

L'homme augmenté : Épistémologie et bio-ingénierie de l'humain machine

Didier Fass

▶ **To cite this version:**

Didier Fass. L'homme augmenté : Épistémologie et bio-ingénierie de l'humain machine. Life Sciences [q-bio]. Université de Lorraine, 2016. tel-03113895

HAL Id: tel-03113895
https://inria.hal.science/tel-03113895

Submitted on 19 Jan 2021

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.

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

École doctorale BioSE (Biologie Santé Environnement)

L'homme augmenté

Épistémologie et bio-ingénierie de l'humain machine

MÉMOIRE

Présenté le 25 octobre 2016 pour la candidature au diplôme

D'HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

par

Didier FASS

Composition du jury

Rapporteurs :	Georges Chapouthier, CNRS Université Pierre et Marie Curie Paris Laurent Chaudron, ONERA Salon de Provence Bernard Claverie, École nationale supérieure de cognitique Bordeaux
Examinateurs :	Luc Soler, IRCAD - IHU Université de Strasbourg Jean-Paul Haton, LORIA Université de Lorraine Bruno Lévy, Faculté de médecine, Université de Lorraine Dominique Méry, Télécom LORIA Université de Lorraine
Invité :	Didier Bazalgette, MRIS Direction générale de l'armement

Laboratoire Lorrain de Recherche en Informatique et ses Applications — UMR 7503

Loria
Laboratoire lorrain de recherche en informatique et ses applications

Mis en page avec la classe thloria.

À Elvire, Léonard et Bartholomé qui enchantent mes jours et mes nuits.
À mes parents, in memoriam
À Gilbert Chauvet, in memoriam
À Jean-Christophe Massinon, in memoriam
À mes amis, ils se reconnaîtront. Les autres qu'ils n'y pensent pas même un instant !
À la vie !

« Finisce sempre cosi. Con la morte.
Prima pero c'è stata la vita, nascosta sotto il bla bla bla bla bla..
E tutto sedimentato sotto il chiacchiericcio e il rumore.
Il silenzio e il sentimento. L'emozione e la paura.
Gli sparuti incostanti sprazzi di bellezza, e poi lo squallore disgraziato e l'uomo miserabile.
Tutto sepolto dalla coperta dell'imbarazzo dello stare al mondo. Bla bla bla bla..
Altrove c'è l'altrove. Io non mi occupo dell'altrove.
Dunque, che questo romanzo abbia inizio.
In fondo, è solo un trucco. Si, è solo un trucco. »

« Cela finit toujours comme cela. Avec la mort.
Mais avant il y a eu la vie, cachée sous le bla bla bla bla bla...
Le tout recouvert par les bavardages et le bruit
Le silence et le sentiment. L'émotion et la peur.
Les petits éclairs inconstants de la beauté, et puis cette pauvre bassesse et l'homme misérable.
Le tout enterré sous le couvercle de l'embarras d'être au monde. Bla bla bla bla bla...
Ailleurs il y a l'ailleurs. Je ne m'occupe pas de l'ailleurs.
Par conséquent, que ce roman commence.
Au fond ce n'est qu'un artifice.
Oui, ce n'est qu'un artifice. »

Jep Gambardella - La grande Bellezza, film de Paulo Sorrentino 2013

Remerciements

Ce projet de recherche *hyperdisciplinaire* a mûri et s'est développé au sein du Laboratoire lorrain de recherche en informatique et ses applications - LORIA de l'Université de Lorraine, dans l'esprit "art, science, technologie et management" de l'Alliance Artem Nancy. Incubé de 1996 à 1998 dans l'équipe Reconnaissance de forme et intelligence artificielle (RFIA) dirigée par le Pr Jean-Paul Haton, puis de 1998 à 2005 dans l'équipe d'informatique neuromimétique - CORTEX, dirigée par Frédéric Alexandre, directeur de recherche INRIA, et depuis 2007 dans l'équipe Méthodes formelles, outils pour vérification et validation de systèmes - MOSEL, sous la direction du Pr Dominique Méry ; il est l'enfant légitime et naturel des sciences de la vie et de la santé et des sciences de l'artifice.

À Georges Chapouthier, Directeur de recherche émérite CNRS à l'Université Pierre et Marie Curie, biologiste et philosophe, votre intérêt pour mes recherches, la qualité de vos réflexions et de vos encouragements patients depuis dix ans sont pour moi une source de motivation et d'inspiration. Il fallait bien le spécialiste que vous êtes de la complexité des organismes vivants pour comprendre un *humain mosaïque* travaillant sur *l'humain augmenté*.

À Laurent Chaudron, Maître de recherche à l'ONERA, Directeur du centre de recherche ONERA Provence, vous êtes de ces grands ingénieurs pour qui l'humain n'est pas qu'un facteur X. Votre précision de sabre (kendo) n'a d'égale que votre attention aux autres, qui leur permet d'affirmer leur force de caractère et leur détermination.

À Bernard Claverie, Professeur, Directeur de l'École nationale supérieure de cognitique - Bordeaux -INP, vous êtes de ces personnes sur qui l'on peut compter. De la physiologie expérimentale à l'homme augmenté, votre parcours et vos publications sont pour moi un exemple. De nos rencontres à Toulouse, dans le cadre du CNRT Aéronautique et Espaces, et de nos discussions au début des années 2000 est né ce thème de recherche.

À Luc Soler, Professeur à la Faculté de médecine, Université de Strasbourg, Directeur scientifique de l'IHU Strasbourg - Institut de chirurgie guidée par l'image, dont les recherches et les développements à l'aide aux gestes chirurgicaux et son automatisation nous inspirent. Votre parcours pluridisciplinaire fait mon admiration. Il est une source de progrès techniques pour la médecine et de progrès thérapeutiques pour les patients.

À Michel Denis, Directeur de recherche émérite CNRS au LIMSI, vous nous avez initié à la cognition spatiale, et au lien subtil entre image et cognition. Votre direction de DEA au LIMSI, avec Daniel Teil et Yacine Bellick, a été déterminante dans l'évolution de ma pensée scientifique et de mon engagement dans le territoire de la recherche où l'imaginaire de nos cartes mentales nous orientent en *terra incognita*.

À Jean-Paul Haton, Professeur émérite de l'Université de Lorraine, vous êtes un des pères de l'intelligence artificielle en France ; il y a plus de vingt années, lors d'une de nos premières rencontres, au vu de ma thèse de doctorat en chirurgie dentaire, vous m'aviez proposé de m'aider le jour où je souhaiterais faire une thèse d'université. Cette HDR est le fruit plus lointain de votre attention et de votre engagement à mon égard. Mon vouvoiement marque mon profond respect et mon affection pour vous, arriverai-je à vous tutoyer une fois ce diplôme soutenu ?

À Didier Bazalgette, Responsable du domaine scientifique homme et systèmes à la Direction générale de l'armement, vous êtes de ces humains intègres, discrets et engagés, dont l'expertise du domaine homme et systèmes se nourrit d'humanités et d'art. Votre curiosité gourmande et votre ouverture sont une richesse pour les chercheurs que vous accompagnez.

À Dominique Méry, Professeur à Telecom Nancy de Université de Lorraine pour son engagement scientifique et sa profonde humanité. Son expertise scientifique dans les méthodes formelles

et l'ingénierie système, associées à la volonté de les appliquer aux dispositifs médicaux et à l'aide à l'activité médicale, font l'objet d'échanges aussi passionnés que riches de développements actuels et à venir.

Au Professeur Bruno Lévy, de la faculté de médecine de l'Université de Lorraine, l'ami essentiel avec qui je partage histoire et valeurs. Vous êtes ce grand médecin qui lutte pour la vie des autres et déteste la mort. L'humain-machine est votre quotidien. Votre intérêt pour nos recherches appliquées à la réanimation médicale et votre soutien parfois rude et viril dans les moments d'exaspération ou de doute m'ont permis de mener à son terme ce projet d'HDR.

À Sylvie Banoun, dont l'amitié fait rimer *mon cher confrère* avec *HDR*. Sans vos aiguillons et vos corrections ce mémoire ne serait pas le même.

Table des matières

Partie I ***Qui aurait l'idée de séparer le poisson rouge de son eau et de son bocal ?*** **1**

Chapitre 1
Introduction

Bibliographie 5

Chapitre 2
Mise en perspective professionnelle et scientifique

2.1 Retour vers le futur 7
2.2 Plaisir de la science, naissance des idées 14
2.2.1 De l'art dentaire à l'aide au diagnostic 14
2.2.2 De l'aide à la décison à l'aide à l'action 16
2.3 Un projet de thèse : la validation des idées 20
2.4 Un projet de recherche interdisciplinaire dans la convergence art, sciences, ingénierie et organisation 26
2.5 Vers l'infini et au delà. 34
Bibliographie 38

Chapitre 3
Mise en perspective historique et épistémologique

3.1 Des mythes et du super-héros 46
3.2 De l'eugénisme et du transhumanisme 48
3.3 Des postulats 50
3.4 De l'idéal à la réalité 52
3.5 De l'homme augmenté 54
Bibliographie 55

Partie II Le projet de recherche : *l'homme augmenté* 59

Chapitre 1
Pertinence du projet et contexte stratégique

1.1 Contexte et enjeux économiques et sociétaux 67
1.2 Retombées 70
1.2.1 Le domaine médical 71
1.2.2 Le domaine de la défense 73
1.2.3 Le domaine aérospatial 74

Chapitre 2
Positionnement et objectifs du projet

2.1 Contexte scientifique et technique 82
2.2 L'intégration humain système 83
2.3 Épistémologie et modélisation des systèmes humain machine 84
2.4 Conception sûre des systèmes humain dans-la-boucle ou Bio-CPS 85
2.5 Modélisation intégrative physiologique et physiopathologique au service de l'automatisation de pratiques avancées en santé 87
2.6 La modélisation et la certification des systèmes humain machine critiques . . 87

Chapitre 3
Objectifs

3.1 Rechercher, développer et transférer 92
3.1.1 Objets de recherche 92
3.1.2 Contenus de développement 92
3.1.3 Application et transfert envisagés 93
3.2 Synthèse : l'homme augmenté 93

Chapitre 4
Programme scientifique et technique, organisation du projet

4.1 Organisation scientifique et technique 96
4.1.1 Les cinq étapes de notre méthode de recherche 96
4.1.2 Articulation et cohérence de la méthode pluridisciplinaire : de la modélisation à la certification 97
4.2 Les axes principaux du projet 100
4.2.1 Axe 1 - Épistémologie et théorie de l'homme augmenté 100

4.2.2 Axe 2 - Étude de cas et maïeutique de l'expertise appliquées aux domaines du projet . . . 101
4.2.3 Axe 3 - Méthode et outils de la modélisation intégrative . . . 101
4.2.4 Axe 4 - Plate-forme logicielle et expérimentale d'aide à la conception et de certification des systèmes humain machine sûreté critique . . . 102
4.2.5 Stratégie de valorisation . . . 102
4.3 Personnels et moyens nécessaires . . . 103
Bibliographie . . . 104

Partie III Expérience **109**

Chapitre 1
Curriculum Vitae

1.1 État civil . . . 111
1.2 Prix et distinctions . . . 111
1.3 Parcours académique . . . 111
1.4 Expériences professionnelles . . . 112
1.5 Participation à des organismes scientifiques ou professionnels . . . 112
1.6 Éléments remarquables . . . 113
1.6.1 Thèses encadrées . . . 113
1.6.2 Masters encadrés . . . 113
1.6.3 Participation à des projets de recherches . . . 113
1.6.4 Financement de projets de recherche . . . 113
1.6.5 Tâche d'intérêt collectif . . . 113

Chapitre 2
Expériences d'enseignement

2.1 Enseignement . . . 115
2.1.1 Faculté d'odontologie - Université Henri Poincaré (UHP) Nancy 1 . . . 115
2.1.2 Master Sciences Cognitives et médias numériques, UFR Mathématiques et Informatique - Université de Lorraine . . . 115
2.1.3 ICN Business School - Master Grande École . . . 115
2.1.4 École nationale supérieure des Mines de Nancy . . . 115
2.1.5 École nationale supérieure d'Art de Nancy . . . 115
2.1.6 Faculté de médecine de Nancy . . . 116

2.1.7 Centre national de qualification des assistantes en odonto-stomatologie (CNQAOS) . . . 116
2.2 Encadrement et co-encadrement d'étudiants . . . 116
2.2.1 Thèse d'université . . . 116
2.2.2 Thèse d'exercice . . . 116
2.2.3 Stagiaires de Master . . . 117
2.2.4 Élèves ingénieurs . . . 118
2.2.5 ICN Business School . . . 119

Chapitre 3
Productions

3.1 Publications . . . 121
3.1.1 Thèses et mémoire de DEA . . . 121
3.1.2 Revues internationales à comité de lecture . . . 122
3.1.3 Revues nationales à comité de lecture . . . 122
3.1.4 Papiers de conférences internationales publiés dans Lecture Notes (Springer) et IEEE . . . 122
3.1.5 Conférences internationales à comité de lecture . . . 123
3.1.6 Conférences nationales à comité de lecture . . . 124
3.1.7 Chapitres d'ouvrages . . . 124
3.1.8 Publications à visée didactique . . . 124
3.1.9 Conférences invitées . . . 125
3.1.10 Publication dans workshops . . . 127
3.1.11 Divers Publications . . . 128
3.1.12 Chairman de session - Conférence internationale . . . 128
3.1.13 Revues d'articles et expertise projet . . . 129
3.1.14 Séminaires invités . . . 129
3.1.15 Organisation de conférences et workshops . . . 131
3.2 Projets scientifiques et industriels . . . 132
3.2.1 Projet de thèse Ministère de la défense - direction générale de l'armement (DGA) . . . 132
3.2.2 Projet de recherche destiné au support d'une thèse - AIRBUS . . . 133
3.2.3 Projet PAUSA « Partage d'autorité dans le système aéronautique » . . . 134
3.2.4 Fibres fonctionnelles pour l'interaction homme-machines - Programme pluri-formation (PPF) Matériaux fibreux . . . 135
3.2.5 Projet E-Bird « Connaissance des flux économiques dans la Grande Région » . . . 135

3.2.6 DRIVESAFE - Development of 3-D Eye tracking device for safer driving and more efficient Web Page production 136
3.2.7 Action spécifique du CNRS « Suppléance perceptive et interface » - RTP 39 Interactions médiatisées et réalité virtuelle, (Resp. J. Droulez) - Dept. STIC/CNRS, axe Interactions humaines et cognition 137
3.2.8 ACI Cognitique 45B, Ministère de la recherche 137
3.2.9 1996-1998 Projet *systèmes d'aide à l'action portables* 138

Annexes **141**

Annexe A Les cinq publications principales **141**

Annexe B
Projet de collaboration LORIA NASA

Table des figures

12

1.1 Intégration humain systèmes : le développement des systèmes humain machine ou des systèmes socio-techniques dans un domaine d'activité donné a pour objet d'assurer dès la conception la cohérence, la fiabilité et la sûreté de l'intégration et du fonctionnement, entre le domaine de l'humain, habituellement dévolu à l'ingénierie du comportement et des facteurs humains, le domaine de la machine, habituellement dévolu aux spécialités de l'ingénierie en particulier de l'ingéniérie système, et d'autre part le domaine de l'organisation, habituellement dévolu aux juristes ou aux gestionnaires. L'enjeu scientifique est de proposer un cadre intégratif général de modélisation et de simulation pour une conception intégrée et correcte par construction. (Schéma produit par l'auteur dans le projet PAUSA en 2006). 68

1.2 Les six niveaux de complexité intégrés d'un système sociotechnique de santé, de transport aéronautique, de production d'énergie et de défense d'après Booher [Booher2003] 75

4.1 Schéma méthodologique du projet 98

4.2 Schéma général d'articulation et de cohérence pluridisciplinaire. 99

Première partie

Qui aurait l'idée de séparer le poisson rouge de son eau et de son bocal ?

1

Introduction

Augmenter *: verbe emprunté (milieu du XIV° siècle) au bas latin augmentare, de augmentum, terme courant remplaçant l'archaïque augmen, du verbe augere «faire croître» et «s'accroître».*

Intégrer *: verbe emprunté au dérivé latin classique integrare «réparer, remettre en état», «renouveler, recommencer» et par figure «recréer, refaire» et «exécuter». D'abord attesté isolément au sens latin d'«exécuter», le verbe réaparaît à la fin du XV^e au sens de «faire participer, associer» ; ces emplois ont disparu. Intégrer est encore repris en mathématiques, lorsqu'apparaît intégral (1700) avec le sens d'effectuer l'intégration de. Le verbe dans l'argot scolaire des grandes écoles, s'emploie par emprunt au langage mathématique (1892, introduction) pour «entrer (dans une grande école)». Á la même époque, en emploi didactique, puis courant (début XX^e), il signifie généralement «faire entrer dans un ensemble», en tant que partie intégrante.*

Integrate *: 1630s, "to render (something) whole," from L. integratus, pp. of integrare "make whole," from integer "whole" (see integer). Meaning "to put together parts or elements and combine them into a whole" is from 1802. [http ://www.etymonline.com]*

Cohérent *: adjectif emprunté (1539) au latin cohaerere «être soudé, attaché ensemble» (au propre et au figuré). Ce verbe est composé de cum «avec», ensemble (→ co-) et haerere «être fixé à, être arrêté» (→ adhérer, hésiter).*

«La science "établie" trône comme une statue immobile ; la recherche, elle, danse, court, vole, va en tous sens.» Philippe Even

Il m'avait toujours été évident que je ne serais pas un dentiste comme les autres. J'avais choisi ce métier très jeune, à 12 ans, déjà attiré par le lien entre connaissances scientifiques, connaissances techniques et connaissances pratiques et intuitives - ce que l'on appelle l'art. Mais de là à en faire un projet de recherche et un mode de penser scientifique, rien ne m'y prédisposait si ce n'est une curiosité gourmande, un esprit critique constructif et une passion jubilatoire pour les sciences naturelles, la technologie et la création humaine sous toutes ces formes. À cette liste à la Prévert s'ajoute le goût de la prise de risque maîtrisée et des rencontres improbables.

Je me souviens d'une nuit extraordinaire de l'été 1969 pendant laquelle mes parents m'avaient réveillé pour regarder la télévision. Nous étions le lundi 21 juillet. À 2h56 UTC, Neil ARM-

STRONG posait la semelle gauche de son scaphandre sur la surface de la lune, suivi quelques instants plus tard par sa semelle droite et son co-équipier Buzz ALDRIN. Ce petit pas pour l'homme marquait une étape importante de l'aventure humaine. Si cette empreinte de pied dans la poussière abrasive de la Lune marquait pour longtemps l'inconscient collectif, le véritable exploit fut le retour sur terre et en vie de ces trois héros contemporains. Au-delà de ses dimensions symboliques, politiques ou poétiques, l'événement marquait un point d'orgue dans la capacité de l'espèce humaine à concevoir des *artefacts* lui permettant d'étendre sa niche écologique et d'augmenter ses capacités de vie et d'activité. Même s'il ne se libérait pas de sa condition, l'humain était capable d'explorer avec l'aventure spatiale de nouvelles limites non seulement de l'univers et mais aussi de sa nature.

Mon premier contact avec le concept scientifique d'*intégration homme systèmes*[1], eut lieu au milieu des années 1980 durant mes études à la Faculté d'odontologie de Nancy, au détour d'un article d'une revue professionnelle[2] consacrée aux implants dentaires et aux travaux du Pr. Brånemark. Depuis 1953, Per-Ingvar Brånemark [Brånemark2007], chirurgien orthopédiste suédois, travaillait sur le concept de prothèse *tissu-intégrée*. Au début des années 1960, pour les besoins de ses études in vivo sur la réponse tissulaire osseuse, médullaire et articulaire, il plaçait des chambres en titane en forme de vis dans la fibula (péroné) de lapins vivants. Il voulait observer la microvascularisation de la moelle et ses relations intimes avec l'os et le cartilage dans la réparation post-traumatique de l'os. Lorsqu'il voulut retirer les chambres en titane après ses observations de miscroscopie in-vivo, cela lui fut impossible. Il venait de mettre en évidence les capacités de *bio-intégration* du titane. L'implantologie était née.

Une seconde rencontre singulière avec *l'intégration humain systèmes* eut lieu en 1997. Depuis un an j'avais cessé mon activité de chirugien-dentiste pour me consacrer à l'activité de l'Antenne MEDES Lorraine[3] et à ma thèse d'université au laboratoire de biologie et physiologie du comportement -UMR CNRS 1293 et au CRIN URA 262[4].

À l'occasion de la soutenance de thèse de Mohammad Ghafouri j'eus l'opportunité d'échanger avec le Pr Gurfinkel. Victor Gurfinkel[5], élève du célèbre neurophysiogiste russe Nicolas Bernstein, avait tenté d'implanter des électrodes dans les muscles fessiers pour commander des prothèses mécaniques de membre inférieur dès 1943. Il était alors jeune médecin militaire opérant sur le front russo-allemand à Stalingrad. Il pratiquait de très nombreuses amputations des membres inférieurs sur de jeunes soldats blessés. Avec son équipe d'infirmiers et de brancardiers, dont certains étaient électriciens et mécaniciens dans le civil, Victor Gurfinkel avait tenté de fabriquer un prototype de prothèse de jambe active et myocommandée en utilisant des pièces récupérées dans les véhicules de combats blindés allemands (panzer). Quelques années plus tard, en 1961,

1. Nous différencions la forme avec tiret *intégration homme-systèmes*, qui fait référence aux concepts réductionnistes issus des techniques informatiques et d'ingénierie cognitive de communications homme-machine et de l'interaction homme-machine, de la forme sans tiret *intégration homme systèmes* qui fait référence à une épistémologie non réductionniste des couplages de deux systèmes de natures différentes : l'humain et les systèmes artificiels. Cette distinction est aussi valide pour *système homme machine* et l'humain machine qu'interroge notre concept d'*homme augmenté*.

