Presses Universitaires de France.
- Lewin, K. (1935). A dynamic theory of personality: Selected papers. New York: McGraw-Hill.
- Lieber, R., Fass, D. (2011). Human Systems Integration design: which generalized rationale? Proceedings of the 14th International Conference on Human-Computer Interaction, Orlando, USA. Lecture Notes in Computer Science, vol.6776, Springer.
- Lieber, R., Dupont, J-M., Bouffaron, F., Morel, G. (2013). Improving physical-physiological interaction requirements for maintenance enabling systems specification. Proceedings of the 12th IFAC Human-Machine System Conference, August 7-11, Las Vegas, USA.
- Luyat, M., Corte, T. (2009). Le concept d'affordance : de James Jerome Gibson aux formalisations récentes du concept. L'Année Psychologique, 109, 297-332.
- Mankins, J. (1995). Technology readiness levels. NASA, available at : <http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/trl/trl.pdf>
- Massion, J. (1997). Cerveau et motricité. Paris, Presses Universitaires de France.
- Mayer, F. (1995). Contribution to manufacturing engineering: Application to pedagogical engineering within a CIME centre. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy.
- Mayer, F., Lavigne, J.P., Lhoste, P. (2003). Category theory based approach for IMS modeling, 7th IFAC-IMS Workshop, Budapest, Hongrie.
- Menard, O. (2006). Mécanismes d'inspiration corticale pour l'apprentissage et la représentation d'asservissements sensori-moteurs en robotique. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy.

- Mery, D., Fass, D., Dupont, J.-M., Lieber, R., Morel, G., Bouffaron, F., (2012). Rapport complémentaire confidentiel de Convention Industrielle de Formation par la Recherche n° 393/2008 (partie 2).
- Millot, P., Debernard, S., Vanderhaegen, F. (2011). Authority and cooperation between humans and machines, in *The handbook of human-machine interaction: a human-centered design approach*, pp. 207-234. Ashgate Publishing Limited.
- Millot, P., Boy, G. (2012). Human-Machine Cooperation: A solution for Life-Critical Systems?. IEA WC 2012 International Ergonomics Association World Conference, Recife, Brazil.
- Nasa. (2010). *Human Integration Design Handbook*. NASA/SP-2010-3407.
- Nicolet, J.-L. (1989). *La fiabilité humaine dans l'entreprise*. Masson.
- Nielsen, J. (1994a). Enhancing the explanatory power of usability heuristics. *Proc. ACM CHI'94 Conf.* (Boston, MA, April 24-28), 152-158.
- Nielsen, J. (1994b). Heuristic evaluation. In Nielsen, J., and Mack, R.L. (Eds.), *Usability Inspection Methods*, John Wiley & Sons, New York, NY.
- Norman, D. (1988). *The Design of Everyday Things*. Basic Books, New York.
- Norman, D. (2004). Affordance, Conventions and Design (Part 2). Note in Don Norman's *jnd.org website / human-centered design*.
- Ortman, J. (2010). Affordances as Qualities. *Proceedings of the 6th Conference on Formal Ontology and Information Systems*, Toronto, Canada.
- Paillard, J. (1983). The functional labeling of neural codes, in: *Neural coding of motor performance*. *Experimental Brain research*, Springer Verlag, Berlin, suppl. 7, pp1-19.
- Pénalva, J.-M. (1997). *La modélisation par les systèmes en situations complexes*. Thèse de doctorat, UFR Scientifique, Université Paris-Sud Orsay.
- Pharr M., Humphreys G. (2010). *Physically based rendering from theory to implementation*, Morgan Kaufmann 2nd edition

- Potier, D. (2010). Briques Génériques du Logiciel Embarqué. Rapport de mission ministérielle française.
- Purves D., Augustine G-J., Fitzpatrick D. et Katz L. (2011). Neurosciences, De Boeck 4e édition.
- Pyster, A., D. Olwell, N. Hutchison, S. Enck, J. Anthony, D. Henry, and A. Squires. (2012). Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK) version 1.0.1. Hoboken, NJ: The Trustees of the Stevens Institute of Technology ©2012. Available at: <http://www.sebokwiki.org>.
- Rapport BST : AVIATION-2000-A0000199, Bureau de la Sécurité des Transports du Canada. <http://www.tsb.gc.ca/fra/rapports-reports/aviation/2000/a00o0199/a00o0199.pdf>
- Rasmussen, J. (1986). Information Processing and Human-Machine Interaction: An Approach to Cognitive Engineering, Elsevier Science, New York.
- Reason, J., Hobbs, A. (2006). Managing maintenance error: a practical guide. Aldershot : Ashgate.
- Riera, B., Philippot, A., Annebicque, D., Gellot, F. (2012). Safe control synthesis based on Boolean constraints for manufacturing systems. 8th Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SAFEPROCESS 2012), Mexico.
- Rolls E. (2007) Memory, Attention, and Decision-Making - A Unifying Computational Neuroscience Approach, Oxford University Press.
- Ruault, J-R. (2011). Résilience des Systèmes Sociotechniques – Application à l'Ingénierie Système. Génie Logiciel, 96, pp.40-52.
- Sahin, E., Çakmak, M., Dogar, M-R., Ugur, E., Üçoluk, G. (2007). To Afford or Not to Afford: A New Formalization of Affordances Toward Affordance-Based Robot Control. Adaptive Behavior December, vol. 15, n°4, 447-472.
- Saussure, Ferdinand de. (éd. posthume, 1915). Cours de linguistique générale, Paris.
- Schmidt, R.A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. Psychological Review, vol.82: 225-260.