2. L'Information Dentaire.

3. Créée en relation avec le Pôle Européen de Santé, l'Université Henri Poincaré, le CNES et l'Institut de Médecine et Physiologie Spatiale (Medes). Ma mission était de développer des projets de recherche et de transfert entre le spatial et l'humain sur terre sur les thèmes de la télémédecine et des *Nouvelles technologies de l'information et de la communication* pour la santé

4. Devenu depuis le Laboratoire lorrain de recherche en informatique et ses application (LORIA) UMR 7503

5. Propos recueillis.

il participa à la mise au point de la combinaison de vol de Yuri Gagarine et devint l'un des plus éminents spécialistes de neurophysiologie gravitationnelle.

Cependant, la rencontre déterminante pour mon évolution scientifique et celle de mon projet de recherche vers *les sciences de l'intégration*, celle qui me permit de faire le lien entre les sciences du vivant [Bernard1984] et les sciences de l'artificiel [Simon1996], a été la lecture du livre de Gilbert Chauvet *La vie dans la matière : le rôle de l'espace en biologie* [Chauvet1995] et son extraordinaire théorie mathématique de la physiologie intégrative (MTIP) dans un premier temps. Dans un second temps, ce fut la rencontre avec Gilbert Chauvet lui-même. Sans son œuvre et les discussions, parfois animées, que j'ai eues avec lui pendant 7 années, jusquà sa mort, je n'aurais pu rapporter la question scientifique de l'interaction humain-machine à un problème d'intégration et de couplage de deux systèmes de natures différentes : un système biologique et anthropologique (l'humain) et un système physique et logique (la machine ou l'artefact).

Ces quelques faits singuliers marquent mon parcours. Ils enchantent mon idéologie et ma recherche des principes théoriques et expérimentaux de l'intégration homme systèmes et de *l'homme augmenté*[6].

Plus d'une dizaine d'années se sont écoulées entre ma thèse d'exercice en odonto-stomatologie et la rédaction de ma thèse d'université en neurosciences. Depuis 1996, ma vie professionnelle a évolué non seulement vers une nouvelle activité, celle de la recherche, mais aussi vers un changement de paradigme théorique et pratique.

Comme prolégomènes à la présentation des concepts centraux de ce mémoire - l'humain machine, l'homme augmenté et de l'intégration homme systèmes, un peu de recul est utile pour mettre en perspective mes parcours professionnel et intellectuel.

Plan du mémoire

Ce mémoire comporte trois parties et une annexe :

— La première partie constitue la mise en perspective de mon parcours professionnel et scientifique de l'art dentaire à la bio-ingénierie de l'humain machine.

— La deuxième partie présente mon projet de recherche : *l'homme augmenté*, son contexte, ses enjeux et ses potentialités de développements et de transferts.

— La troisième partie est consacrée à ce que l'on appelle dans le domaine aérospatial *mon retour d'expérience* : curriculum vitæ et bibliographie.

— L'annexe porte sur mes cinq principales publications.

Bibliographie

[Bernard1984] C. Bernard. *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale.* Champs Flammarion, Paris, 1984.

6. ou de *l'homme étendu* comme Gilbert Chauvet l'écrivait dans son ultime ouvrage [Chauvet2006].

[Brånemark2007] Per-Ingvar Brånemark. Osseointegration and its experimental background. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 2007.

[Chauvet1995] G. Chauvet. *La vie dans la matière : le rôle de l'espace en biologie.* Champs Flammarion, Paris, 1995.

[Chauvet2006] Gilbert Chauvet. *Comprendre l'organisation du vivant et son évolution vers la conscience.* Collection Automates Intelligents, Vuibert, février 2006.

[Simon1996] Herbert A. Simon. *The sciences of the artificial.* The MIT Press, 1996.

2

Mise en perspective professionnelle et scientifique

Sommaire

2.1 Retour vers le futur 7
2.2 Plaisir de la science, naissance des idées 14
2.2.1 De l'art dentaire à l'aide au diagnostic 14
2.2.2 De l'aide à la décison à l'aide à l'action 16
2.3 Un projet de thèse : la validation des idées 20
2.4 Un projet de recherche interdisciplinaire dans la convergence art, sciences, ingénierie et organisation 26
2.5 Vers l'infini et au delà. 34
Bibliographie 38

«Les pieds sur terre, la tête dans les étoiles et les mains dans la glaise.»

La recherche, activité contingente et créative, est devenue progressivement une nécessité.

Pour cette mise en perspective, j'adopte volontairement le style narratif à la première personne pour décrire ce que les neurologues comme Oliver Sacks ou Israel Rosenfield appellent l'historiographie d'un cas. Le but de cette mise en perspective diachronique est d'éclairer l'espace de mon parcours professionnel pluridisciplinaire, ma sérendipité.

Transgressif et opportuniste, j'ai organisé au cours des vingt dernières années un cadre de pensée scientifique et de recherche adapté aux *sciences de l'intégration* dans le but de proposer à terme des méthodes de description et de conception vérifiées et des solutions valides et sûres ; initialement destinées au domaine de la santé, puis à celui de l'aérospatial, la défense et la *forensic*[7].

2.1 Retour vers le futur

«The field of Human Factors and its many descendants – Cognitive Engineering, Human-Computer Interaction, Cognitive Ergonomics, Human-Systems Integration, ... – has made nu-

7. Forensic est le terme anglais qui désigne le champ de l'expertise légale

merous, wonderful advances in the many decades since the enterprise began. But the discipline still serves many to rescue rather than to create. It is time for a change.» Don NORMAN [Norman2010]

Dans quelle mesure la science relève t-elle d'une dynamique discrète dans l'espace et dans le temps de la recherche ? Combien de questions et de problèmes scientifiques ont-ils été posés avec clairvoyance et oubliés au profit d'un paradigme ou d'un dogme dominant ?

Au commencement, mon engagement scientifique était l'enfant naturel d'une activité libérale et contingente, de la curiosité et de l'envie de comprendre, et d'une interrogation clinique et pratique : comment améliorer mes capacités de diagnostic et de traitement [8] ? Au cours des années, cette éthique clinique s'imposait comme une nécessité scientifique théorique et téléologique.

Bien que profondément conditionné par l'esprit cartésien et la décomposition analytique, le besoin de comprendre l'humain dans toutes ses dimensions, sa relativité d'échelle et son évolution - phylogénétique, ontogénétique et épigénétique - conduisait peu à peu à abolir les frontières entre les savoirs disciplinaires à la recherche des éléments et des liens nécessaires à la synthèse des connaissances spécifiques nécessaires au projet scientifique, indépendamment des méthodes et des techniques particulières de chaque domaine.

De cette *hyperversalité* est né le projet.

Afin d'éclairer le lecteur sur ma démarche, il me semble nécessaire d'introduire la mise en perspective de notre contribution professionnelle et scientifique par une présentation préalable de mon cadre de pensée, de ses lignes directrices, de sa dynamique. Dans le dessein d'illustrer mon propos, je présenterai en encadré dans les sections suivantes, en complément de ces prolégomènes, les principaux concepts associés à mon projet.

Certaines disciplines placent cette analyse épistémique *a posteriori* en conséquence du parcours scientifique ou professionnel. Mon expérience des sciences et de l'ingénierie cognitive, m'indique que la compréhension des connaissances et des raisonnements, mais aussi de ses motivations, mis en oeuvre au cours du temps dans la pratique et l'expérience d'autrui est un préalable à l'analyse, la description ou la modélisation de ses connaissances. C'est la raison pour laquelle je propose une synthèse de mon évolution épistémologique en préambule à la description de mon parcours scientifique.

Ainsi guidée par une exigence holistique et pragmatique, ma contribution hyperdisciplinaire s'est enrichie de concepts pluridisciplinaires de la théorie générale des systèmes et de la systémique [Bertalanffy1950, Pouvreau2006, Lemoigne2006], de la théorie de la complexité [Weawer1948, Simon1962, Gleick1999, Morin1981, Stengers2004] et de la cybernétique [Rosenblueth *et al.*1943, Ashby1957, Wiener1965].

Elle s'est enrichie de doutes, de réflexions et de certitudes transitoires dans l'exploration des sciences cognitives, de l'intelligence artificielle et de l'interaction homme-machine [Varela1988, LaRecherche1985, Haton and Haton1989, Licklider1960, Engelbart1962].

Mais il est apparu nécessaire dans le même temps de revenir aux fondamentaux de la psy-

8. Radiologiques, pour le diagnostic des dysfonctionnements crânio-mandibulaires, et médico-chirurgicales, pour les traitements parodontaux et implantaires.

chophysiologie, des neurosciences [Changeux1983, Edelman1992, Edelman2006, Damasio1995, Rosenfield1994, Sacks1996] et plus généralement de l'éthologie humaine [Laborit1986, Cyrulnik1983] [9].

Il était ensuite possible de faire un retour vers les sciences médicales, la biologie de la cognition [Goodwin1978, Boden and Zaw1980], la biologie théorique, la théorie de la physiologie intégrative [Chauvet1995] et la biologie systémique [10] [Bassingthwaighte2000, Joyner2011, Hester *et al.*2011].

Bien que ne comportant pas de barrière entre recherche fondamentale et appliquée, au cours de ce parcours scientifique "péripatéticien", mon attention initiale s'est focalisée sur le point de **l'expertise** [11] et sur son origine, son lien fondamental avec **la nature de la connaissance**. La connaissance entrait ainsi dans mon champ d'intérêt scientifique, de la connaissance de l'*être métaphysique* à la connaissance *fonction cognitive*(logico-symbolique). La conception purement cognitive, mise en œuvre dans ma thèse d'exercice, fut nécessairement et rapidement complétée par une approche éthologique de la cognition - fonction biologique [12] de couplage et d'adaptation à l'environnement (abiotique, biotique, socio-culturel et socio-technique).
Ma conception de l'expertise humaine s'inscrivait dans un champ de causalités réflexives, celui de **la connaissance de la connaissance**.
En la situant dans le cadre naturel du système de la vie, elle tentait d'échapper, peut-être provisoirement, au risque d'une régression à l'infini vers laquelle une approche exclusivement philosophique, technoscientifique ou cognitiviste me conduisait.
De l'expertise à la modélisation cognitive, de la communication homme-machine à l'interaction humain-artefact, de l'aide à la décision à l'aide à l'action, de l'aide au diagnostic à l'aide au geste technique et à la neurophysiologie de l'action, de la conception sûre et l'organisation à la validation des systèmes humain-artefacts, la recherche s'est inscrite progressivement dans le champ pluridisciplinaire des sciences de la vie et des sciences des technologies et de l'ingénierie de l'artificiel.
Elle trouvait son origine dans le domaine de la santé et de l'aérospatial. Elle s'est désormais appliquée à la conception et à la validation des systèmes homme dans-la-boucle *risques critiques* [Fass and Chauvet2006], [Fass2006] de façon générale.

Ma tentative pour rendre naturelle l'expertise humaine résultait donc autant d'une approche formelle et expérimentale, comme nécessité métaphysique et scientifique, que d'une approche pragmatique et professionnelle, comme nécessité épistémologique et praxéologique.

La recherche, en tant que comportement situé dans un contexte anthropologique, est un processus dynamique qui évolue entre *le hasard et la nécessité* [Monod1970]. Depuis cinquante ans, l'épistémologie, la critique et la méthode rationnelle d'analyse et d'expérimentation scientifiques ont peu à peu laissé place, dans un positivisme exacerbé, à la technoscience et à ses postulats illusoires de notre puissance et de notre pouvoir sur la nature et donc sur nous-mêmes [Hottois2000]. Dans ce contexte où la technologie et la technique sont souvent confondues et désormais associées à l'activité scientifique, l'analyse demeure nécessaire mais n'est plus suffisante. De l'art et des sciences médicales fondées sur l'expérience à la médecine fondée sur des preuves -*evidence-based medicine* [Guyatt *et al.*1992] [McClellan *et al.*2008], et à l'ingénierie et la science fondées sur la modélisation et la simulation -*simulation-based engineering and science*

9. Ainsi que les enseignements de Bertrand Krafft et Didier Desor et nos discussions.
10. Expression redondante traduite de l'anglais *systems biology*.
11. Anglicisme introduit par l'ingénierie cognitive et l'intelligence artificielle.
12. Anatomo-physiologique et écologique.

[Zacharias *et al.*2008][Glotzer2011], le besoin de synthèse et de méthode de validation, si ce n'est de certification, est aujourd'hui une exigence pour la sécurité, la sûreté et la fiabilité de conception et de fonctionnement des systèmes dans lequel l'humain intervient.

L'idéologie, l'intuition, l'imaginaire scientifiques fondent dans un *a priori a posteriori* la spéculation, l'invention et la théorisation scientifiques. Elles motivent et orientent ma démarche de recherche, l'engagement et la production individuelle.

La spéculation trouve sa consistance dans sa validation logique intrinsèque raisonnée. Par abstraction, elle devient conjecture et formulation d'hypothèses [Poincaré1968]. Elle y trouve son existence idéale.

Dans le processus de généralisation, la déduction montre et prouve les liens logiques selon le type de causalité envisagée (linéaire, circulaire, événementielle, etc.) dépendant de la nature et de l'organisation du système considéré (physique, biologique ou artificiel). Elle construit sa robustesse dans sa résistance à la réfutation [Popper1991].

Par induction elle trouve sa validation extrinsèque affective et pratique dans l'expérience sensible et experte de la réalité des objets naturels. Elle devient règle et par spécialisation règle de l'art.

Au-delà des schémas épistémologiques traditionnels des démarches hypothético- ou empirico- déductives ou inductives, ce sont la créativité (l'imaginaire en action) et l'innovation (l'imaginaire rationalisé) qui donnent corps aux concepts. Ma formulation théorique fonde le sens expérimental et le sens général de ma recherche : «*les pieds sur terre, la tête dans les étoiles et les mains dans la glaise.*».

En conséquence d'un glissement paradigmatique du principe cognitiviste d'interaction au principe biologique et organisationnel d'intégration, une transformation anamorphique a imposé *in fine* une nouvelle thématique scientifique, un nouveau point focal, à ma recherche : **l'intégration homme système**.

Aujourd'hui mon engagement scientifique est dual. Premièrement, il est métaphysique [13] dans sa recherche des propriétés générales de l'intégration humain artefacts. Il a pour objet la recherche des principes scientifiques fondamentaux de l'intégration homme systèmes (des nanosystèmes aux systèmes socio-techniques). Deuxièmement, il ambitionne de valider des règles de conception et d'organisation sûre pour les systèmes humain *dans-la-boucle* et pour une classe de systèmes de systèmes particuliers en ingénierie systèmes : **les systèmes humains machines**.

Appuyé au mur de la réalité objective des domaines d'application, la recherche théorique trouve ses limites et ses concepts avec la théorie mathématique de la physiologie intégrative de Gilbert Chauvet. Elle fournit un cadre de description [14] et de validation pour l'intégration humain systèmes.

Ce cadre de recherche épistémologique et méthodologique, formel et expérimental, a pour enjeu la formulation et la vérification de principes généraux et génériques, et l'établissement de règles et méthodes de conception validées pour ce que nous appelons la **bio-ingénierie humain systèmes**.

Aujourd'hui mon objectif est de développer des techniques scientifiques prédictives, sûres et responsables [15][Arendt1972] [Affairs *et al.*2009] nécessaires en vue de fonder les recherches sur **l'homme augmenté**.

13. Dans ma volonté de connaissance par concept de la nature des choses ou des objets.
14. ou de *modélisation.*
15. La responsabilité est non seulement un concept scientifique et juridique, mais aussi et surtout un principe juridique d'engagement.

De surcroît, il convient d'évoquer le rôle majeur de ma sensibilité pour la création et l'expression artistiques sous toutes ses formes, des arts premiers à l'abstraction. En effet l'art, dans son acception contemporaine, comme artefact anthropologique, nous fournit des représentations et des concepts matérialisés de la cosmologie individuelle et collective. Ainsi l'objet artistique est forme sensible, trace esthétique de l'idéologie et production comportementale située dans l'histoire et la géographie de son auteur. «*L'art résume la vie*» proclamait le médecin et historien d'art Élie Faure [Élie Faure1985]. L'esthétique est la science des sensations, ce qui est spécifique et singulier pour devenir matière à connaissance, ce que souligne l'étymologie. Aussi est-il nécessaire d'intégrer l'esthétique comme dimension conceptuelle et réelle de la relation entre la forme, les émotions et la connaissance. C'est une relation qui souligne le lien génétique de l'art avec la science et la technique : la poésie du réel, la science de l'artifice et la technique des artefacts.

L'évolution de la représentation de l'espace au cours de l'histoire en est l'exemple le plus frappant [16]. L'invention de la perspective par Filippo Brunelleschi à l'orée du Quattrocento, et son utilisation simultanée dans l'architecture et la peinture illustre la rupture de conception, de perception et de capacité à concevoir et à investir l'espace tridimentionnel [Damish1999] (voir Fig.2.1, page 12). La création du cubisme, initiée par Georges Braque et Pablo Picasso au début du 20^{e}siècle, marque quant à elle une rupture avec la mise en perspective. Elle nous démontre une conception de la profondeur de l'espace et des objets tridimensionnels dans un mode de représentation synthétique bi-dimensionnel [Kahnveiller1998] qui inspirera quelques années plus tard l'invention du camouflage par un ingénieur militaire. De l'art pariétal à l'art numérique qui explore l'hyperespace numérique et les metavers dans des œuvres interactives tangibles immersives [Corniaut and Fass2001], il n'y a pas d'opposition entre le sensible et la technique [Francastel1956], juste un continuum entre l'œil et l'esprit [Merleau-Ponty1960], entre la main et l'outil [Leroi-Gourhan1964], pour ne pas dire entre le corps et l'esprit. L'art est un *symptôme* de la nature humaine !

Les questions sur la nature de l'expertise, de la connaissance, de l'interaction humain artefact et l'intégration humain systèmes ont nourri, nourrissent et questionnent encore mon parcours scientifique et professionnel. Elles les motivent. Certaines sont présentes depuis le début de mon engagement scientifique, une thèse de doctorat en odonto-stomatologie, d'autres sont apparues au cours de l'évolution de mes recherches. Aussi, en vue de démontrer la cohérence et l'évolution thématique de mes travaux, ce chapitre, consacré à la mise en perspective de ma contribution professionnelle et scientifique, comporte ci-après quatre sections :

1. **De l'art dentaire à l'aide au diagnostic** : cette section intitulée "*Plaisir de la science, naissance des idées*" présente mes premiers pas dans les sciences cognitives et l'intelligence artificielle. Elle montre comment je suis passé d'une préoccupation clinique, le diagnostic des dysfonctionnements crânio-mandibulaires, à la modélisation des connaissances et du raisonnement nécessaire à l'aide au diagnostic informatisé de ces pathologies en imagerie médicale par tomodensitométrie et par résonance magnétique nucléaire. Cela c'est traduit

16. Konrad Lorenz [Lorenz2010] souligne ainsi que l'intégration de la faculté d'abstraction de la perception, de la représentation centrale de l'espace et du comportement de curiosité constituent une totalité unique en son genre dont la fonction est la pensée conceptuelle et dont l'apparition correspond à l'hominisation.

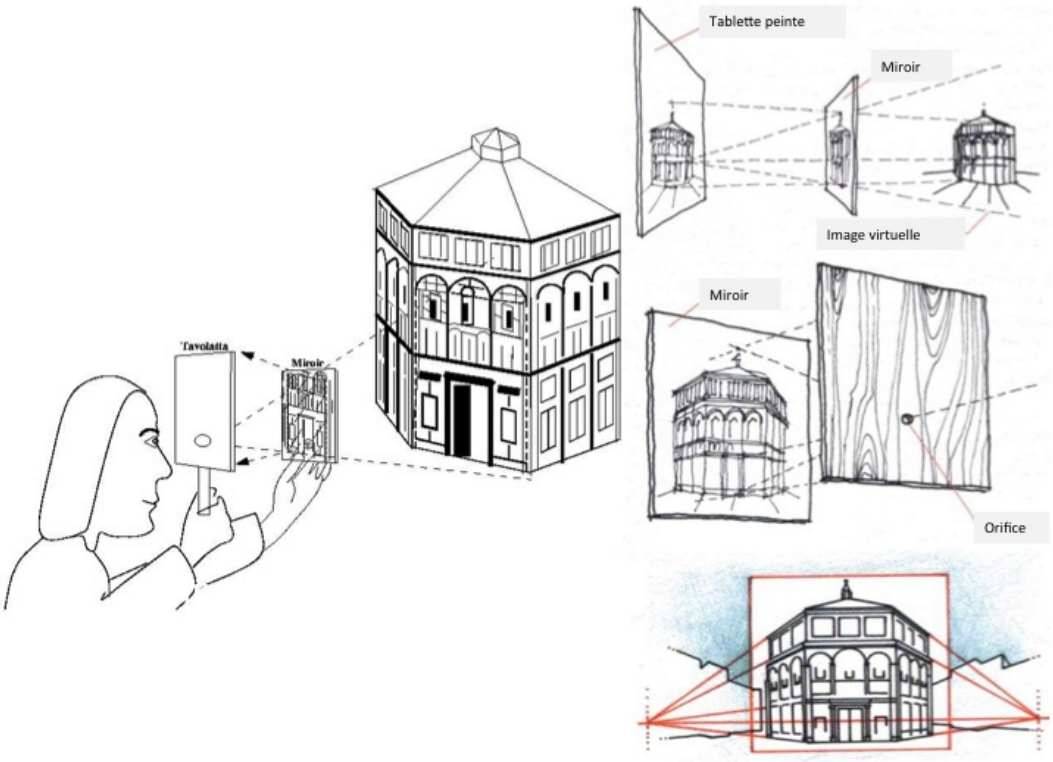


FIGURE 2.1 – Filippo Brunelleschi est l'inventeur de la perspective centrale. Architecte autodidacte, il percevait et concevait l'espace dans ses trois dimensions, ce qui n'était pas le cas de ses comptemporains. Vers 1415, il invente le dispositif de la Tavoletta afin d'aider ceux-ci à prendre conscience des principes de représentation d'une mise en abstraction de l'espace et des objets tridimensionnels, la perspective artificielle. Le dispositif de la tavoletta se compose de deux éléments techniques : une tablette peinte sur son extrados et percée d'un orifice selon les principes de la perspective centrale (point central, lignes d'horizon et lignes convergentes) et d'un miroir. L'image dessinée était celle du Baptistère de San Giovanni de Florence représentée selon le point de vue d'où l'expérience serait réalisée, sur la place du Dôme. Placé en ce lieu précis, l'utilisateur tenait la planchette dans une main et le miroir dans l'autre (il existe aussi un dispositif sur trétaux). Au travers de l'orifice de la planchette, il regardait dans le miroir l'image virtuelle (au sens de l'optique) du Baptistère se superposant au Baptistère réel. Ce n'est que quelques années plus tard que la formalisation géométrique de la perspective centrale sera décrite selon les lois de la géométrie euclidienne par Leo Battista Alberti puis par Piero della Francesca [Flocon and Taton1963]. L'expérience de la Tavoletta est l'ancêtre de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée. Elle résume en quelque sorte les enjeux de notre projet *l'homme augmenté*. Tout comme pour l'intégration humain systèmes qu'elle préfigure, la réussite de cette expérience dépend de plusieurs facteurs : 1) la capacité du concepteur à concevoir une abstraction pertinente de la partie de la réalité envisagée et à la représenter par l'artifice ; 2) le choix du médium de représentation formel et expérimental ; 3) la mise en forme du dispostif par rapport à la fonction recherchée, son *design* ; 4) la prise en compte du contexte d'usage ou du contexte opératoire ; 5) l'ergonomie physique du dispositif, sa capacité et sa facilité à induire sa manipulation en situation (sans se blesser) ; 6) la capacité du dispostif à mobiliser les capacités cognitives, d'imagination et d'action de l'opérateur (affordance)... qui doit comprendre et actionner le dispositif pour réaliser l'expérience.
Guidé par la volonté d'imitation d'une nature idéale, Brunelleschi nous démontre que de l'art à l'ingénierie, l'imagination et la rationalisation sont nécessaires à la créativité et la maîtrise technique.

par l'exploration des concepts d'expertise et de base de connaissances et les concepts associés des sciences cognitives.

2. **De l'interaction homme-machine à l'aide à l'action** : cette section intitulée "*Un projet de thèse : la validation des idées*" montre comment j'ai pris conscience des limites de la maïeutique de l'expertise et mis en évidence l'importance de la communication homme-machine et de l'interaction multimodale dans l'utilisation des systèmes informatisés d'aide opérationnelle (au dessin), passant du concept d'aide à la décision au concept d'aide à l'action, explorant les concepts de cognition spatiale et d'interaction multimodale.

3. **De l'aide à l'action à la neurophysiologie appliquée et à la conception des systèmes d'aide aux gestes techniques** : cette section intitulée "*Un projet de recherche interdisciplinaire dans la convergence art, sciences, ingénierie et organisation*" souligne comment j'ai exploré de façon théorique et expérimentale les questions scientifiques apparues et liées au développement de systèmes de réalité virtuelle et augmentée, ainsi que d'informatique vestimentaire pour l'aide aux gestes techniques, du chirurgien dentiste en implantologie orale à l'aide au geste technique des spationautes lors des sorties extra-véhiculaires. J'ai ainsi développé les concepts de base de connaissances multimodales, d'esthétique de la connaissance et de complexe individu-environnement artefactuel et ai ramené la question de l'interaction humain-machine à un problème de couplage de deux systèmes de natures différentes, le concept d'intégration s'imposant alors.

4. **De la physiologie théorique à l'intégration humain système** : cette section intitulée "*Vers l'infini et au delà*" presente comment la recherche d'un cadre théorique valide, formel et expérimental, s'impose pour la conception et l'ingéniérie des systèmes humain-artefacts *sécurité critique*. La théorie mathématique de la physiologie intégrative (MTIP) de Gilbert chauvet, initialement conçue pour la modélisation des systèmes biologiques, fournit des principes validés d'organisation et d'intégration d'éléments hétérogènes naturels et artificiels, de formes et de dynamiques différents à plusieurs échelles d'espace et de temps (des systèmes humain machine aux systèmes socio-techniques). D'une approche technique et managériale, le concept d'intégration humain systèmes développé initialement dans le domaine militaire et aérospatial, se transforme pour devenir un concept scientifique, nécessitant la recherche de principes fondamentaux et un cadre de description valide - robuste généralisable à la modélisation et à la conception fiable des systèmes humains artefacts, nécessaire à la modélisation et à la simulation prédictive des techniques de l'homme augmenté. Il sera ainsi possible de décider en connaissance de cause, en évaluant les bénéfices et les risques des développements à venir en particulier dans le champs de convergence "nanotechnologies, biologie, informatique et sciences cognitives ".

2.2 Plaisir de la science, naissance des idées

2.2.1 De l'art dentaire à l'aide au diagnostic

Qu'est ce que l'expertise ? Cette question intéresse l'intelligence artificielle, la psychologie et l'ingénierie cognitive depuis les premières tentatives de modélisation informatique de l'intelligence humaine ou de machine pensante dès les années 1950 [Turing1950, Newell *et al.*1959].
Le premier système intégrant les concepts de représentation des connaissances et de raisonnement, dénommé Dendral puis Meta Dendral, a été développé dès 1965 par l'Université de Standford pour des applications d'analyse des composants chimiques de matériaux par spectrométrie de masse et résonance magnétique nucléaire [Djerassi *et al.*1965].
Dans les années 1970 à Standford, MYCIN est le premier système expert médical à base de connaissances et moteur d'inférence développé pour l'aide au diagnostic des infections bactériennes et à la prescription précoce d'antibiotiques [Buchanan and Shortliffe1984]. En France, en 1981 Marius Fieschi développe le système Sphinx pour l'aide au diagnostic d'une douleur épigastrique [Fieschi1981].
Dans les années 1980, la question de l'expertise, de la représentation des connaissances expertes dans des bases de connaissances et de production de raisonnement expert par les moteurs d'inférences était au coeur de la conception des systèmes d'aide à la décision [Haton and Haton1989]. Ces systèmes s'appelaient des « systèmes experts ».
La méthode développée pour appréhender l'expertise, appelée maïeutique [a], a pour objet l'acquisition des connaissances (symboliques) expertes et des raisonnements experts [Fass1991]. Cette méthode d'acquisition des connaissances et de l'expertise développée par les sciences cognitives, si elle présente de nombreuses limites permet de démasquer néanmoins les faux experts.

a. Dans son sens méthodologique socratique différent du sens habituel somatique, il s'agit d'interroger une personne et de l'amener à prendre conscience de ses connaissances implicites et à les expliciter afin de les représenter ou de les modéliser.

En 1985 le mensuel *La Recherche* publiait un numéro spécial consacré à «l'Intelligence artificielle». Je l'avais acheté autant par curiosité que par inadvertance. Acte manqué auraient dit certains. Trois années plus tard, en automne, j'entendis à nouveau le terme *Intelligence artificielle*. J'étais dans le bureau du Professeur Augusta Tréheux dans le service de radiologie du CHU de Nancy Brabois où nous discutions de l'évolution de mon sujet de thèse d'exercice avec Jacques Woda, ingénieur spécialisé en organisation et en systèmes d'information. Ce jour-là, je ne le savais pas encore, ma vie professionnelle basculait dans une aventure passionnante.

L'objet de la réunion portait sur l'aide au diagnostic radiologique des dysfonctionnements crânio-mandibulaires en tomodensitométrie (scanner à rayon X). Le projet initial, que m'avaient proposé les professeurs Daniel Rozencweig et Augusta Tréheux, consistait à valider statistiquement une mesure d'angle comme indice de gravité des luxations condylo-méniscales pour le diagnostic des dysfonctionnements crânio-mandibulaires. Après une année de lectures et de réflexion, je venais de faire la démonstration de l'infaisabilité de cette validation statistique. En effet, l'angle mesuré dépendait d'une construction d'image en surbrillance sensée représenter le ménisque et son glissement antérieur. La mesure était

ainsi soumise à la variabilité de la lésion ou de sa forme, et aussi au choix de la fenêtre de visualisation tissulaire et à l'expertise du radiologue à mesurer l'angle formé par le signal osseux de la face articulaire antéro-supérieure du condyle mandibulaire et de la zone de surbrillance. Un autre facteur limitant de cette étude était la variabilité anatomique et anatomopathologique du système articulaire crânio-mandibulaire. L'articulation temporo-mandibulaire (ATM) est non seulement une diarthrose complexe [17], elle est aussi bilatérale. Et contrairement à une simplification abusive liée à un réductionnisme mécaniste, elle n'est pas symétrique. Cette non-symétrie anatomique de forme, volume et d'orientation, m'avait amené à douter de la pertinence de mon sujet de thèse. Par ailleurs, l'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRMN ou IRM) était désormais opérationnelle à l'hôpital. Elle permettait une visualisation directe du complexe ménisco-ligamentaire, de ses luxations et autres lésions (repliements, fissures, perforations...). L'IRM était désormais l'examen complémentaire de première intention des troubles articulaires des dysfonctionnements crânio-mandibulaires même si le scanner gardait ses indications pour la visualisation des tissus osseux et de leurs lésions.

Cependant, même si l'IRM permettait une visualisation des tissus mous (muscles, pédicules vasculo-nerveux) ou articulaires (ligaments et ménisques), même s'il était toujours guidé par l'examen clinique préliminaire, la description radiologique et l'affirmation du diagnostic démeuraient entachées d'incertitudes que seul le chirurgien ou l'anatomopathologiste pouvaient lever. Augusta Tréheux qui avait développé de nombreuses techniques d'imagerie de l'ATM, notamment de tomographie avec le Docteur Gérard Martin [Martin1974] en avait conscience. *In fine* elle voulait valider la qualité du raisonnement diagnostique et des connaissances qu'elle mobilisait lors de son activité d'analyse d'images médicales de l'ATM. De par la nature de son questionnement épistémologique et de son expertise du domaine, elle était ce que l'on peut qualifier un expert.

Le Pr. Tréheux avait accepté ma démonstration de non pertinence et d'infaisabilité de la validation proposée comme sujet de thèse initial. Je n'avais donc à ce moment là plus de sujet. Compte tenu des questionnements Jacques Woda nous proposa d'utiliser les méthodes d'analyse et de représentation des connaissances en usage pour le développement des systèmes experts en intelligence artificielle. Il s'agissait de modéliser le raisonnement et les connaissances nécessaires au diagnostic radiologique des dysfonctionnements crânio-mandibulaires en tomodensitométrie et en IRM afin de les valider et de développer ensuite une base de connaissances. Augusta Tréheux acquieça dubitativement. J'acceptai trop content de relever ce défi et inconscient de ce qui m'attendait.

Il ne me restait plus qu'à convaincre Daniel Rozencweig. Il accepta ma démonstration et accueillit ma proposition de nouveau sujet de thèse avec circonspection. Cependant il me fit confiance et m'encouragea dans cette voie nouvelle pour l'odontologie.

Il me fallut presque trois années pour mener à bien ce projet d'analyse critique du raisonnement diagnostique et de modélisation de la base de connaissances d'aide au diagnostic des dysfonctionnements crânio-mandibulaires en TDM et IRM [Fass1991].

C'est ainsi que mon projet de thèse d'exercice me fit tomber dans le chaudron des sciences

17. l'articulation temporo-mandibulaire est une articulation permettant des mouvements de grande amplitude, présentant des surfaces articulaires recouvertes de cartilage, entourée d'une capsule synoviale et fibreuse. L'adaptation entre les surfaces articulaires convexes est assurée par un disque méniscal maintenu en place par un système ligamentaire complexe.

de l'artifice et de la cognition.

2.2.2 De l'aide à la décison à l'aide à l'action

Expertise - sciences humaines et sociales. La psychologie et la linguistique ont abordé la question de l'expertise indirectement dans le cadre des sciences cognitives et d'épistémologies philosophiques. La question de la connaissance comme résultat de l'expérience ou d'une représentation (logique ou non), d'une perception directe de la réalité ou d'une représentation, située ou non [a] [Clancey, William J1997], est au coeur de ces domaines de recherche issus directement de la philosophie occidentale [James1890]. Longtemps l'idée que la connaissance serait un *miroir de la nature*, qu'elle serait une *connaissance de* et non une *connaissance que*, a ainsi dominé jusqu'à ce que l'élaboration constructiviste inaugurée par la pensée de Kant - la connaissance en tant que construction rationnelle - devienne le paradigme dominant [Boudon1990]. Dans cette perspective, la connaissance est un processus évolutif, auto-organisé qui se construit dans une dynamique d'acquisition dans un contexte socioculturel et environnemental [Glaserfeld1988].
Les questions de l'apprentissage, de l'acquisition des connaissances, du raisonnement, de la logique, de l'abstraction, des symboles et du language, comme système de signes et de sens sont au coeur des approches conceptuelles et expérimentales [Piaget1967] [Houdé2004].
Nous pouvons aussi noter l'inflence de la linguisitique strucurale [Rastier1991] sur les systèmes experts ainsi que les techniques de représentation et de structuration des connaissances dans les bases de connaissances.
Le rôle du fonctionalisme et ses concepts de modularité de l'esprit et de langage de la pensée ont été déterminants pour l'intelligence artificielle symbolique [Fodor1975], celle du *modelling the mind* [Dreyfus and Dreyfus1988]. Ces théories de la connaissance influent toujours fortement sur la conception de la représentation et de la modélisation des connaissances en informatique. C'est le cas des systèmes d'ontologies [Uschold and Grüninger1996], graphe sémantique de représentation des connaissances, qui fondent les techniques du Web sémantique et ne sont, après tout, que des thesaurus structurés.
La phénoménologie, comme théorie de l'expérience individuelle du monde, appliquée à l'informatique et à la modélisation bio-inspirée, fonde une conception computationnelle de l'expérience individuelle et donc de la connaissance, celle du *making a brain* [Dreyfus and Dreyfus1988].

a. En référence au concept de cognition située, c'est à dire contextualisée par l'action.

À cette même époque, le docteur Gérard Martin me proposa un poste d'attaché d'enseignement dans le département de parodontologie de la faculté. Avec lui, je me formai à la parodontologie clinique et chirugicale. Je découvris les techniques de chirurgie mucogingivale et de régénération tissulaire guidée. Je m'initiais aussi à l'implantologie.

Pour ma thèse d'excercice je réfléchissais à l'aide au diagnostic. Ma pratique me donnait à penser à l'aide à la planification des traitements et à l'aide aux gestes techniques. Et à ce moment, je pensais surtout à m'établir comme chirugien-dentiste, à développer ma petite entreprise et à devenir un *petit baron*, comme disent les italiens. J'entrepris donc de me

former à la gestion et au management à l'Institut d'administration des entreprises (IAE) de Nancy 2, dans le but d'apprendre les fondamentaux pour gérer cette petite entreprise. Ceci m'ouvrit l'esprit aux sciences et techniques de l'organisation.

Cependant, une question restait ouverte : ***Qu'est-ce que la connaissance ?*** Les heures de maiëutique experte et d'échange avec Augusta Tréheux avaient semé le doute en moi. La connaissance n'était pas seulement de nature logico-symbolique purement métaphysique. Elle devait se fonder sur la nature et l'organisation biologique de l'humain et ses relations à son environnement dans toutes ses dimensions biotiques, abiotiques, socio-techniques et socio-culturelles. C'est ce que je souhaitais comprendre. Je devais me former aux sciences cognitives pour avancer dans cette recherche.

Début 1992 une conférence scientifique sur ce sujet était proposée au Palais des Congrès de Nancy. J'y rencontrai le Professeur Daniel Coulon de l'École des Mines de Nancy qui m'invita à participer aux séminaires des SciCogn (sciences cognitives du Grand Est). Il n'y avait toujours pas de DEA de sciences cognitives à Nancy. Il me conseilla de suivre dès la rentrée suivante les cours du DU d'informatique médicale, option aide à la décision de la Faculté de médecine de Nancy. La particularité de ce DU était qu'une partie des cours était commune avec le DEA d'Informatique de l'Université Henri Poincaré. Malgré mon intérêt, le choc fut brutal.

Mais je découvris les fondements des sciences informatiques : la théorie des langages de programmation, le lambda calcul, la spécification, les méthodes formelles... Les cours que je suivis sans trop de difficulté furent ceux de Jean-Paul Haton en intelligence artificielle. Son épouse avait été membre de mon jury de thèse d'exercice et il connaissait mon travail. Il m'invita à poursuivre ma démarche en m'assurant de son aide si un jour j'avais un projet de thèse, ce qui se concrétisa trois années plus tard.

Je ne pus valider tous les modules de ce DU, toutefois je comprenais mieux la distance qui existait entre les sciences des systèmes artificiels, leurs exigences de validation et de spécifications correctes, et les sciences de la vie. Les unes se fondaient sur l'abstraction et un formalisme logico-mathématique, les autres reposaient sur la méthode expérimentale initiée par Claude Bernard [Bernard1984].

À la fin de l'été 1993, il n'y avait toujours pas de DEA de sciences cognitives à Nancy. Avec l'aide de Daniel Coulon, je m'inscris à celui de l'Université de Paris XI. Les enseignements et le stage se déroulaient au Laboratoire d'informatique pour la mécanique et les sciences de l'ingénieur (LIMSI).

Même si je passais une bonne partie de l'année universitaire 1993-94 dans le train et le RER entre Paris, Orsay et Nancy où je conservais mon activité de praticien et d'attaché universitaire, les enseignements que j'y reçus, en informatique, neurosciences, linguistique, psychologie cognitives, sémantique..., satisfirent mon appétit. Cette formation à la recherche m'ouvrait à des techniques et à de nouvelles réflexions. Lors de mon stage, le sujet que je traitais concernait à la fois la cognition spatiale et la communication homme-machine multimodale. Je fus co-encadré pour la seconde fois. Je travaillais sous la direction de Michel Denis, directeur de recherches, responsable de l'équipe « cognition humaine » et spécialiste de la relation image, langage et cognition [Denis1989], et de Daniel Teil, informaticien et ingénieur de recherche au département Communication homme-machine. Le sujet de mon DEA était l'étude des stratégies cognitives mises en

œuvre dans l'utilisation d'une station de travail multimodale [Fass1994]. Dans ce but, je collaborai avec Yasine Bellick qui préparait sa thèse d'université (spécialité informatique) sur les interfaces multimodales [Bellick1991], [Bellick1995]. Pour les besoins de mon protocole expérimental j'organisai un test réel utilisant un protype de station de travail multimodale [18]et l'application de dessin LIMSI-Draw développée par Yacine.

Cette première étude avait trois buts principaux : le premier était l'exploration du rôle de l'image et du langage dans la cognition spatiale multimodale en relation avec les concepts d'image mentale et de représentation ; le second était de dégager les séquences d'opérations mises en oeuvre par les utilisateurs du système pour réaliser la tâche qui leur était demandée ; le troisième était d'étudier les fonctions de l'interface multimodale qui étaient utilisées en fonction de la complexité et de la difficulté de la tâche. L'analyse des résultats expérimentaux comprenait donc deux parties : une analyse cognitive des performances et des stratégies, et une analyse d'ergonomie cognitive. J'avais développé le protocole expérimental avec Michel Denis en m'inspirant de l'expérience de l'île de Stephen Kosslyn [Kosslyn *et al.*1978]. Toutefois, afin de limiter les différences inter-individuelles dans le dessin d'objets concrets (temple grec, poussette, voiture...) et pour utiliser les fonctions de dessins géométriques élémentaires du logiciel, j'avais choisi de faire dessiner des figures matricielles 3x3 avec trois figures élémentaires (cercle, rectangle et triangle) et six couleurs possibles. Le protocole comportait quatre épreuves : la première en situation perceptive -le dessin de l'image vue, les trois suivantes en situation mémorisée permettant de tester l'hypothèse d'image mentale - le dessin mémorisé d'une image, le dessin mémorisé d'après une description textuelle linéaire boustrophédon et enfin le dessin mémorisé d'après une description textuelle de l'image sans ordre logique. J'avais complété l'étude par le recueil des commentaires post-expérimentaux sous la forme d'un questionnaire semi-directif. Afin d'évaluer les capacités de représentation et d'imagerie mentale des sujets, j'avais aussi soumis les seize personnes de l'échantillon à la réalisation des tests dits du Minnesota Paper Form Board (MPFB) et de Mental Rotations Test (MRT) prescrits par Roger Shepard et Jacqueline Metzler [Shepard and Metzler1971].