- Staal, M.A. (2004). Stress, Cognition and Human Performance: A literature review and conceptual framework. NASA/TM -2004-212824.
- Suchman, L. (1987). Plans and situated actions: The problem of Human-Machine Communication. Cambridge University Press.
- SysML. (2008). Systems Modeling Language. Object Management Group, Version 1.1.
- Verries J. (2010). Approche pour la conception de systèmes aéronautiques innovants en vue d'optimiser l'architecture : Application aux systèmes portes passagers. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse.
- Vogel, C. (1988). Génie cognitif. Masson.
- Watson, A., Yellott, J. (2012). A unified formula for light-adapted pupil size. Journal of Vision, vol.12, n°10.
- Wippler, J-L., Luzeaux, D., Ruault, J-R. (2011). Maîtrise de l'ingénierie des systèmes complexes et des systèmes de systèmes. Hermes Science. Lavoisier, Paris.

Bibliographie

Résumé: Le cadre prescrit de l'ingénierie système, avant tout centré sur les systèmes techniques, doit évoluer pour permettre de prendre en compte dès la phase de spécification système les interactions critiques des systèmes homme-machine tels que le système de maintenance aéronautique. L'objectif est d'assurer que le comportement de ce type de système, dépendant des synergies entre les différentes interactions qui prennent place entre les constituants techniques et humains, soit maintenu dans un domaine de performances acceptables. La démarche d'intégration des facteurs humains en Ingénierie Système consiste alors à s'intéresser à la performance globale des diverses interfaces des systèmes homme-machine. Ces interfaces sont le siège d'interactions émergentes complexes, dont certaines sont recherchées pour faciliter la performance globale visée et la résilience face à un environnement perturbateur non anticipé, et d'autres construites pour finaliser le système en regard de sa mission.

Le paradigme exploré par nos travaux se fonde sur la possibilité de faire inter-opérer des modèles de processus physiologiques avec des modèles de processus techniques en spécification d'interaction homme-machine, en combinant un cadre de Modélisation Système avec celui Mathématique et Computationnel de la Physiologie Intégrative. Notre travail se focalise sur la spécification d'exigences physico-physiologiques d'une interaction de perception visuelle, modélisées avec SysML, pour que l'opérateur humain perçoive bien les propriétés symboliques 'affordées' par les objets techniques qu'il doit maintenir dans des contextes opérationnels variables. Les résultats de ces travaux de spécification nous amène à proposer une nouvelle organisation d'une ingénierie système support de maintenance basée sur les modèles.

Mots-clés : Ingénierie de Système Support de Maintenance Basée sur des Modèles, Interaction Homme-Machine, Exigences Physico-Physiologiques, SysML

Abstract: Current Systems Engineering framework must evolve in order to take into account the critical interactions of human-machine systems since the specification phase. The objective is to ensure that the behavior of such systems is kept within an accepted domain of performances whatever is the context of use. Those performances depend on the synergies of the different interactions that take place between technical and human systems when operating a common object. Human Factors Integration in Systems Engineering also known as Human Systems Integration implies to start working on the overall performance of all the interfaces of a human-machine system. These different interfaces exhibit emerging complex interactions. Some of them are inquired to ease the whole system performances and facilitate system resilience capabilities within disruptive unanticipated environment. Other ones are designed to finalize the system mission according to the purpose of its context of use.

The paradigm we have explored in our work is based on the hypothesis of possible inter-operations between physiological and technical processes for human-machine interaction specification by coupling a System Modeling Framework with the Mathematical Theory of Integrative Physiology one. Our work focuses on the physical and physiological requirements specification (modeled with SysML) of a visual perceptive interaction for human to perceive right the meaning of symbolic properties technical objects afford when they are being maintained in variable contextualized situations. Our specification work results lead us to propose a Model-Based Support Systems Engineering organization.

Keywords : Model-Based Support Systems Engineering, Human-Machine Interaction, Physical-Physiological Requirements, SysML