Si les résultats généraux étaient plutôt congruents avec les attentes de Michel Denis concernant les sujets descripteurs *versus* les sujets imageurs, nous constations que l'étude des stratégies cognitives observées devait tenir compte des stratégies de planification d'usage des commandes de l'interface. Cette planification d'usage des différentes modalités d'interaction pour réaliser chaque épreuve était fonction de l'apprentisssage, de la compréhension et du choix des commandes pour chaque personne. Si le nombre des stratégies comportementales observables était faible pour la tâche de copie d'image, il augmentait avec la difficulté et la complexité de la tâche. Nous avons également pu mettre en évidence des différences liées à la formation initiale et aux métiers des sujets [19].

L'un des paradoxes de cette étude fut que le sujet ayant les meilleurs résultats, avec les temps les plus courts d'apprentissage et de mémorisation, était celui qui avait les pires scores aux tests d'évaluation d'imageur. Dans son cas la psychologie cognitive n'apportait aucune explication satisfaisante et ce n'était pas là le moindre des paradoxes de notre étude. Nous avions aussi mis en évidence que les résultats aux épreuves n'étaient pas statistiquement corrélés aux capacités visuo-spatiales des sujets !

18. La station de travail multimodale était composée, outre d'une unité centrale avec clavier et souris comme périphériques d'entrée, d'un écran tactile mono-point et d'un module de reconnaissance de la parole. On pouvait aussi y adjoindre un module de balistique oculaire qui ne fut pas utilisé dans cette étude.

19. Sur l'échantillon de 16 personnes, la moitié était constituée d'étudiant, en thèse ou en DEA au LIMSI, l'autre moitié de professionnels : architecte, monteuses de cinéma, radiologue, journaliste et même un égyptologue.

Le mémoire de DEA comportait dans sa partie finale un paragraphe sur les perspectives d'application médicales radiologiques et chirurgicales. Il débutait ainsi : «*Pour qu'une action soit adaptée dans cet environnement multimodal, l'intégration perceptive contextualisée d'informations de différentes natures, notament extéroceptives et proprioceptives, semble jouer un rôle déterminant à la fois dans la construction et dans l'interprétation de la situation d'interaction.*». Ce paragraphe se poursuivait en soulignant la place de l'utilisateur comme acteur ou actant du système. Pour finir il ouvrait des perspectives de recherches et de développements mettant en œuvre les techniques de réalité virtuelle et de réalité augmentée dont les premiers systèmes commençaient à être commercialisés.

Aussi l'issue de ce DEA fut double. Il fallait que j'approfondisse mes connaissances en neurosciences et particulièrement en neurophysiologie. Ce que je fis en suivant les cours du certificat de psychophysiologie à la faculté de médecine de Nancy. L'autre conséquence, plus profonde, était **la remise en cause des fondements métaphysiques, philosophiques et logico-symboliques de la cognition, en particulier des concepts de représentation et de connaissance**. J'éprouvais **la nécessité de revenir à mes fondamentaux - l'anatomie et la physiologie, pour comprendre comment étendre les fonctions sensorimotrices, émotionnelles et cognitives de l'humain avec des artéfacts interactifs adaptés**. Mon projet de thèse d'université germait. Je rencontrai à nouveau Jean-Paul Haton à l'issue d'un séminaire SciCogn sur le thème du raisonnement en février 1995 au LORIA qui s'appelait encore le CRIN (centre recherche en informatique de Nancy). Il examina en mai 1995 mon ébauche de sujet.

Le projet avait pour objectif de réviser le concept de base de connaissances, issu de l'intelligence artificielle, à l'aune de la *psychophysiologie* de la connaissance, de la neurophysiologie sensorimotrice multimodale et de l'intégration perceptivo-motrice. La question de l'émergence du sens, sémantique et spatial, lié à la planification et au contrôle de l'action motivait ce travail. Il s'agissait : *«de définir une ergonomie et une sémantique "neurocognitives" pour la communication homme-machine : définir le formalisme neurosensoriel des informations échangées entre deux systèmes multimodaux, homme et machine en interaction multimodale»*. Je proposais aussi d'utiliser la technologie des environnements virtuels (réalité virtuelle et réalité augmentée) pour l'aide à l'action, en particulier pour l'aide aux gestes techniques.

2.3 Un projet de thèse : la validation des idées

Expertise - sciences de la vie et la biologie. Les neurosciences, l'éthologie et la psychosociobiologie, n'étudient pas l'expertise directement. Elles théorisent et étudient les fondements écologiques et biologiques, anatomo-physiologiques et physiopathologiques, des comportements. L'enjeu d'une épistémologie biologique et d'une biologie cognitive est de fonder la théorie de la connaissance sur des principes biologiques.
L'éthologie humaine s'intéresse à la nature de l'expertise à la suite des recherches du neurophysiologiste et mathématicien russe Nicolas Bernstein dans les années 1930 et de l'écologie psychologique de James Gibson. Elle situe l'expertise dans la niche ou bande passante écologique d'activité et d'action des individus et de leur développement épigénétique.
Les neurosciences, avec Gérald Edelman, enracinent la connaissance et la conscience dans la biologie - neuroanatomie et neurophysiologie. Avec son équipe pluridisciplinaire du Neuroscience Institute de La Jolla (Californie), il a exploré les fondements des comportements humains, de la biologie moléculaire à la simulation robotique.
Si l'on cherche à intégrer les fondements multidimensionnels de l'expertise humaine, une approche pluridisciplinaire est nécessaire. Dans le domaine de l'ingénierie système et de l'ergonomie cognitive, ce domaine est celui des facteurs humains. Mais cette approche demeure trop conceptuelle et interprétative dans ses fondements scientifiques.

La question de l'expertise et du statut de l'expert est devenue depuis quelque temps une question sociétale. La recherche des principes scientifiques validés pour la description et la modélisation de l'expertise liée à l'action motive notre projet de recherche.

Mes préoccupations de praticien implantologiste rejoignaient mes interrogations scientifiques. Désormais je concevrais **la cognition comme une fonction physiologique intégrant les émotions et l'action et le geste comme le produit d'une intégration anatomo - physiologique sensori-motrice, cognitive et émotionnelle**. Je proposai un glissement de paradigme **de l'aide à la décision vers l'aide à l'action**, où la décision est une classe particulière d'action. **Les environnements virtuels** et ses deux principales déclinaisons **- la réalité virtuelle et la réalité augmentée**, devenaient l'instrument technique de l'aide à l'action. Le projet de thèse consistait à développer le cadre scientifique et expérimental de cette intuition et à en tester la robustesse conceptuelle et pratique.

Jean-Paul Haton estimait qu'il ne pouvait encadrer seul ce projet dépassant largement le champ de l'intelligence artificielle. De plus, mon parcours rendait difficile une inscription en thèse dans l'école doctorale d'informatique. Il invita donc le Professeur Francis Lestienne à me co-encadrer.

Le professeur Lestienne était un personnage singulier. Il animait une petite équipe sur le thème de la neurophysiologie du mouvement au sein du Laboratoire de biologie et physiologie du comportement URA CNRS 1293 de l'UHP Nancy 1, dirigé par Bertrand Krafft. Je l'avais rencontré quelques mois plus tôt au cours des enseignements du certificat de psychophysiologie à la faculté de médecine. Son approche dynamique de la perception et de l'action m'avait intéressé, en particulier sa présentation de l'adaptation dynamique du gain et

de l'intégration sensorielle dans la perception visuelle, le contrôle de l'équilibre et de la posture [Lestienne *et al.*1977], [Victor1987], [Jeka *et al.*2000], [Salinas and Sejnowski2001]. Arrivé à Nancy en 1993 après une expérience d'entrepreneur avortée, il avait dirigé dans les années 1980 les premières recherches spatiales de neurophysiologie sensorielle française alors qu'il était directeur de recherche CNRS au sein du Laboratoire de physiologie du travail du CNAM dirigé par son ami Alain Berthoz. Il accueillit mon projet avec enthousiasme et intérêt. Lors de notre second rendez-vous, il évoqua pour la première fois l'intérêt que suscitait mon projet de thèse pour *ses amis du CNES et de la NASA* et s'empressa de m'aider à préparer mon dossier d'inscription pour l'École doctorale Biologie santé environnement. Il n'existait pas de spécialité Neurosciences cognitives. Je fus inscrit en spécialité neurosciences moléculaires en novembre 1995. L'intitulé du sujet était alors : *"Représentations mentales de l'action et du geste, expression motrice, interaction homme-machine : application à la réalité virtuelle et à la réalité augmentée"*.

Lors de la première réunion organisée par Jean-Paul Haton, Francis Lestienne était venu accompagné de Mohammad Ghafouri Gharavi. Depuis fin 1994, celui-ci préparait sa thèse d'université sur l'analyse du geste graphique dans l'espace tridimensionnel avec pour objectif l'application à l'évaluation des modifications du geste liées à la fatigue ou au veillissement. Après des études en énergétique à Téhéran et un DEA en «Physique des rayonnements, détecteur, instrumentation et imagerie» à l'Université de Strasbourg, il avait rejoint Francis Lestienne à Nancy dans la perspective de développer des dispositifs médicaux d'aide à la personne. Au final, si une partie de son travail a été vendu par Francis Lestienne à l'Institut National de recherche et de sécurité (INRS) et s'il avait effectué des études avec des personnes âgées [Ghafouri and Lestienne2000], Mohammad Ghafouri Gharavi avait réalisé un travail de recherche fondamentale sur la neurophysiologie du mouvement [Ghafouri1997]. Nous commençâmes à travailler ensemble en septembre 1995. Il m'initia à **la capture et à l'analyse du geste**. Jusqu'à son départ en post-doctorat au Canada début 1998, nous travaillâmes en équipe, tant pour la rédaction de sa thèse que pour la mise au point du paradigme expérimental de la mienne. À deux nous formions l'équipe de Francis Lestienne.

Pour la prépation de ma thèse j'évoluais entre l'équipe Reconnaissance des formes et intelligence artificielle (RFIA) dirigée par Jean-Paul Haton au CRIN et l'équipe neurophysiologie du mouvement animée par Francis Lestienne au sein du Laboratoire de biologie et physiologie du comportement. Cette double affiliation m'offrait la possibilité de suivre les séminaires RFIA du lundi, consacrés aux différents thèmes de l'IA présents au sein de l'équipe -de la reconnaisance de la parole aux systèmes multiagents en passant par les neurosciences computationnelles d'une part, et les séminaires d'éthologie et de neurophysiologie d'autre part. De nombreux invités de F. Lestienne effectuaient des recherches dans le domaine de la physiologie gravitationnelle [20]. Certains travaillaient pour le Centre national d'études spatial (CNES) en particulier pour le développement de dispositifs expérimentaux d'analyse de mouvement et envisagaient l'utilisation future de la réalité virtuelle pour les programmes de neurophysiogie de la perception et de l'action du département sciences de la vie du CNES. J'eus l'opportunité d'échanger longuement avec eux et de constater l'intérêt réel qu'ils portaient à mon projet.

20. Ce terme est plus précis que celui courament utilisé de physiologie spatiale. La physiologie gravitationnelle étudie le rôle de la gravité sur les fonctions physiologiques du niveau moléculaire aux niveaux les plus intégrés, comme ceux de la perception, de la decision ou de l'action, sur terre, en hypergravité ou en microgravité.

L'année 1995 avait été une année incroyable. J'avais dû renoncé à m'associer comme chirurgien-dentiste. Je n'avais jamais imaginé faire de la recherche professionnellement et voilà que l'on me parlait de l'intérêt de mes travaux pour des agences spatiales. À cette époque, les amis auxquels je rapportais ces propos me considéraient comme naïf, mythomane, voire les deux. Quittant à regret ma pratique clinique et de mes patients, mais libre de m'engager dans une nouvelle aventure et sur les conseils avisés de Jean-Paul Haton, je recherchai un financement pour ma thèse tout en exerçant une activité à temps partiel de chirurgien-dentiste salarié. Depuis ma thèse d'exercice, je m'étais intéressé à l'aide au diagnostic et à la planification thérapeutique à distance (la télémédecine). Début décembre 1995 ; Francis Lestienne me donna les coordonnées de René Bost, directeur de l'Institut de médecine et physiologie spatiale - MEDES, afin de discuter d'un projet de télé-échographie qui constituerait potentiellement une source de financements pour mon projet.

L'année 1996 fut déterminante. René Bost, que je rencontrai en janvier 1996 au siège du CNES, fait partie de ces hommes rares qui souhaitent partager sa liberté d'action avec ses collaborateurs. Centralien, il s'était orienté vers la recherche, en particulier dans les Terres australes et antarctiques françaises (TAAF) dont il avait été chef du bureau scientifique dans les années 1950 et 60. Il avait aussi participé à l'aventure des fusées sondes Véronique qui avaient permis de réaliser les premières expérimentations sur le comportement animal en microgravité avec le lancement du "Rat Hector"[21].

À la création du CNES en 1961 par le Général de Gaulle, il fallait des ingénieurs et des scientifiques d'expérience. René Bost fit partie de ceux-là dès l'origine avec son expérience des milieux extrêmes.

À cette époque, au cours d'une réunion de travail sur l'intérêt de la recherche spatiale pour les sciences, il fut intéressé par une proposition inédite d'extension des études spatiales aux sciences de la vie. L'auteur en était le médecin Général Grandpierre. C'est ainsi que René Bost eu l'idée de proposer la création d'un département consacré "aux sciences de la vie et microgravité" au CNES. René Bost et Francis Lestienne s'étaient rencontrés au début des années 1980 lors de la préparation des vols de Jean-Loup Chrétien et Patrick Baudry et des expériences de neurophysiologie spatiale que dirigeait Lestienne. Lorsque atteint par la limite d'âge, René Bost avait dû quitter ses fonctions opérationnelles au CNES, il avait créé le MEDES pour deux missions : d'une part la préparation et le suivi médical des spationautes et d'autre part la valorisation des dispostifs et des résultats de la recherche spatiale à l'humain sur terre, sa santé et son bien-être. Lorsque je le rencontrai, il avait 73 ans !

Notre premier rendez-vous avait pour objet le projet d'installation d'un réseau de télé-échographes robotisés pour la Guyanne dont Jacques Chirac, Président de la République depuis quelques mois, avait chargé le MEDES. Les époux Chirac, sensibles aux drames du palusdisme gravidique, souhaitaient développer un moyen de diagnostic et de prise en charge efficace des femmes enceintes atteintes de paludisme[22]. Il s'agissait de déployer

21. Le "rat Hector" a été le premier animal vivant instrumenté lancé par la France. Ce sont deux jeunes médecins spécialistes de médecine aérospatiale de Nancy qui l'avaient préparé : Pr. Michel Boulanger et Pr. Jean-Pierre Crance, tout deux élèves du médecin Général Robert Grandpierre professeur de physiologie à Nancy et Directeur du centre d'études de recherches et de médecine aéronautiques (CERMA) au Centre d'Essais en vol (CEV) de Bretigny sur Orges. Le Pr Grandpierre avait créé à Nancy dès 1946 avec son ami le Pr Claude Franck le premier diplôme français de médecine aéronautique.

22. Le paludisme gravidique touche la mère et le foetus. Sans prise en charge efficace, le pronostic vital est souvent engagé pour l'un et l'autre.

le long des fleuves Litani et Maroni un ensemble de postes d'échographie robotisée ou télé-assistée qui seraient pilotés via un réseau satellite par des médecins spécialistes depuis l'hopital de Kourou. Si les questions techniques et financières étaient partiellement résolues, c'est l'anthropologie de terrain et les facteurs humains liés à l'ingénierie cognitive et au design du système qui posaient vraiment problème.

René Bost me questionna sur mon parcours, mon projet de thèse et mes idées. À l'issue de ce rendez-vous, pour m'aider à trouver le financement de mon projet en partenariat avec le MEDES, il m'orienta sur une piste de réflexion et de développement : l'aide au geste technique, du chirugien dentiste à l'activité spatiale humaine. Il me conseilla d'envisager la question et ses développements possibles pour les Sorties extra-véhiculaires (EVA) [23].

Mes idées intéressaient donc le domaine du support vie et de l'activité spatiale humaine, au moins René Bost. Un avant-projet en vue d'explorer des pistes de financemnt devait être présenté aux deux co-directeurs en présence de René Bost quelques semaines plus tard à Nancy.

Une visite à la Cité des sciences et de l'industrie dans la partie consacrée à l'aventure spatiale m'a donné l'occasion de tester les installations éducatives consacrées à la microgravité, avant de continuer à étudier les conditions de vie et d'activité en microgravité ou en impesanteur. Il me fallait appréhender les variations et les adaptations physiologiques induites par la microgravité, en particulier sur les fonctions sensori-motrices et cognitives, leurs conséquences sur l'activité spatiale et la conduite des activités et gestes techniques. J'ai ainsi mieux appréhendé la face cachée de l'entraînement et de la préparation aux missions, quelques éléments de médecine spatiale [Medes and Collaborateurs1991] et le concept de contre-mesure. Les équipements des spationautes : combinaisons d'EVA, surpport vie, aménagement des modules de vol et des stations spatiales... me sont devenus familiers. Je vivais en quelque sorte la tête dans les étoiles !

En amont du rendez-vous à Nancy avec René Bost, j'ai repris contact avec Marie-Claude Drouot, médecin généraliste, déléguée générale du Pôle européen de santé (PES) à Nancy, rencontrée en septembre 1995. Fondé en 1994, le PES avait à ses débuts pour missions *le développement des nouvelles techniques en santé, la mise en réseau des professionnels et la participation au développement économique en santé* [PES2010]. Les perspectives de recherche et de développement entre les domaines de la santé et l'activité spatiale humaine, la télémédecine et les nouvelles technologies de l'information et de la communications (NTIC) [24] justifiaient sa participation au rendez-vous avec René Bost.

Le projet *"Spaction : Systèmes d'aide à l'action portable, systèmes portables d'aide à l'action"*[25]. Il intégrait un volet recherche en lien avec ma thèse d'université pour valider les concepts scientifiques et techniques applicables à l'aide à l'activité spatiale humaine, sa préparation sol et son aide en situation. Il comportait aussi un volet transfert à l'humain sur terre pour des applications liées à la santé et l'accès à la culture [26].

23. Les sorties extra-véhiculaires ou *space walk* en anglais, dont la première fut réalisée par Alexei Leonov le 18 mars 1965, ont actuellement pour objet des activités d'assemblage et de maintenance sur un véhicule, une station spatiale ou un satellite artificiel. Elles nécessitent l'usage de scaphandres, d'outils spécialement conçus et un entraînement spécifique en piscine et avec simulateur. L'acronyme anglais est EVA pour *extravehicular activity*.

24. En 1996 le terme Internet n'était pas encore totalement entré dans le vocabulaire courant. L'acronyme NTIC se diffusait associé à l'expression créée par Al Gore lors de la campagne éléectorale de 1992 aux USA et consacré en France en 1994 par le rapport Théry [Théry1994] : *les autoroutes de l'information*.

25. Projet protégé et déposé à l'INPI.

26. cf. la défintion de la santé de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) est : *la santé est un état de complet bien-être physique, mental et social, et ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité*. J'avais

J'y envisageais le développement de dispositifs *intelligents* et interactifs pour l'aide aux gestes techniques et le transfert à des applications terrestres professionnelles et pour le plus grand nombre. En voici quelques exemples :

— un système d'aide au référentiel d'action pour compenser par la vision, le son ou le toucher, l'absence de facteur gravitaire, normalement nécessaires au contrôle de la posture et des mouvements ;
— un aide mémoire multimédia pour la documentation et la planification des procédures et des actions techniques (organisé et paramétré par et pour l'opérateur) ;
— une aide aux gestes proprement dits impliquant un vêtement interactif d'aide au mouvement et utilisant des matériaux actifs pour compenser les difficultés induites par la rigidité relative du scaphandre ou les limitations des praxies dues aux épaisseurs de gants.
— L'ensemble était complété par un système de télé-assistance visuelle et auditive permettant de partager le même espace visuel d'action avec une autre personne au sol ou dans le module susceptible de guider l'opérateur en situation.

Le caractère dual des applications proposées a permis de fédérer les différents établissements [27] qui soutenaient le projet. Pour la mise en oeuvre,, il me revenait d'animer la création d'une antenne du MEDES en Lorraine sur les thèmes des NTIC et de la télémédecine tout en préparant ma thèse dont les résultats devaient valider des principes fondamentaux et la faisabilité des applications potentielles que j'avais imaginées. Je mis fin à mon activité de chirurgien-dentiste le 31 août 1996 pour prendre mes nouvelles fonctions le 1er novembre 1996.

L'année 1997 fut marquée par un travail scientifique d'identification et de hiérarchisations des questions à étudier ainsi que par la spécification des moyens nécessaires au développement de la plate-forme expérimentale de réalité viruelle et de réalité augmentée d'aide à l'action. Le protocole expérimental fondé sur le geste graphique, s'appuyait sur les recherches de Mohammad Ghafouri Gharavi. Je participai aussi à des recherches en IRM fonctionnelle avec le Pr Marc Braun du service de Neuro-radiologie du CHU de Nancy. Dans un projet de Programme hospitalier de recherche clinique (PHRC) je proposai d'étudier l'anatomomie fonctionnelle cérébrale des transferts intermodaux visuo-tactiles. Au laboratoire de neurophysiologie, je co-encadrai deux stagiaires de maîtrise Instrumentation et Mesure attirés par la *réalité virtuelle*. Et si je n'avais plus d'activité clinique, j'étais encore attaché d'enseignement dans le département de biologie de la Faculté de chirugie dentaire de Nancy où je participais avec le Dr Alain Westphal à l'option de deuxième année *Histoire de la chirurgie dentaire et philosophie des sciences* dont les cours étaient organisés en collaboration avec les membres du Laboratoire d'histoire des sciences et de la philosophie - Archives Henri Poincaré de l'Université Nancy 2.

Pour l'activité du MEDES, en relation avec le CNES, je réfléchissais non seulement au télédiagnostic mais aussi à la téléchirurgie et à l'utilisation de la réalité virtuelle comme supports et contre-mesures pour les vols de très longue durée, on pensait déjà aux vols vers Mars. Avec le PES je participais au développement d'un outil d'aide à la gynécologie chirurgicale fondé sur une base d'image de référence et la participation d'experts. Je m'impliquai aussi dans des développements possibles à l'échelle de la Grande Région SarLorLux.

postulé que la culture et le lien aux autres qu'elle implique était donc une composante importante pour la santé. Les possibilités offertes par les TIC laissaient entrevoir leur dimension sociale et culturelle. Ce que l'on appelle aujourd'hui le Web 2.0 ...

27. UHP Nancy1, CRIN INRIA, PES, MEDES, CNES et Région Lorraine.

Le point d'orgue de l'année a été pour moi la participation à Telecom Inter@ctive 97, manifestation internationale organisée début septembre par l'Union internationale des télécommunications (UIT) à Genève [28]. Suite à une participation au projet d'installation artistique interactive "Camera Virtuosa" avec Daniel Corniaut, enseignant à l'École nationale d'art de Nancy [29], j'intervenais depuis deux années dans le DEA du Laboratoire de langage électronique au CNAM à Paris à l'invitation de Don Foresta [30] et de Georges-Albert Kisfaludi. Ils m'ont invité à soumettre une proposition de communication à TELECOM UIT. Selectionné, j'y exposai mes réflexions et mes propositions sur *l'aide à l'action portable*. Le PES présenta des démonstrations de la base d'images médicales de référence dans le cadre de l'exposition. Cet événement, le premier du genre autour d'Internet et de ses conséquences industrielles, économiques, culturelles et sociétales, réunissait des industriels, des représentants des États membres de l'UIT et d'autres agences de l'ONU et des personnalités de la société civile -membres d'ONG, scientifiques et artistes... Tous venaient présenter et partager leurs expériences et leur vision du futur des NTIC. Les échanges y étaient nombreux et riches. Je gardai des liens avec Fernando Lagraña et son équipe chargée de l'organisation des fora de l'UIT, qui me valut d'être nommé dix ans plus tard au Board de Telecom ITU - Forum Advisory Committee.

Le retour à Nancy fut brutal. Mon contrat initial s'chevait fin octobre 1997 et le MEDES ne semblait pas prêt à tenir ses engagements contractuels et René BOST quittait ses fonctions. Le 1er novembre 97, j'étais inscrit en deuxième thèse, le budget était alloué par la Région Lorraine pour l'achat de la plate-forme expérimentale, mais je n'avais plus de contrat de travail. Mon projet était en danger. Je n'avais plus de revenus et je devais faire respecter les engagements contractuels. Il a fallu huit mois avant que le CNES ne s'acquitte en partie de ses obligations. Je retrouvai un contrat de travail au début de l'année 98 et une certaine sérénité, suffisament pour réaliser toutes les expériences prévues et tester mon système prototype en situation opérationnelle au cours de la campagne de vol parabolique n°8 CNES SPACEHAB. Entre temps, Francis Lestienne était parti en année sabbatique au Canada avant de rejoindre l'UFR STAPS de Caen. En passant par Nancy il avait emporté une partie du matériel nécessaire à l'expérimementation. Au printemps 1999, je me retrouvai de nouveau sans contrat, j'avais un gigaoctets de données expérimentales à traiter et à analyser et une thèse à finir. Les deux années suivantes ont été difficiles. J'alternais mon activité de recherche avec une activité d'enseignement au Centre de qualification des assistantes en odonto-stomatologie (CNQAOS) de Paris et de Nancy. J'y enseignais la psychologie, l'ergonomie et l'organisation du travail appliquées au cabinet dentaire.

L'équipe de neurophysiologie du mouvement n'existait plus. J'avais définitivement rejoint le LORIA et l'équipe Cortex [31]. Jean-Paul Haton demeurait mon directeur de thèse et

28. Fondée en 1865 sous l'appellation d'Union internationale du télagraphe, UIT est la plus ancienne agence des Nations Unies dont elle est l'institution spécialiséé dans le domaine des téchnologies de l'information et de la communication. Elle a pour rôles la régulation, la normalisation, le développement et la promotion des TIC au niveau mondial. http ://www.itu.int

29. Camera Virtuosa est une œuvre permanente du musée des média ZKM de Karlshrue depuis 1996.

30. Ancien diplomate et directeur du Centre culturel américain à Paris, Don Foresta fut un des pionners de l'art video en réseau avec l'artiste coréen, Nam June Paik dès 1976.

31. Créée en 98 par Frédérique Alexandre, le projet Cortex INRIA LORIA développait des recherche en informatique bio-inspirée et "neurosciences" computationnelles.

m'encouragait à finir du mieux que je pouvais mon projet, avec l'aide bienveillante de Bertrand Krafft directeur du laboratoire de biologie et physiologie du comportement.

Je ne voulais rien lâcher. Et je n'ai rien lâché. Ma thèse fut présentée et soutenue dans l'après-midi du 23 décembre 2002, à la veille de Noël.

2.4 Un projet de recherche interdisciplinaire dans la convergence art, sciences, ingénierie et organisation

Sans électrons libres il n'y a pas de liaisons chimiques fortes ni de molécules complexes.

La prise de risque et la maîtrise des risques naturels, technologiques, sanitaires ou de défense sont un enjeu à la fois individuel et social, technique et organisationnel [de l'Air et de l'Espace2008] [ISO2009]. Certains, comme les sportifs de l'extrême, *érotisent la mort* et jouent leur vie dans une prise de risque aux limites du danger létal. D'autres cherchent à comprendre et à limiter les risques potentiels inhérents à la conception de nouveaux artefacts et systèmes techniques, et aux nouveaux concepts opérationels associés. Cette culture s'est fortement développée initialement dans le domaine aérospatial et dans l'industrie nucléaire. Aujourd'hui, la gestion des risques se diffuse aussi bien dans le domaine de la santé que du management des organisations. Au-delà d'une gestion purement financière, elle participe à la responsabilité sociétale des entreprises qui prend en compte les risques socio-techniques, psycho-sociaux et environnementaux.
Cette gestion des risques est apparue au cours de révolutions industrielles successives prenant en compte *a posteriori*, après la survenue d'incident ou d'accident, la nécessité de limiter les risques d'accidents techniques et humains. Avec l'amélioration de la maturité des systèmes techniques et législatifs, la gestion des risques est devenue une nécessité *a priori* de l'ingénierie de conception et de design des systèmes artificiels, de leurs structures et de leurs fonctionnements. Cette anticipation des risques possibles concerne le domaine de la sécurité et de la sûreté de fonctionnement des systèmes. L'erreur humaine, l'incapacité ou la défaillance techniques et organisationnelles sont parmi les thèmes majeurs associés à la conception des systèmes critiques.

Pour remédier aux angoisses liés aux incidents de parcours, je m'étais réfugié dans la lecture d'une vaste bibliographie et dans la fréquentation du monde de l'art. Entouré par des soutiens fidèles et attentifs, j'avais déconstruit mes certitudes initiales pour concevoir un nouveau cadre scientifique adapté à ce que j'appelais alors ***les sciences intégratives de l'interaction***. Le résultat était à la hauteur de mes exigences et de mon engagement. Le problème de l'interaction homme-machine s'inscrivait désormais dans le cadre général des **systèmes humain machine** et j'avais repositionné la question de **la nature de la connaissance dans le cadre de la biologie théorique et plus particulièrement de la théorie mathématique de la physiologie intégrative de Chauvet**. Avec ce changement de paradigme épistémologique, l'interaction homme-machine devenait un problème de **couplage de deux systèmes de natures différentes : l'humain, un système biologique, et l'artefact, un système physique (et informationnel)**.

J'avais aussi montré que les environnements virtuels constituaient un médium expérimental et technologique pertinent pour l'étude et la conception des artefacts d'assistance et d'extension des capacités sensori-motrices et cognitives individuelles. De plus, comme les travaux avec Mohamad Ghafouri le laissaient présentir, l'analyse du geste graphique était un moyen d'évaluation du design, de l'intégration et de la complexité de ces systèmes humain-machine [Fass2005].
Ma thèse avait permis de valider mes idées et mes intuitions initiales. Elle avait montré les potentialités opérationnelles de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée pour l'aide aux gestes techniques. Un champ de recherche et de développement s'ouvrait. Le professeur Claude Burlet [32], président de mon jury de thèse, qui souhaitait me voir poursuivre mes recherches dans le périmètre universitaire nancéien, me proposa de développer un projet de recherche pluridisciplinaire pour l'UHP Nancy 1 qu'il souhaitait intégrer au projet Artem.

L'idée du projet Artem était apparu à Nancy en 1999 au cours de l'année de commémoration du centenaire de *L'École de NANCY*[33]. Conscients de préparer leurs élèves à la complexité d'un monde mouvant et ouvert, les directeurs de l'École des mines de Nancy, de l'ICN (école de commerce) et de l'École nationale supérieure d'art de Nancy [34] tentèrent de concrétiser le rapprochement naturel entre ingénierie, commerce et management, et *art*. Il déposèrent un manifeste fondateur en préfecture de Nancy le 31 mai 1999 [Cremet2005]. Initialement intitulé ATM, pour art, technologie et management,le projet Artem fédéra rapidement universités nancéiennes et collectivités locales. En parallèle du projet pédagogique et immobilier, le plan Armée 2000 avait libéré une emprise qui allait devenir le futur campus Artem, Artem cherchait aussi à développer des projets de recherche. C'est dans ce contexte que Claude Burlet m'avait *passé commande*.

Claude Burlet me connaisssait depuis longtemps. Il était enseignant d'histologie en PCEM1 à la faculté de médecine de Nancy et donnait des cours sur le comportement alimentaire en certificat de psychophysiologie. L'aventure du MEDES nous avait rapprochés. Il avait suivi mon projet de thèse comme médiateur constructif. Il connaissait aussi les projets qui m'avaient permis de retrouver un statut d'ingénieur expert à l'INRIA Lorraine, mon intérêt pour les sciences, les techniques et les humanités, et mon engagement dans le monde aéronautique.
L'année 1999, si elle avait été compliquée, n'en avait pas été moins active. Alternant ma thèse et les enseignements à la CNQAOS dans ce que je qualifierais pudiquement de statut *d'intermittent de la recherche*, j'étais dans l'obligation de recherche active d'emploi. Deux candidatures m'avaient valu des entretiens. Le premier avait eu lieu chez Général Electric medical systems ("healthcare" aujourd'hui) au centre de développement de Buc, en région parisienne, le second avait eu lieu à Saint-Denis dans une brasserie qui faisait suite à un long échange téléphonique avec Guy Boy. Après une formation d'ingénieur à Toulouse, Guy Boy avait travaillé à l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA) et à la NASA au Ames Research Center dans la *Aerospace Human Factors Research Division*. De 1988 à 1991 il avait était le responsable du *Advanced Interaction Media*

32. Claude Burlet était à cette époque président de l'Université Henri Poincaré Nancy1 et vice-président du Pôle Européen de Santé

33. Appelée aussi *"L'alliance provinciale des industries d'art"*.

34. Claude CREMET, directeur de l'ENSMN ; Serge Vandémini, directeur de l'ICN École de Management ; Patrick Talbot directeur de l'ENSAN.

Group et travaillait sur la documentation électronique embarquée dans la navette spatiale. Il était revenu à Toulouse en 1992 pour créer une structure originale : L'Institut européen de l'ingénierie et des sciences cognitives (EURISCO) [35]. EURISCO était une association dont les principaux membres institutionnels étaient Airbus, Thales-Avionics et l'ONERA. Elle était présidée par Jean Pinet, ancien pilote d'essai responsable des essais «Qualité de Vol» du Concorde dont il avait était le premier co-pilote aux côtés d'André Turcat en 1969. Au-delà d'une passion commune pour le ski, nos échanges sur l'intelligence artificielle et l'interaction homme-machine se révélèrent passionnants et passionnés, comme pour l'activité artistique, le design et toutes les formes de création humaines en général. Guy Boy cherchait le responsable du développement d'une plate-forme de simulation et d'essai pour les recherches en ingénierie cognitive et facteurs humains d'EURISCO. Je ne disposais pas de compétences de développeur informatique et ne pouvais quitter Nancy du fait de ma compagne. Il fut convenu de reprendre contact autour d'un projet de recherche à partager.

Un appel à projets de l'ACI Cognitique "Action" du Ministère de la recherche autour des liens intrinsèques entre perception et action permit d'initier cette collaboration. Une petite phrase précisait que les partenariats avec des équipes en sciences humaines seraient les bienvenues. Guy Boy proposa de travailler sur le concept *d'affordance* [36] et son importance pour la conception des interfaces humain-machine. Un des thèmes centraux de ma thèse était l'esthétique de la connaissance [37]. Les deux thèmes se rejoingnaient. Il s'agissait d'explorer l'importance de l'esthétique dans la conception des éléments d'interaction des cockpits d'avion, en particulier le lien avec la conscience de la situation et du risque [Endsley1995]. Pour une étude pertinente nous avions besoin de praticiens de l'esthétique. Il fut décidé d'y associer des enseignants de l'École nationale supérieure d'art de Nancy. Daniel Corniaut, de *Camera Virtuosa*, fut associé au projet avec un de ses jeunes collègues qui devait nous fournir des élements d'histoire de l'art, en particulier sur les tentatives d'esthétique raisonnée du peintre Nicolas Poussin. La dotation du projet financa mon poste d'ingénieur expert INRIA. Je finissais ma thèse et je redevenais lisible institutionnellement, d'autant que Claude Burlet connaissait ce projet de recherche qui s'apparentait sans le savoir à Artem.

L'année 2003 a été marquée par deux actions : un projet de recherche CNRS consacré aux *suppléances perceptives* et le développement d'un projet de recherche fédérateur Artem, et le montage, comme partenaire, du projet Européen CRAFT 6FP : *DRIVESAFE*.

L'ensemble des rencontres avec les partenaires potentiels du projet Artem commença avec l'aide de jean-Paul Haton : Hélène Kirchner, directrice du LORIA INRIA,encourageante, Frédéric Alexandre et Karl Tombre, il s'agissait de valider le positionnement et le champ scientifique du projet. Je rencontrai le directeur de l'École d'art de Nancy, Marc Thébault, et Christian Debize, reponsable du département Communication et Design graphique

35. Devenu EURISCO International SAS en 2002, avec pour actionnaires Airbus, Thales-Avionics et le Groupe Aéroconseil

36. Affordance est un concept formé par le psychologue écologiste américain James Gibson [Gibson1977]. Il fait référence aux propriétés de l'environnement qui permettent aux individus d'une espèce donnée, adaptés à une niche écologique donnée, de percevoir des éléments de l'environnement induisant une ou des actions adaptées. Le concept d'affordance fut repris et diffusé à la communauté de l'interaction homme-machine en 1988 par Donald Norman [Norman1988]. Norman fit par la suite le lien avec le design des artefacts physiques ou numériques.

37. Esthétique : science des sensations, ce qui est matière à connaissance (selon sa défintion historique).

avec l'aide de Daniel Corniaut, ensuite, par le truchement Karl Tombre, Jean-Claude Duriez directeur de l'École des mines ; puis avec Jean-Claude Crémet ancien directeur de l'ENSMN et responsable de la mission Artem et enfin, Thomas Froelicher, directeur de l'ICN École de Management, avec l'aide de Jean-Claude Rouer, Pdg de Clarion et Président d'Artem Entreprises. Avec Jean-Paul Haton j'avais aussi rencontré au printemps 2004 Patrick Alnot, Vice-président du Conseil scientifique de l'Université Henri Poincaré pour lui présenter le projet. Le projet prenait forme. En septembre une première revue pluridisciplinaire associa : Hélène Kirchner, Claude Burlet, Claude Crémet, Jean-Claude Duriez, Thomas Froelicher et Christian Debize. Les participants validèrent le fond du projet sous réserve d'une mise en forme affinée et d'un plan de financemnt prévisionnel triennal. et me demandèrent d'affiner la mise en forme et de présenter un plan de financement prévisionnel triennal. Le 22 septembre 2004 le projet était présenté et validé devant le comité des projets de la mission Artem [38] après une expertise confiée à Jean-Louis Morel, Vice-président du Conseil scientifique de l'Institut polytechnique de Lorraine (INPL), par Louis Schuffenecker président de l'INPL. Fin novembre 2004 Jean-Pierre Finance, président de l'université, affirma l'engagement et le soutien de l'Université Henri Poincaré dans ce projet de recherche et de transfert Artem.

Le projet avait été jugé très ambitieux. Il était en phase avec les objectifs stratégiques scientifiques, académiques et sociétaux du rapport prospectif du World Technology Evaluation Center intitulé *Converging Technologies for Improving Human Performance : Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science* [Bainbridge2003], même si ses fondements idéologiques était différents. Dans cette démarche de conception fédératrice et d'évaluation pluridisciplinaire le projet de recherche et de transfert "Sciences intégratives de l'interaction : ingénierie, design et management" devint ainsi le premier projet de recherche, et le seul encore à ce jour, officiellement labellisé Artem.

En août 2005 l'action de recherche Artem prit définitivement l'intitulé : ***L'homme augmenté : aide à l'action et organisation***. Sur la demande de la direction de la recherche du Conseil régional de Lorraine, j'avais développé un plan d'action triennal issu du projet initial, qui proposait des objectifs de transfert et d'application des systèmes d'aide à l'action, en particulier aux gestes techniques, pour les domaines de l'aérospatial, de la santé, et des systèmes *critiques* en général. Il s'appuyait sur un objectif scientifique général unique transversal : **rechercher une théorie de l'organisation intégrative du couplage système biologique, système physique pour « l'homme augmenté »**.

Le thème de recherche et développement sur ***l'homme augmenté*** a émergé au cours de l'année 2004 dans le cadre d'une réunion du Pôle "Ingénierie de l'interaction et facteurs humains" du Centre national de recherche et technologie - Aéronautique et Espace (CNRT-AE) [39], organisé en groupes de travail. Je participais au groupe « Automatisation

38. Le comité des projets Artem était composé de : Claude Cremet, ancien directeur de l'École des Mines, chef de la mission Artem ; Joel Hardy, ancien Président de l'INPL, chargé de mission Artem ; Louis Schuffenecker, président de l'INPL ; Herbert Néry, président de l'Université Nancy 2, Marc Thébault, directeur de l'École nationale supérieure d'art de Nancy ; Jean Claude Duriez, directeur de l'École Nationale supérieure des Mines de Nancy ; Thomas Froehlicher, directeur général de l'ICN, École de Management de Nancy

39. A l'invitation de Guy Boy, j'étais membre du Pôle "Ingénierie de l'interaction et facteurs humains" du CNRT-AE depuis mai 2002. En 2005, l'INRIA, qui venait d'adhérer à ma demande au CNRT-AE, et son directeur des relations industrielles, Gérard Girodon, me désignèrent comme leur représentant dans le CNRT-AE. Par la suite, l'INRIA fut naturellement impliqué dans la création du Pôle de compétivité Aérospace Valley (pôle mondial) qui

» que j'animais avec Guy Boy et Xavier Chalondon de Dassault Aviation et avec lesquels j'avais élaboré les grandes lignes du projet PAUSA (Partage d'autorité dans le système aéronautique). J'assumai également la responsabilité du groupe de travail sur l'activité spatiale humaine dont l'un des objetifs était de favoriser des synergies entre l'aéronautique et le spatial. Il s'agissait de concevoir et développer des vêtements et accessoires intelligents et interactifs (*wearable interfaces, smart wear* et accessoires) pour le support opérationnel du spationaute, de l'opérateur de maintenance aéronautique ou du pilote de chasse.

Le projet de recherche Artem démarra officellement le 1 janvier 2005. Il reposait sur une convention de recherche quinquennale signée entre le LORIA - INRIA Lorraine et ICN École de management. Je fus embauché par l'ICN, détaché au LORIA INRIA pour conduire le projet de recherche et pour développer des activités pédagogiques innovantes à ICN et dans le périmètre Artem. J'y animai de 2006 à 2008 un Atelier Artem intitulé « Réalité augmentée » avec l'École d'art et depuis 2008 un Atelier avec Artem Entreprise intitulé intialement « Entreprises : le défi numérique », puis « Innovative Corp. 3.0 » et « l'humain augmenté » aujourd'hui. Dans le cadre de cette mission, je participai en 2005 à l'Atelier Artem « Aéronautique » à l'École des Mines et j'y encadrai par la suite des élèves de deuxième et troisième années pour des projets d'initiation à la recherche avec ses départements *informatique* et *matériaux*. A la demande d'Abdel Belaïd, responsable de la filière Sciences Cognitives de l'Université Nancy 2, je conçus en 2004 un module *artémisé* du master 2 de Sciences cognitives et application intitulé "Esthétique de l'interaction", dans lequel j'enseigne depuis lors.

Début 2005, le projet Artem occupa un espace de l'incubateur INRIA nouvellement inauguré et je fus rattaché à la direction du LORIA INRIA.

Je participai à plusieurs projets scientifiques et industriels nationaux ou européens comme concepteur, responsable de tâches ou comme expert, ce qui me procurait alors une autonomie financière pour mes budgets de fonctionnement : achat de matériel expérimental, embauche de stagiaires, de post-doctorants ou d'ingénieurs de développement. Mais malgré mes efforts, je restai isolé dans un entre-deux institutionnel. Du fait mon projet de recherche Artem à vocation pluridisciplinaire j'étais souvent, à mon insu, qualifié d'*électron libre*. Sans doute les électrons libres participent-ils aux liaisons chimiques fortes à l'origine des plus belles organisations cristallines stables ou des molécules complexes à l'origine de la vie, mais c'était inconfortable.

Gilbert Chauvet est mort un jeudi, le 6 décembre 2007. Nous avions évoqué, quelques jours avant, l'extension de son travail à l'ingénierie par un projet destiné à montrer l'intérêt de la MTIP pour **définir et valider des principes de l'intégration homme système et l'ingénierie de conception des systèmes *humain dans-la-boucle***[40].
Ayant lu, presque par hasard, son livre *La vie dans la matière : le rôle de l'espace en biologie*, éclairé par ses écrits, comme je l'avais été par les ouvrages et les articles de Gérald Edelman, de Boris Cyrulnik ou de Henri Laborit, j'avais amorcé une correspondance avec lui. Il m'avait adressé une sélection de ses principales publications. A la fin de l'année

remplaçait et étendait l'activité du CNRT-AE.

40. "human in-the-loop systems" (HITL) en anglais.

2001, Gilbert Chauvet m'avait reçu dans un bureau austère sous les toits de l'hôpital Tarnier-Cochin, une rencontre civile mais âpre, quand je lui avais exposé mon projet de recherche et l'apport de son travail en physiologie théorique pour ma réflexion. En réponse, il m'avait conseillé de préparer une licence de mathématique.

Je l'ai pourtant sollicité à nouveau début 2003, thèse soutenue ; je préparais une participation à l'Action spécifique CNRS *Suppléance perceptive et interface"*. J'organisai la dernière journée de travail de l'Action en novembre à Nancy. J'étais parti d'une idée sur «connaissance et perception : le point de vue du médecin réanimateur». Mais le questionnement sur la phénoménologie de la perception et les interfaces de suppléance m'avait conduit à proposer une journée autour des environnements virtuels pour l'aide à l'action et sur la nécessité de fonder la recherche d'une ergonomie théorique de ces sytèmes, telle qu'initialement prévue dans le projet, sur des principes théoriques vérifiés formellement et validés expérimentalement. J'organisai la journée en deux parties : présentation d'un cadre théorique pour décrire le système biologique et ses fonctions dans laquelle Gilbert Chauvet devait présenter sa théorie mathématique de la physiologie intégrative. La seconde partie devait démontrer comment, en s'appuyant sur le cadre théorique de la MTIP [Chauvet1993a] [Chauvet1993b] [Chauvet1993c] et de l'intégration humain-artefacts, il était possible de modéliser *l'interaction humain-machine* et de valider expérimentalement ce modèle en perspective d'applications à l'aide au geste technique ou au handicap. Je lui avais adressé en amont un exemplaire de mon mémoire de thèse pour lui montrer le lien entre ses recherches en biologie théorique et les miennes, ce qui nous conduit à travailler ensemble régulièrement. Mes travaux ouvraient des perspectives inattendues à la MTIP tant du point de vue scientifique qu'industriel, ce que Gilbert appela *l'homme étendu* dans son dernier ouvrage grand public [Chauvet2006].

Au cours de nos échanges et de ses différents séjours à Nancy, il m'a aidé à mieux comprendre la MTIP et à formuler les exigences scientifiques de mon projet, la motivation profonde de mes recherches, la nécessité de **fonder les principes de l'intégration humain système et de *l'homme augmenté* sur des principes théoriques vérifiés, dans un cadre épistomologique renouvelé, pour en dégager une méthodologie et des règles de conception valides et robustes**.

La théorie mathématique de la physiologie intégrative (MTIP) de Gilbert Chauvet - 1.
Cette théorie, qui constitue d'abord un cadre conceptuel, examine l'organisation hiérarchique des structures (c'est à dire l'anatomie) et les fonctions (c'est à dire la physiologie et le comportement) des systèmes vivants. Elle permet la recherche de principes d'optimalité assurant l'organisation fonctionnelle et sa dynamique.
La MTIP introduit plusieurs principes : la hiérarchie fonctionnelle, fondée sur l'organisation structurale en échelles d'espace, l'organisation fonctionnelle en échelles de temps et les unités structurales que sont les éléments anatomiques dans l'espace physique, du moléculaire à l'organisme. Pour remédier au problème de la discontinuité structurale elle introduit le concept d'interaction fonctionnelle ψ générée par une structure - source s vers une strucuture - puits S comme élément de couplage entre les fonctions physiologiques assurées par ces structures.
Ce shéma ne correspond pas à une interaction classique telle qu'on l'aborde en physique. Ici les interactions fonctionnelles présentent à chaque niveau d'organisation, trois propriétés fondamentales : non-symetriques, elles conduisent à une représentation par à un graphe non-orienté ; non-locales, elles induisent des champs non-locaux ; enfin en couplant deux éléments hiérarchiques structuraux, elles augmentent la stabilité fonctionnelle du système vivant.
Du fait des contraintes de la hiérarchie structurale, Gilbert Chauvet a choisi une représentation qui conduit à des concepts biologiques spécifiques et il a énoncé l'hypothèse qu'un système biologique peut être représenté mathématiquement par un ensemble d'interactions fonctionnelles du types $s \xrightarrow{\psi} S$.
Ici la question principale est de déterminer s'il existe une cause à l'existence des interactions fonctionnelles, c'est à dire à l'ensemble des triplets $s \xrightarrow{\psi} S$? Et en ce cas quelle pourrait être l'origine de l'existence (de l'identification) de s, S et ψ qui forment ensemble un composant $s \xrightarrow{\psi} S$ du système ?
Le principe d'auto-association stabilisatrice (PAAS) [Chauvet1993a], qui constitue le principe fondamental de la MTIP apporte selon Chauvet une réponse : pour chaque triplet ($s\psi S$), noté $s \xrightarrow{\psi} S$, où s est le système - source, S le système - puits et ψ l'interaction fonctionnelle, le domaine de stabilité du système $s \xrightarrow{\psi} S$ est plus large que les domaines de stabilité de s et S pris isolément. En d'autre termes, l'accroissement de la complexité du système $s \xrightarrow{\psi} S$ correspond à une stabilité accrue.
La MTIP consiste en une représentation : l'ensemble des interactions fonctionnelles $s \xrightarrow{\psi} S$), un principe d'organisation général - le PAAS, et une hypothèse - tout système biologique peut être décrit comme un ensemble d'interactions fonctionnelles et d'unités structurales (sources, puits, non-localité, non symétrie et opérateur de champ). La représentation formelle d'un système biologique présente deux faces : l'organisation fonctionnelle du système biologique formel (O-FBS) [Chauvet1993b] et la dynamique du système biologique formel (D-FSB) [Chauvet1993c].

La théorie mathématique de la physiologie intégrative (MTIP) de Gilbert Chauvet - 2.
L'organisation fonctionnelle du système biologique formel - *O-FBS*, concerne les propriétés combinatoires des interactions fonctionnelles élémentaires (sources, puits et leurs interactions) ; leur nombre correspond au degré d'organisation de la structure. Ce système biologique formel peut être représenté par un graphe hiérarchique qui en modélise la topologie.
La dynamique du système biologique formel - *D-FBS*, porte sur l'expression formalisée du processus dynamique, l'évolution dans le temps et dans l'espace du produits émis par une source, qui agit à distance sur un puits. La localisation des sources et des puits et la distance qui les séparent a un effet sur le délai mis par le signal pour atteindre le puits. Ainsi la géométrie du système biologique, que cette représentation inclut, influe sur la dynamique du processus : l'action spatio-temporelle d'une unité de structure sur une autre.
Interagissent ainsi quatre types de contraintes sur les phénomènes physiologiques : la double hiérarchie structurale et fonctionnelle, la *géométrie* du système, c'est à dire l'anatomie et l'histologie qui décrivent l'organisation et la répartition spatiale des structures, lesquelles induisent des retards dans la transmission des interactions fonctionnelles ; les *discontinuités structurales* qui séparent physiquement les processus physiologiques ; et le *continuum spatio-temporel* dans lequel évoluent ces processus.
La formalisation de cette relation fondamentale, entre l'organisation structurale et l'organisation fonctionnelle, permet une représentation en trois dimensions des systèmes biologiques.
L'existence de principes généraux à l'origine de cette organisation fonctionnelle et de l'unicité du système biologique comme système hiérarchique se fondent sur deux hypothèses formulées par Chauvet : d'une part, l'hypothèse d'autoassociation qui détermine l'existence des interaction fonctionnelles du systèmes biologique et assure la stabilité topologique de leur organisation ; d'autre part, l'hypothèse optimale qui définit le système biologique comme la forme représentant le plus grand potentiel d'organisation. L'hypothèse optimale est à l'origine de l'organisation hiérarchisée des interactions fonctionnelles, dans laquelle l'ordre fonctionnel augmente toujours, le système s'auto-organisant de telle sorte que s'accroisse son domaine de stabilité et en même temps son ordre fonctionnel.

La MTIP de Gilbert Chauvet fournit un cadre conceptuel permettant la recherche des principes d'optimisations de l'organisation fonctionnelle et sa dynamique. Appliquée à la conceptualisation de l'homme augmenté (voir annexes, page 141), elle fournit un cadre de conception de l'humain machine permettant la recherche de l'organisation structurale et fonctionnelle optimale des systèmes artificiels cyber-physiques bio-compatibles et bio-intégrables, et induisant la stabilité topologique d'ensemble du système organisé ou étendu pour accroitre le domaine de stabilité et l'ordre fonctionnel du système humain machine intégré.

2.5 Vers l'infini et au delà.

Les systèmes sécurité-critique : Le systèmes sécurité-critique, à savoir les systèmes dont une défaillance peut être cause de mort ou de blessures, de nuisance(s) à l'environnement ou de perte économique, sont de plus en plus complexes quant aux types de services qu'ils fournissent et quant à leur manière d'intéragir avec l'environnement [Bozzano and Villafiorita2010]. Nous pouvons distinguer trois catégories de systèmes sécurité-critique selon leur niveau de risque associé : non-interruptibles, semi-interrruptibles et interuptibles. Par essence, un système est considéré comme non-interruptible pendant le temps d'opération ou d'activité. Toutefois certains systèmes peuvent être considérés comme interruptibles. Ce sont des systèmes dont la défaillance ou la discontinuité fonctionnelle n'entraîne pas de risque direct (exemple : une panne moteur sur une automobile permet quand même d'arrêter en maîtrisant la trajectoire et le freinage du véhicule).
Le caractère interruptible dépend du domaine d'utilisation (grand public, industriel, défense, aérospatial) et de la phase ou de l'état de fonctionnement du système. Une panne moteur sur un avion n'a pas les mêmes conséquences au parking, au roulage, au décollage, en approche ou en route. Les systèmes semi-interruptibles sont des systèmes qui en cas de panne permettent de ramener le système d'un état dynamique à un état statique de sécurité. Les systèmes résilients, qui sont une catégorie particulière de systèmes semi-interruptibles, font l'objet de nombreux projets de recherches et de développement dépendant de propriétés techniques comme la ségrégation, la redondance et l'auto-réparation ou cicatrisation [Fass2009], de propriétés liées aux opérateurs humains comme la formation, l'entraînement, l'expertise et même la créativité, et enfin de propriétés organisationnelles liées à l'autonomie face aux normes, à la qualité des procédures de récupération, à une réglementation prennant en compte les situations limites et enfin aux ressources de soutien humain et technique disponibles. Il existe deux autres classes de systèmes critiques : les systèmes mission critique (domaines des affaires et de la sécurité défense) et les systèmes vie-critique (dans le domaine de la santé et tous les secteurs nécessitant des dispositifs *support vie*).
Notons que les systèmes spatiaux des vols habités et d'activités spatiales humaines sont des systèmes sécurité, mission et vie critiques. Ces trois dimensions sont intégrées. Pour cette raison l'aérospatial demeure exemplaire dans la prise de risque et de la gestion des risques. Le projet s'inspire de cette culture. En proposant un cadre de conception intégrative, il échappe à la dichotomie des philosophies de conception centrées sur la technique en opposition à celles centrées sur l'humain.

La mort de Gilbert Chauvet a signifié pour moi la perte d'un ami et d'un mentor. Sa rigueur mathématique, sa précision de physicien et son attention de médecin me stimulaient. Il avait vu combien mes travaux avaient besoin d'une rigueur épistémologique et formelle pour aborder la question des facteurs humains dans la conception des systèmes artificiels dans un mode plus robuste. Nous avions en commun une conception des sciences de la vie et une exigence médicale. La théorie et l'application n'étaient jamais très loin. Elles formaient un couple vertueux.

L'année 2008 a été une année de solitude. Je n'avais plus d'interlocuteur attentif. L'exigence épistémologique d'une théorie de l'intégration humain système touchait peu mes

partenaires du projet PAUSA et je me confrontais aux dogmes de l'ingénierie et de la psychologie cognitive.

Heureusement, les espaces de détente avec leurs machines à café sont des endroits merveilleux pour les interactions dans les organisations humaines comptemporaines. Fin décembre 2007, j'y eus un échange riche et attentif avec Dominique Méry, responsable de l'équipe MOSEL du LORIA dont j'avais suivi les enseignements au DEA d'informatique en 1992. Nous avions échangé quelques mots sur le lien entre sciences fondamentales et appliquées à la suite des journées académiques de l'Association française d'ingénierie système (AFIS) organisées en novembre 2007 à Nancy [41].
Dominique Méry m'offrit une écoute attentive et constructive. Début novembre 2007, des partenaires du département ingénierie d'Airbus m'avaient confirmé le projet de recherche et de thèse qu'ils souhaitaient me voir encadrer sur le thème de l'intégration humain-machine, sa modélisation et sa simulation. Les budgets étaient sécurisés. Le thésard était embauché en CDD en attendant de régler les questions administratives.
Dominique Méry souhaitait faire aboutir le projet de thèse Airbus [42]. Sa curiosité scientifique s'associa à mon exigence scientifique de **preuve formelle pour la construction correcte de modèles**. Nous partagions un même questionnement quant au développement d'**une science des systèmes, la recherche de principes généraux des systèmes et les principes spécifiques d'organisation et de modélisation prédictive des systèmes artificiels**. Il développait avec son équipe des recherches théoriques sur les méthodes formelles appliquées aux systèmes informatiques, il s'intéressait aussi à la modélisation sûre des systèmes médicaux comme le pacemaker et plus généralement aux méthodes de conception sûres des systèmes sécurité-critiques intégrés ou interagissant avec l'humain.

Début septembre 2009, j'intégrais l'équipe MOSEL. Mi-novembre, la thèse CIFRE démarrait officiellement avec Airbus.

Au cours de ces années le domaine de la santé n'avait jamais été éloigné de mes préoccupations scientifiques ou de mes champs d'application. Je développais depuis quelque temps une réflexion et un travail sur la modélisation de la physiopathologie du choc septique et l'automatisation de l'injection d'amines vasopressives en réanimation avec Bruno Lévy [43]
Mes liens avec l'odonto-stomatologie n'avaient jamais été totalement rompus. J'étais toujours inscrit au tableau de l'ordre des chirurgiens-dentistes de Meurthe et Moselle (je le suis encore). Mon directeur de thèse d'exercice, Daniel Rozencweig, était devenu un ami. À sa demande, fin 2007, j'avais accepté de clore les XXVI$^{\text{ièmes}}$ journées internationales du collège national d'occlusodontie (CNO) qu'il devait présider en 2009 à Nancy. J'avais

41. Paradoxalement, j'avais été invité à participer à ces journées comme intervenant sur recommandation d'un ingénieur d'Airbus à Toulouse.

42. Membre du Bureau de l'Association ARES Lorraine (armée recherche économie et science), son délégué général, le Général (2s) Jehan-Benoit Cassagnou, me présenta en 2006 Christophe Ducamp, reponsable d'ingénierie chez Airbus, aujourd'hui chez Eurocopter. Après plusieurs rencontres et discussions à Nancy et Toulouse, Christophe Ducamp me demanda d'échanger avec des collègues d'Airbus, qui, confrontés à des problèmes de conception de systèmes homme dans-la-boucle, ne trouvaient pas de solution avec les méthodes de l'ergonomie et de l'ingénierie cognitives...

43. Bruno Lévy est professeur de médecine, cardiologue réanimateur et chef de service adjoint du service de réanimation médicale du Centre du cœur et des vaisseaux du CHU de Nancy Brabois. Il dirige l'équipe *Chocs, insuffisance cardiaque : mécanismes cardiovasculaires et traitements* de l'unité INSERM 1116.

obtenu la bourse de recherche du CNO en 1991. Daniel Rozencweig suivait mon parcours depuis vingt ans. Il souhaitait que je présente le potentiel d'innovations, de recherches et de développements possibles pour l'odontologie et l'occlusodontie dans la perspective de mes recherches, situées entre sciences biologiques et sciences et ingénierie des systèmes. Cette conférence eu lieu en mars 2009.

J'avais parallélement repris un dialogue avec Pierre Bravetti, doyen de la faculté d'odontologie de Nancy, aujourd'hui directeur du Collegium Santé de l'Université de Lorraine. Nous avions travaillé ensemble dans le département de Parodontologie et implantologie alors qu'il était assistant. Nous nous étions déjà rétrouvés autour d'un projet de thèse d'exercice dont le sujet était *l'intérêt de la robotique en implantologie orale*. Si l'étudiant était ordinaire, nos échanges avaient été fructueux. Pierre connaissait mon parcours et mes ambitions. Tout comme l'avait fait, dans les années 1990 Gérard Martin décédé depuis, puis Gilbert Chauvet, Jean-Paul Haton, Dominique Méry ou Bruno Lévy, il m'encourageait à poursuivre mon parcours hétérodoxe dans la perspective *virtuelle* d'un poste universitaire et pourquoi pas hospitalier...

Cette perspective de retour à Ithaque m'encouragait à poursuivre mon parcours. Il était donc temps de m'engager dans le processus d'habilitation à diriger des recherches. Durant ces années j'avais patiemment accumulé les artifices et les expériences scientifiques pour les assembler, poursuivre et décrire mon projet de recherche. Il fait l'objet de ce présent document.

Si le rédaction d'un mémoire d'habilitation à diriger des recherches n'est pas une *sinécure* pour les parcours et les projets monodisciplinaires classiques, elle devient un véritable casse tête pour décrire un parcours hors des sentiers battus et un projet *hyperdisciplinaire*[44] comme le mien. Agencer chacune des parties relativement aux disgressions disciplinaires et aux transgressions professionnelles[45], unifier les syntaxes et les sémantiques en un tout cohérent, lisible et compréhensible est une gageure. Les premières relectures, en particulier de mon parrain du domaine de la santé, agirent sur moi comme une douche froide. Le texte intitial de la section d'introduction du chapitre consacré à l'état de l'Art était trop synthétique et aride, en un mot : *illisible*.

Il fallait donc reprendre en profondeur les éléments du texte apparaissant comme hermétiques, voir obscurs à un lecteur non averti, même de bonne volonté. Il fallait définir clairement les concepts présentés dans ce document pour assurer leur ancrage historique et leur clarté afin d'articuler chacuun de ces éléments en un tout cohérent et accessible.

La recherche scientifique, activité libérale, contingente et poétique de la nature, s'incrit dans un temps long [Stengers2013].

Le chemin fut en l'espèce à nouveau plus long qu'initialement prévu. Le travail de thèse que je co-encadrais avait pris une nouvelle direction, plus méthodologique dans le champ de l'ingénierie système, et le thésard n'avait montré en définitive qu'une aptitude moyenne

44. L'utilisation d'un mot nouveau marque l'écart avec la notion de transversalité qui désigne une organisation horizontale de domaines de connaissances séparées. Le néologisme marque la continuité, la complémentarité et la valeur supérieure de l'intégration des connaissances issues de domaines dont la séparation arbitraire et plane est essentiellement que philosophique et académique.

45. À moins que ce ne soit l'inverse.

à explorer le champ des questions théorique et expérimentale de l'intégration humain systèmes. Après cinq années d'effort, la soutenance de cette thèse eu enfin lieu en novembre 2013.

Mon rattachement institutionnel et son lien avec un champ académique éloigné de ma culture et de ma pratique, nécessitait de ma part de nombreux efforts pour assurer le respect de mes engagements professionnels, ma cohérence et mon identité. Le projet Artem, d'une philosophie et d'une pédagogie de la complexité, était devenu essentiellement institutionnel, un prétexte ou au mieux une opportunité, alors qu'il demeurait au coeur même de mon engagement et de mon projet.

Il fallait donc que je résiste à la schizophrénie dans laquelle certains normatifs rêvaient de me voir tomber [46]. Je ne cédai d'ailleurs jamais à la tentation de la facilité intellectuelle de ne pas critiquer les dogmes dominant dans lesquelles une chatte ne retrouverait pas ses petits et où l'on confond souvent système complexe et science générale des systèmes, approche *globale* et totalitarisme, créativité et identité, grenouille avec citrouille, etc.

À partir de mes premiers travaux de recherche pratiques et expérimentaux et devant les nombreux paradoxes philosophiques et métaphoriques des sciences cognitives et leur application aux facteurs humains et à l'ingénierie système, je m'étais donc peu à peu engagé dans une recherche critique de plus en plus théorique et abstraite sur le thème de l'intégration humain systèmes. Sur les bases de cette reflexion et devant la nécessité de fondements théoriques robustes pour l'ingénierie des *systèmes humain dans-la-boucle* et de l'intégration humain systèmes, j'organisai en juillet 2011 une session dans la conférence internationale «Human computer interaction». Ce fut pour moi l'opportunité de renforcer mes échanges avec des chercheurs du département «Commande des systèmes et dynamique du vol» de l'ONERA Salon de Provence et de créer un lien avec Brian Gore, chercheur à la division «Human systems integration» du Ames research center de la Nasa. Parallèlement j'avais eu confirmation que ma démarche épistémologique et scientifique attirait l'attention du domaine «Homme et Systèmes» de la Direction générale de l'armement (DGA).

C'est dans ce contexte d'échanges, de propositions et de collaborations que je formulai la question fondamentale à laquelle aujourd'hui mon projet de recherche se propose de répondre : «**Quelle est la nature de l'humain machine ?**».

Attendu que la conceptualisation et l'abstraction scientifique de *l'humain machine* [47] nécessite une compréhension précise du domaine de l'humain [48], du domaine de la machine (ou de l'artifice et des artefact) et du domaine de l'intégration humain systèmes sans tomber dans un réductionnisme stérile de l'humain (du biologique) à la machine mécanique ou computationnelle automatique (machine universelle de Turing ou machine de Von Neumann), j'entrepris à nouveau une démarche épistémologique critique et la re-lecture des textes fondateurs de la biologie théorique, de la science des systèmes, de la cybernétique, de la science des modèles, de l'informatique et de l'intégration humain systèmes.

46. Certains auraient même désiré me voir faire de la recherche en gestion à mon corps défendant.

47. Nous avons choisi de ne pas placer de trait d'union entre les mots humain et machine pour échapper au risque sémantique de la confusion de nature.

48. Comme le souligne Gerald Edelman [Edelman2006] la séparation des sciences et des humanités, de la biologie et de l'anthropologie et plus généralement entre sciences *dures* et sciences humaines est un arbitraire académique et philosophique qui date de la moitié du 19ème siècle. Cette séparation du biologique et de l'historique n'est plus la question si l'on veut comprendre l'individuation ou de l'hominisation. Du biologique à la technologie et au symbolique il n'y a pas de discontinuité comme le soulignait André Leroy-Gourhan [Leroy-Gourhan1964].

L'enjeu n'était plus d'expliquer ou d'interpréter par mimétisme ou parodie les systèmes de natures différentes dans un ou des modèles les réduisant ontologiquement l'un et l'autre à leurs propriétés ou fonctions physiques et logiques présupposées ou postulées. Il était donc question de produire un cadre isomorphique de connaissance, de description et d'organisation fondé sur des principes intégratifs de construction ou d'ordonnancement, de mise en mouvement et en interaction «vérifiables» formellement et expérimentalement.

L'objet de ce cadre organique épistémologique et pragmatique [Fass2012], *squelette conceptuel et de conception* de «l'humain machine», est d'assurer simultanément i) la stabilité de l'architecture - l'assemblage et l'ordonnancement d'éléments structurels de natures différentes dans l'espace, ii) la stabilité et la fiabilité du comportement - les variations des formes dans la dynamique du système, et enfin iii) la stabilité de l'évolution - dans la dynamique des interactions physiques, logiques et biologiques naturelles et artificielles, internes et externes au système humain machine intégré dans l'environnement biotique, abiotique, socio-technique et socio-culturel. Le but est donc d'assurer la cohérence du système intégré humain machine et donc d'assurer *in fine* sa stabilité fonctionnelle et sa sûreté de fonctionnement.

La recherche et la validation de ce cadre de conception et de ses principes de construction naturels, physiques ou physico-chimiques, logico-symboliquess et biologiques, nécessite donc une épistémologie renouvelée : une épistémologie intégrative de *l'humain machine*. Ce cadre de description et de conception intégratif doit garantir par construction la consistance théorique et expérimentale des modèles de l'humain machine à ses différents niveaux d'échelle, des systèmes intégrés dans le corps aux systèmes humain machine mis en oeuvre dans les systèmes socio-techniques et à ces macro-systèmes eux-mêmes. Telle est la finalité de notre projet de recherche.

Dans les instants de doute et de découragement, j'avais eu la tentation du retour à l'utilité immédiate : soigner des personnes ; je me retrouve aujourd'hui à rédiger mon habilitation à diriger des recherches. De nouvelles perspectives s'ouvrent à moi, non plus seulement entre art, sciences, techniques et management comme dans le projet Artem, mais bien ancrées dans les liens féconds entre sciences médicales, ingénierie, technologies et sciences de l'organisation et des systèmes, où l'art n'est jamais très loin.

De l'art dentaire à la bio-ingénierie homme-systèmes, mon parcours professionnel est un chemin de recherches et d'humanités, une quête de cohérence épistémologique, théorique et technologique. C'est ici l'origine du projet ***l'homme augmenté***.

Bibliographie

[Affairs *et al.*2009] P.G. Affairs, I. Medicine, E.P.P. Committee on Science, N.A. Sciences, and N.A. Engineering. *On Being a Scientist : : A Guide to Responsible Conduct in Research : Third Edition.* National Academies Press, 2009.

[Arendt1972] Hannah Arendt. *La crise de la culture.* Éditions Gallimard, 1972.

[Ashby1957] W. Ross Ashby. *An introduction to cybernetics.* Chapman & Hall, London, 1957.

[Bainbridge2003] William S. Bainbridge, editor. *Converging Technologies for Improving Human Performance : Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science*. Springer, 2003.

[Bassingthwaighte2000] James B. Bassingthwaighte. Strategies for the physiome project. *Annals of Biomedical Engineering*, 28 :1043–1058, 2000.

[Bellick1991] Yacine Bellick. Interface de dialogue multimodal. Rapport de DEA, LIMSI-CNRS, University Paris-Sud 11, septembre 1991.

[Bellick1995] Yasine Bellick. *Interfaces multimodales : concepts, modèles et architectures*. PhD thesis, Université de Paris-XI, 1995.

[Bernard1984] C. Bernard. *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*. Champs Flammarion, Paris, 1984.

[Bertalanffy1950] Ludwig Von Bertalanffy. An Outline of General System Theory. *British Journal for the Philosophy of Science*, 1 :139–164, 1950.

[Boden and Zaw1980] Margaret A. Boden and Susan Khin Zaw. The case for a cognitive biology. *Proceedings of the Aristotelian Society, Supplementary Volumes*, 54 :25–49+51–71, 1980.

[Boudon1990] Raymond Boudon. *L'art de se persuader des idées douteuses, fragiles ou fausses*. Librairie Arthème Fayard, 1990.

[Bozzano and Villafiorita2010] Marco Bozzano and Adolfo Villafiorita. *Design and Safety Assessment of Critical Systems*. CRC Press (Taylor and Francis), an Auerbach Book, 2010.

[Buchanan and Shortliffe1984] Bruce G Buchanan and Edward H Shortliffe. *Rule-Based Expert Systems : The MYCIN Experiments of the Stanford Heuristic Programming Project*. Buchann and Shortliffe, Reading, MA, 1984.

[Changeux1983] J.P. Changeux. *L'homme neuronal*. Fayard, 1983.

[Chauvet1993a] Gilbert A. Chauvet. Hierarchical functional organization of formal biological systems : a dynamical approach. I. The increase of complexity by self-association increases the domain of stability of a biological system. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 339 :425–444, 1993.

[Chauvet1993b] Gilbert A. Chauvet. Hierarchical functional organization of formal biological systems : a dynamical approach. II. The concept of non-symmetry leads to a criterion of evolution deduced from an optimum principle of the (O-FBS) sub-system. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 339 :445–461, 1993.

[Chauvet1993c] Gilbert A. Chauvet. Hierarchical functional organization of formal biological systems : a dynamical approach. III. The concept of non-locality leads to a field theory describing the dynamics at each level of organization of the (D-FBS) sub-system. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 339 :463–481, 1993.

[Chauvet1995] Gilbert Chauvet. *La vie dans la matière : le rôle de l'espace en biologie*. Champs Flammarion, Paris, 1995.

[Chauvet2006] Gilbert Chauvet. *Comprendre l'organisation du vivant et son évolution vers la conscience*. Collection Automates Intelligents, Vuibert, février 2006.

[Clancey, William J1997] Clancey, William J. *Situated cognition : On human knowledge and computer representations*. Cambridge University Press, 1997.

[Corniaut and Fass2001] Daniel Corniaut and Didier Fass. De l'art pariétal à la réalité virtuelle : évolution comparée. In Relais d'information sur les sciences de la cognition (RISC), editor, *Actes des journées annuelles du RESCIF, La Cognition : de l'artificiel au naturel*, page 48, Collège de France, Paris, 26-27 octobre 2001.

[Cremet2005] Claude Cremet. Récit d'une expérience : l'invention d'artem nancy. http ://www.mcxapc.org/docs/cerisy/a4-1.pdf, Juillet 2005.

[Cyrulnik1983] Boris Cyrulnik. *Mémoire de singe et parole d'homme.* Hachette Littératures, 1983.

[Damasio1995] Antonio R. Damasio. *L'erreur de Descartes : la raison des émotions.* Odile Jacob, 1995.

[Damish1999] Hubert Damish. *L'origine de la perspective.* Flammarion, Champs arts, 1999.

[de l'Air et de l'Espace2008] Académie de l'Air et de l'Espace, editor. *La prise de risque : une nécessité humaine qu'il faut gérer*, Toulouse, France, février 2008.

[Denis1989] Michel Denis. *Image et Cognition.* Presses Universitaires de France, Paris, 1989.

[Djerassi *et al.*1965] Carl Djerassi, Joshua Lederberg, Georgia L Sutherlandand Bruce G Buchanan, Edward A Feigenbaum, Alexander V Robertson, and Alan M Duffield. Applications of Artificial Intelligence for Chemical Inference. Part I. The Number of Possible Organic Compounds. Acyclic Structures Containing C, H, O, and N. *Journal of the American Chemical Society*, 91(11) :2973–2976, may 1965.

[Dreyfus and Dreyfus1988] H.L. Dreyfus and S.E Dreyfus. Making a Mind Versus Modeling the Brain : Artificial Intelligence Back at a Branchpoint. *Daedalus*, Winter 1988.

[Edelman1992] Gerald M. Edelman. *Biologie de la conscience.* Odile Jacob, Paris, 1992. titre original : Bright Air, Brilliant Fire : On the Matter of Mind.

[Edelman2006] Gerald Edelman. *Second Nature : Brain Science and Human Knowledge.* Yale University Press, 2006.

[Endsley1995] Mica R. Endsley. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*, 37(1) :32–64, 1995.

[Engelbart1962] Douglas C. Engelbart. Augmenting human intellect : A conceptual framework. Summary report, sri project no. 3578, Standford Reserach Institue, Menlo Park, California 94025, USA, 1962. http ://dougengelbart.org/.

[Fass and Chauvet2006] Didier Fass and Gilbert Chauvet. The mathematical theory of integrative physiology : a fundamental framework for human systems integration and augmented human design. In *Enactive 06 : Enaction and Complexity*, page 135. Enactive Networ (NOE-IST EU), November 2006.

[Fass1991] Didier Fass. Principes et réalisation d'une base de connaissances d'aide au diagnostic des dysfonctionnements crânio-mandibulaires en TDM et en IRM. Doctorat en Chirurgie Dentaire, Faculté de Chirurgie Dentaire, Université de Nancy I, 6 juin 1991.

[Fass1994] Didier Fass. Stratégies cognitives mises en oeuvre dans l'utilisation d'une station de travail multimodale. Mémoire de DEA, LIMSI-CNRS, 1994.

[Fass2005] Didier Fass. Graphical gesture analysis : A behavioral tool for virtual environment design. In Noldus Information Techology, editor, *5th International Conference*

on Methods and Techniques in Behavioral Research, Wageningen, The Netherlands., 30 August - 2 September 2005.

[Fass2006] Didier Fass. Les nouvelles technologies dans l'aéronautique et la chirurgie. 22ième Forum Intégration Homme-Systèmes, pages 67–70, Direction Générale de l'Aviation Civile, Paris, 21 juin 2006. Académie Nationale de l'Air et de l'Espace.

[Fass2009] Didier Fass. Résilience et organisation des systèmes vivants. In *De la Sûreté de fonctionnement á la résilience des systèmes*, 7ème Journée thématique AFIS,. Association Française d'Ingénierie Systèmes, Juillet 2009. Cdrom AFIS.

[Fass2012] Didier Fass. *Systems Engineering - Practice and Theory*, chapter Augmented human engineering : a theoretical and experimental approach to human system integration, pages 257–276. Intech - Open Access Publisher, Rijeka, Croatia, march 2012.

[Fieschi1981] Marius Fieschi. *Aide à la décision en médecine : le système sphinx : application au diagnostic d'une douleur épigastrique.* PhD thesis, Université Aix Marseille, 1981.

[Flocon and Taton1963] Albert Flocon and René Taton. *La perspective.* Number 1050 in Que sais-je ? Presse Universitaire de France, 1963.

[Fodor1975] J.A. Fodor. *The language of thought.* Harvard University Press, Cambrige (Mass.), 1975.

[Francastel1956] Pierre Francastel. *Art et technique aux XIXe et XXe siècles.* Éditions de minuit, 1956.

[Ghafouri and Lestienne2000] Mohammad Ghafouri and Francis Lestienne. Altered representation of peripersonal space in the elderly human subject : a sensorimotor approach. *Neuroscience Letters*, 289(3) :193–196, 2000.

[Ghafouri1997] Mohammad Ghafouri. *Représentations sensori-motrices du geste graphique dans l'espace tridimensionnel : Sensori-motor representations of gesture in the three-dimensional space.* PhD thesis, Université Henri Poincaré Nancy 1, 1997.

[Gibson1977] James J. Gibson. The theory of affordance. In R.E. Shaw and J. Bransford, editor, *Perceiving, Acting and Knowing*, pages 67–82, Hillsdale, 1977. Lauwrence Erlbaum associates edition.

[Glaserfeld1988] Ernst Von Glaserfeld. Introduction à un constructivisme radical. In P. Watzlawick, editor, *L'invention de la réalité : contribution au constructivisme*, pages 19–43. Editions du Seuil, Paris, 1988.

[Gleick1999] James Gleick. *La Théorie du chaos : Vers une nouvelle science.* Champs Flamarion, 1999.

[Glotzer2011] S.C. Glotzer, editor. *International Assessment of Research and Development in Simulation-Based Engineering and Science.* Imperial College Press, 2011.

[Goodwin1978] Brian Goodwin. A cognitive view of bilogical process. *J. Social Biol. Struct.*, 1 :117–125, 1978.

[Guyatt *et al.*1992] Gordon Guyatt, John Cairns, David Churchill, Deborah Cook, Brian Haynes, Jack Hirsh, Jan Irvine, Mark Levine, Mitchell Levine, Jim Nishikawa, David Sackett, Patrick Brill-Edwards, Hertzel Gerstein, Jim Gibson, Roman Jaeschke, Anthony Kerigan, Alan Neville, Akbar Panju, Allan Detsky, Murray Enkin, Pamela Frid, Martha Gerrity, Andreas Laupacis, Valerie Lawrence, Joel Menard, Virginia Moyer, Cynthia

Mulrow, Paul Links, Andrew Oxman, Jack Sinclair, and Peter Tugwell. Evidence-Based Medicine, A New Approach to Teaching the Practice of Medicine. *JAMA*, 268(17) :2420–2425, November 1992.

[Haton and Haton1989] Jean-Paul Haton and Marie-Christine Haton. *L'intelligence artificielle*. Number 2444 in Que sais-je ? Presse Universitaire de France, 1989.

[Hester *et al.*2011] Robert L. Hester, Radu Iliescu, Richard Summers, and Thomas G. Coleman. Systems biology and integrative physiological modelling. *The journal of Physiology*, 589(5) :1053–1060, 2011. Special edition "Systems biology in a physiological world".

[Hottois2000] G. Hottois. *Technoscience et Sagesse)*. Éditions Pleins Feux, 2000.

[Houdé2004] Olivier Houdé. *La psychologie de l'enfant*. Que sais-je ? Presses Universitaires de France, 2004.

[ISO2009] *ISO 31000 :2009, Management du risque - Principes et lignes directrices*, November 2009. http ://www.iso.org/iso/fr/iso$_c$*atalogue/catalogue*$_t$*c/catalogue*$_d$*etail.htm?csnumber* = 43170.

[James1890] William James. *The Principles of Psychology*, volume in two volume of *American Advenced Series - Advanced Course*. Henry Holt and Company, New York, 1890.

[Jeka *et al.*2000] John Jeka, Kelvin S. Oie, and Tim Kiemel. Multisensory information for human postural control : integrating touch and vision. *Experimental Brain Research*, 134(1) :107–125, 2000.

[Joyner2011] Michael J. Joyner. Physiology : alone at the bottom, alone at the top. *The journal of Physiology*, 589(5) :1005, 2011. Special edition "Systems biology in a physiological world".

[Kahnveiller1998] Daniel Henry Kahnveiller. *Mes galeries et mes peintres*. Gallimard, 1998.

[Kosslyn *et al.*1978] Stephen M. Kosslyn, Thomas M. Ball, and Brian J.Reiser. Visual images preserve metric spatial information : evidence from studies of image scanning. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 4 :47–60, 1978.

[Laborit1986] H. Laborit. *L'inhibition de l'action : biologie comportementale et physiopathologie*. Masson, Paris, 1986.

[LaRecherche1985] LaRecherche, editor. *La naissance de l'Intelligence Artificielle*. Number 170. La société d'éditions scientifiques, octobre 1985.

[Lemoigne2006] Jean-Louis Lemoigne. *La théorie du système général, Théorie de la modélisation*. Collection Les Classiques du Réseau Intelligence de la Complexité, 2006. www.mcxapc.org.

[Leroi-Gourhan1964] André Leroi-Gourhan. *Le geste et la parole - Tome 1 Technique et Langage*. Albin Michel, 1964.

[Leroy-Gourhan1964] André Leroy-Gourhan. *Le geste et la parole,(I) Technique et langage (II) La mémoire et les rythmes*. Albin Michel, 1964.

[Lestienne *et al.*1977] Francis Lestienne, John Soechting, and Alain Berthoz. Postural readjustments induced by linear motion of visual scenes. *Experimental Brain Research*, 28(3-4) :363–384, 1977.

[Licklider1960] Joseph C.R. Licklider. Man-computer symbiosis. *IRE Transactions on Human Factors in Electronics*, 1 :4–11, March 1960.

[Lorenz2010] Konrad Lorenz. *L'envers du miroir : Une histoire naturelle de la connaissance.* Flammarion, Champs sciences, 2010.

[Martin1974] Gérard Martin. La tomographie sélective dans le diagnostic du syndrome algo-dysfonctionnel de l'articulation temporo-mandibulaire : présentation d'une technique originale. Thèse : 3e cycle en Sciences Odontologiques, Université Nancy 1, 1974.

[McClellan *et al.*2008] Mark B. McClellan, J. Michael McGinnis, Elizabeth G.Nabel, and Leigh Anne M. Olsen. *Evidence-Based Medicine and the Changing Natureof Healthcare : Meeting Summary (IOM Roundtableon Evidence-Based Medicine).* National Academy Press, Institute of Medicine of the National Academies, 2008. http ://www.nap.edu/catalog/12041.html.

[Medes and Collaborateurs1991] Medes and Collaborateurs. *État de l'art en médecine spatiale*, 1991.

[Merleau-Ponty1960] Maurice Merleau-Ponty. *L'œil et l'esprit.* Gallimard, 1960.

[Monod1970] Jacques Monod. *Le hasard et la nécessité : Essai du ma philosophie de la biologie moderne.* Seuil, 1970.

[Morin1981] Edgar Morin. *La méthode.* Le Seuil, Nouvelle édition coll. Point, 1981. six tomes publiés de 1981 à 2006.

[Newell *et al.*1959] Allen Newell, John C Shaw, and Herbert A Simon. Report on a general problem-solving program. In *IFIP Congress*, pages 256–264, Unesco, Paris, France, June 1959. Unesco.

[Norman1988] Donald Norman. *The Psychology of Everyday Things.* Basic Books, 1988.

[Norman2010] Don Norman. Why Human Systems Integration Fails (And Why the University Is the Problem). Invited talk for the 30th anniversary of the Human-Systems Integration Board of the National Research Council, the National Academies. Washington, DC., December 2010. http ://www.jnd.org/dn.mss/why_ human_ systems_ in.html. The video of this talk is available on http ://vimeo.com/18276785.

[PES2010] http ://www.pes.u-nancy.fr, 2010.

[Piaget1967] Jean Piaget. *Psychologie de l'intelligence.* Armand Colin, 1967.

[Poincaré1968] Henri Poincaré. *La science et l'hypothèse.* Champs Flammarion, 1968.

[Popper1991] Karl R. Popper. *La connaissance objective.* Champs Flammarion, 1991.

[Pouvreau2006] David Pouvreau. *La «tragédie dialectique du concept de totalité» : Une biographie non officielle de Ludwig Von Bertalanffy (1901-1972).* Vienne, BCSSS Bertalanffy Center for the study of systems science edition, 2006. http ://www.bertalanffy.org.

[Rastier1991] F. Rastier. *Sémantique et recherches cognitives.* PUF, Paris, 1991.

[Rosenblueth *et al.*1943] Arturo Rosenblueth, Norbert Wiener, and Julian Bigelow. Behavior, Purpose and teleology. *Philosophy of Science*, 10(1) :18–24, Jan. 1943.

[Rosenfield1994] Israel Rosenfield. *L'invention de la mémoire.* Champs Flammarion, Paris, 1994.

[Sacks1996] Oliver Sacks. *Un anthropologue sur Mars.* Seuil, 1996.

[Salinas and Sejnowski2001] Emilio Salinas and Terrence J. Sejnowski. Gain Modulation in the Central Nervous System : Where Behavior, Neurophysiology, and Computation Meet. *Neuroscientist*, 7(5) :430–440, 2001.

[Shepard and Metzler1971] Roger Shepard and Jacqueline Metzler. Mental Rotation of Three-Dimensional Objects. *Science*, 171(3972) :701–703, 1971.

[Simon1962] Herbert A. Simon. The Architecture of Complexity. *Proceeding of the American Philosophical Society*, 106(6) :467–482, Dec. 12 1962.

[Stengers2004] Isabelle Stengers. The challenge of complexity : Unfolding the ethics of science. In memoriam Ilya Prigogine. *E :CO*, 6(1-2) :92–99, 2004. Special Double Issue.

[Stengers2013] Isabelle Stengers. *Une autre science est possible ! Manifeste pour un ralentissement des sciences.* Éditions la Découverte, Paris, 2013.

[Théry1994] Gérard Théry. Les autoroutes de l'information. Rapport au Premier ministre, La documentation française, 1994.

[Turing1950] Alan Turing. Computing Machinery and Intelligence. *Mind*, 59 :434–460, 1950.

[Uschold and Grüninger1996] Mike Uschold and Michael Grüninger. Ontologies : Principles, Methods and Applications. *Knowledge Engineering Review*, 11 :93–136, 1996.

[Varela1988] Fransco Varela. *Invitation aux sciences cognitives.* Seuil, 1988.

[Victor1987] Jonathan D. Victor. The dynamics of the cat retinal x cell centre. *The Journal of Physiology*, 386 :219–246, 1987.

[Weawer1948] Warren Weawer. Science and complexity. *American Scientist*, 36 :536–544, 1948.

[Wiener1965] Norbert Wiener. *Cybernetics : or control and communication in the animal and the machine.* MIT Press, 1965.

[Zacharias *et al.*2008] Greg L. Zacharias, Jean MacMillan, and Susan B. Van Hemel, editors. *Behavioral Modeling and Simulation : From Individuals to Societies.* The National Academies Press, 2008.

[Élie Faure1985] Élie Faure. *Histoire de l'Art.* Denoël, 1985.

3

Mise en perspective historique et épistémologique

Sommaire

3.1 Des mythes et du super-héros 46
3.2 De l'eugénisme et du transhumanisme 48
3.3 Des postulats 50
3.4 De l'idéal à la réalité 52
3.5 De l'homme augmenté 54
Bibliographie 55

Le thème de *l'homme augmenté* est actuellement sujet à de nombreuses controverses et de nombreux débats, tant éthiques que sociétaux.
La question de la dualité « *inné acquis* » c'est transformé en « *inné, acquis, hacké* ».

En France, ce sont essentiellement les interprétations sémantiques autour de la dénomination *homme augmenté* qui font débat dans le champ de l'éthique et de la bioéthique [Clayes and Vialatte2008] [Lorrain and Raoul2004] [Ameisen and Burlet2007]. Ce débat se situe dans le prolongement du rapport prospectif américain publié en 2003 : «*Converging technologies for improving human performances*» [Roco and Bainbridge2002], et du rapport des Communautés Européennes : «*Converging Technologies - Shaping the Future of European Societies*» [Nordmann2004], qui reflètent deux philosophies et deux volontés politiques différentes. Ils ont toutefois en commun de souligner la réalité scientifique et l'importance économique et sociétale de la convergence technologique ou *technoscientifique.* [49].
Ces visions duales, entre opportunité et aversion du risque - pour ne pas dire "principe de précaution" [50], constituent un champ de questions et de problèmes scientifiques fondamentaux à explorer pour prendre des décisions en connaissance de cause.

49. Convergence NBIC : nanotechnologie, biologie (neurosciences), technologie de l'information et cognitique.
50. la sémantique populaire de cette expression est discutée quant à son impact sur la culture du risque et de l'innovation en France [Feretti2013]. *Le principe de précaution* a un sens très précis : « l'absence de certitudes scientifiques ne doit pas empêcher d'agir pour prévenir un risque incommensurable et irréversible sans pour autant interrompre le travail de construction des certitudes scientifiques ». Le choix du terme *précaution* de ce principe, inscrit depuis 2005 dans la Constitution française, conduit à une confusion sémantique avec le terme prévention. De plus le principe de précaution est lié à la gestion de l'incertitude et non à la gestion du risque qui est pour

Ce projet propose en conséquence d'explorer la question scientifique de l'intégration homme systèmes (IHS). La connaissance des principes généraux de l'IHS permettra de mieux appréhender et de gérer les risques inhérents aux nouvelles techniques et organisations de *l'homme augmenté*. Sans ces connaissances scientifiques nouvelles, il me semble difficile de fonder des projets de développement et de transferts innovants dans des domaines « sécurité et vie critiques » ; sans parler d'appréhender les évolutions possibles de nos sociétés [51], même si cela n'écarte pas les questions éthiques et philosophiques de *l'homme-machine*.

Du corps à corps à l'alentour, l'homme neuronal ou symbiotique, *ce singe en mosaïque*, est un animal social, culturel et technologique [Changeux1983] [de Rosnay1995] [Chapoutier2001] : un *homme augmenté*. Ce thème de recherche interroge la nature même de l'humain, de ses créations artificielles et de leurs intimes relations dans une écologie et une économie de la nature et de l'artifice.

Pour prendre des décisions en connaissance de cause et au regard de leurs conséquences, il est nécessaire de faire la part des choses entre les fantasmes et la réalité.

Pour un Boris Cyrulnik, combien de Joseph Mengele ! Pour un Albert Einstein, combien de docteurs Strangelove (Folamour) *«or : How I Learned to Stop Worrying and Love the Bomb»* ! Pour un docteur Faust, combien de Mephistophélès ! Pour échapper à l'aporie de sa condition, l'humain organise son environnement de vie et tente de maîtriser son propre corps pour échapper à sa finitude. De l'artifice à l'artefact, d'homo habilis à homo sapiens sapiens, conscient de son soi primitif ou de sa conscience supérieure, il crée des mythes et les transcende pour mieux les transgresser. Parce qu'il n'y a pas que Socrate qui est mortel.

Ouvrons la boîte de Pandore.

3.1 Des mythes et du super-héros

La probalité de mourir est égale à 1.

Entre la naissance et la mort, il y la vie, trait d'union sémantique singulier. Entre la théologie et la spiritualité, il y a la mythologie, l'origine du monde et ses récits fabuleux, la volonté d'échapper à la condition de simple mortel et l'ensorcellement du monde [Cyrulnik1997].

sa part probabiliste. Citons pour conclure cette note sur la position de la Cour de Justice des Communautés Européennes sur le principe de précaution [Biraux and Étienne2009] : « L'utilisation du principe de précaution doit être fondée sur : i) la rigueur scientifique qui renvoie à l'xigence d'une méthode éprouvée d'évaluation du risque redouté, et à l'existence réelle d'un risque plausible et non d'un simple fantasme ; ii) l'action : l'application du principe de précaution ne doit pas conduire à s'abstenir de courir le moindre risque.»

51. Quelle Cassandre, quel comité consultaif d'éthique auraient laissé l'automobile et son industrie se développer s'ils avaient perçu ses bouleversements et conséquences sur l'organisation de nos milieux et de nos modes de vie ? Sans parler du million de morts annuel causé par les accidents de la route. Pourtant, aujourd'hui le secteur de l'automobile représente 10% de l'activité économique de nos sociétés (tout comme le secteur de la santé) et il a une influence énorme sur l'organisation de notre espace et de notre temps.

Après que Pandore a libéré les maux de l'humanité, il ne lui restait plus, dans sa jarre que l'espérance.

Sorti du labyrinthe et ayant échappé au Minautore grâce aux ailes de plumes, de fil et de cire que son père, Dédale, leur avait fabriqués, Icare ignora les mises en garde de ce dernier. Exalté par le vol, il voulu s'approcher du soleil et fit fondre ses artifices de cire entraînant sa chute mortelle dans la mer.

S'élever dans le ciel à la hauteur des dieux ou d'un seul dieu, n'est pas le privilège de la seule mythologie hellénique. Dans la Genèse, le projet inachevé de la Tour de Babel est à la fois la représentation métaphorique de la quête ultime du sens et de la connaissance, et le projet de retrouver la langue adamique (d'Adam), celle de l'Homme avant le pêché originel.

Les mythes et objets transitionnels existent aussi dans d'autres cultures qui nous sont moins familières. Parmi les peuples d'Afrique centrale vivant le long du fleuve Congo, et plus largement dans les objets des rituels initiatiques ou symboliques de l'Afrique subsaharienne, des peuples du royaume Kongo, en particulier Vili ou Yombe, ont produit des objets de *médecine sacrée* et d'intercession avec les esprits de la nature et leurs pouvoirs à des fins de protection. Les statues rituelles ont la particularité d'être couvertes, en plus de charge magique, de lames et clous, chaque clou et lame représentant une invocation. L'efficacité magique de l'objet se vérifie au nombre des éléments plantés.

Les mythes n'ont pas disparu de notre société moderne ou postmoderne même s'ils s'incarnent différement que dans l'Illiade ou la Bible. Les héros [52] comme Héracles ont disparu, remplacés dans l'odyssée contemporaine par des personnages illustres, décédés et sacralisés dans des Panthéons, ou par des aventuriers et des sportifs valorisés et vénérés dans le spectacle de la société. Depuis la fin de la Première guerre mondiale est en outre apparu une catégorie de personnages de fiction aux pouvoirs extraordinaires et surhumains : les super-héros.

Ces super-héros sont des personnages issus de la culture nord-américaine. Il sont immortels. Leurs pouvoirs sont soit d'origine extraterrestre, soit d'origine technologique. Ces pouvoirs s'incarnent symboliquement dans leurs vêtements ajustés, le slip rouge de superman par exemple, et pour certains une cape venant souligner leur ressemblance avec les chevaliers du Moyen âge et les chefs de guerre de la Rome antique [53]. Le super-héros est un janus dont l'une des faces est l'homme ordinaire, dans sa condition et ses maux, mais qui dans des conditions particlières se métamorphose et incarne les valeurs positives d'une Amérique morale, altruiste et toujours victorieuse.

Les scénaristes de Hollywood ont su adapter ces caractéristiques à de nouveaux types de personnages dans les années 1980 : les cyborgs qui associent la machine à l'homme, comme dans Robocop, ou les robots protecteurs, qui associent l'intelligence artificielle à l'artifice matériel, comme le héros de Terminator.

En France, seul Super-Dupont [54] porte haut les couleurs de notre beau pays. Plus généralement en Europe les personnages de fiction aux pouvoirs extraordinaires sont porteurs de plus d'interrogations politiques et d'inquiétudes scientifiques. De la créature de Franken-

52. Hommes de grands pouvoirs élevés au rang de demi-dieux.
53. Tels qu'on peut encore les voir sur les arcs de triomphe à Rome
54. Personnage de bande dessinée créé par Jacques Lob et Marcel Gotlib.

stein [55] aux machines de Métropolis, en passant par les robots de Karel Čapek, les oeuvres de fiction européennes sont porteuses d'interrogations philosophiques. Et comme le Golem de Prague, ces créatures finissent par se rebeller contre leurs créateurs en démontrant un caractère négatif ou pathétique.

Malgré les différences culturelles et la dualité de ces représentations du *surmoi* et des valeurs qui les animent, ces allégories modernes incarnent le mythe du progrès et la force de l'esprit humain. Elles sont issues du positivisme d'Auguste Comte.

Du positivisme au scientisme il n'y a qu'un pas, que certains démiurges ont franchi à la fin du XIX$^{\text{ième}}$ siècle et dans la première moitié du XX$^{\text{ième}}$ et d'autres sont tentés à nouveau, par fascination pour la technologie ou par narcissisme.

3.2 De l'eugénisme et du transhumanisme

«Everybody wants to rule the world»

Deux courants idéologiques et leurs concepts participent à la confusion et aux réticences liées à la terminologie de *l'homme augmenté*, ceux de l'eugénisme et du transhumanisme.

— **Eugénisme**

C'est un cousin de Charles Darwin, Francis Galton, qui le premier, conçut en 1883 le terme «eugénique» (*eugenics* en anglais). Éthymologiquement ce mot signifie *bien né, bien engendré*. À partir de ce mot il formula un projet néo-malthusien dont la finalité était l'amélioration de l'espèce humaine, selon des critères héréditaires et esthétiques, qu'il pensait possible grâce au progrès de la science. L'eugénisme était la cristallisation d'une forme de pensée occidentale fondée depuis Athènes ou Sparte sur un principe d'élitisme et de discrimination entre les personnes et leur appartenance à un corps politique ou social.
Le vingtième siècle vit se développer un eugénisme raciste dont la pratique de la *«bonne mort» ou euthanasie* aboutit, dans l'Allemagne nazie, au génocide systématique et industrialisé, et à la mise en place d'une organisation ayant pour but l'amélioration de la race. D'Auschwitz au Lebensborn, l'idéologie dominante reposait sur l'idée d'élimination de l'homme imparfait, par nature inférieur, et sur l'idée de pureté *d'une race supérieure* [56].

Une autre doctrine issue de la réforme religieuse et politique anglicane et du schisme protestant, particulièrement avec le calvinisme, se fonde sur l'idée de pureté - pureté de la foi et pureté de la liturgie. C'est le puritanisme.
Le puristanisme trouve parmi ses motivations le désir de retrouver la pureté originelle, celle de la vie et de l'Homme avant sa chute dans la Genèse. Il désire réparer la faute du Péché originel, celui d'avoir cédé à la tentation et d'avoir goûté au fruit de l'arbre de la «connaissance du bien et du mal».

55. Le titre de l'oeuvre publiée par Mary Shelley en 1818 est *Frankenstein or The modern Prometheus.*
56. Aujourd'hui la génétique et la génétique des populations ôtent tout sens au concept de race.

La perte du paradis orginel serait donc le prix à payer de notre conscience réflexive et de notre connaissance de la dualité de la condition humaine entre le mal et le bien.

— **Transhumanisme**
«L'éternité c'est long, surtout à la fin !». Woody Allen

Le puritanisme imprègne la culture anglo-saxonne et nord-américaine. Cependant c'est d'un courant libertaire et progressiste, se réclamant de la pensée des Lumiaires, issu du cyberpunk et de l'extropie qu'est apparue une idéologie de l'amélioration de la condition humaine, sa qualité et sa durée de vie, par les technologies nouvelles informatiques, nanotechnologies et génétiques. Ce nouveau courant philosophique, le transhumanisme, a émergé dans les années 1990 à la suite de diverses publications et de la thèse défendue par le philosophe et futurologue anglais Max More (de son nom de naissance Max T. O'Connor [57])[More1990] [More1995]. L'idée centrale de cette thèse est la possibilité de transcender la condition humaine, ses maux et sa finitude. C'est ce qu'il nomme extropie [Casilli2005], par opposition à entropie : la possibilité d'un progrès illimité de la nature humaine et de son intelligence grâce à la science et la technique.

Dans la continuité de la tradition philosophique empiriste de Francis Bacon [58], qui le premier fonda le concept de *progrès*, le projet transhumaniste interroge, dans un constexte post-moderne, l'utopie de la science et de la technique toute puissante à réduire les maux de l'humanité [Bostrom2005]. En particulier, il postule la capacité de la technique à étendre l'intelligence et la connaissance humaines, et à modifier le corps pour sa santé et son bien-être ; avec pour finalité extrême d'atteindre l'immortalité. Cette doctrine se situe entre catastrophisme, risque d'extinction, et extension de l'intelligence et de la corporalité de l'espèce humaine : «*l'avènement d'un futur superhumain merveilleux et radieux*».

En postulant comme idéal la transmutation du corps et de la pensée, ce courant philosophique se rapproche du projet de la réalisation du *grand œuvre* de l'alchimie. La science et la technique, dans leur caractère pluridisciplaire et convergents, sont dès lors envisagées par le transhumanisme comme la nouvelle panacée et une forme de concrétisation de la pierre philosophale.

Le transhumanisme trouve un développement utilitariste, spectaculaire et marketing, dans l'annonce, pour ne pas dire la « technophanie », de l'avénement de la *Singularité*.
Fondée sur un développement de la loi de Moore [Moore] [59], le concept de *singularité* définit le moment où « *l'intelligence* » des machines (des entités technologiques d'intelligence artificielle et nanotechnologique) dépassera [Vinge1993] et fusionnera avec l'intelligence humaine, la génétique et le cerveau humain. C'est ce moment singulier (exponentiel : où la somme se transforme en produit) où la condition humaine et son univers changeront radicalement dans *l'eutectique* ou la fusion de l'esprit humain et de l'intelligence tech-

57. Non par révérence à Thomas More (1478-1535), mais pour le jeu de mots ("Max Plus").
58. «Knowledge is power»
59. La loi de Moore est une loi empirique qui décrit le développement et l'intégration exponentielle des composants électroniques et l'évolution associée de la puissance de calcul des machines. Si elle a été valide durant les quarantes dernières années, elle montre aujourd'hui ses limites.

nologique. Cette fusion créera un humain machine super-humain amélioré et immortel [Kurzweil2005].
Au fondement de cette futurologie de la singularité dont Ray Kurzweil est le prophète [60], l'intelligence est réduite à un traitement de l'information, un algorithme, un calcul (computo) et sa puissance. La dichotomie machine / programme introduite par Turing est aussi un postulat essentiel. Le biologique est ainsi réduit à une machine génétique programmable et reprogrammable. L'évolution est ramenée à une augmentation de l'ordre convergeant vers un point d'ordre idéal supérieur dont la quantité et la compléxité d'information pourraient être exprimées par un algorithme optimal en rendement et en performance. C'est une forme contemporaine de logicisme mystique qui propose une vision positiviste compatible avec l'eugénisme où le corps est considéré comme imparfait (potentiellement malade), fini (mortel) et non optimal en termes de rendement (incertain, non prédictible et à intelligence logique limitée).
La singularité représente une forme post-moderne du paradoxe dialectique des frères Huxley, situé entre hygénisme et progrès social, nature et culture (maiss peut-être sans la culture) de Julian, théoricien d'un eugénisme humaniste, et « Le meilleur des mondes » d'Aldous Huxley.
Il convient aussi de noter que la singularité se différencie du concept de *noosphère* et de point oméga (Ω) de Pierre Teilhard de Chardin, autre forme d'extrapolation a priori de l'évolution humaine (darwinienne), de l'Homme dans la Nature et de la nature organique de l'Humanité [de Chardin2007]. Chez Teilhard de Chardin le point Ω constitue le point ultime de l'hominisation dans la plénitude du monde de l'esprit, où l'Homme rejoint Dieu dans une métaphysique de l'historique de l'Homme et de son devenir théologique.

Quelles soient fondées sur la singularité ou sur le point Ω, comme point de convergence ou de nouvelle divergence, ces deux projections, même si elles demeurent discutables, se constituent sur une vision optimiste du devenir de l'humanité.
Mais la technologie et encore moins la technique ne sont pas la science, même si, généralement, elles fondent toutes deux leur efficacité sur des principes scientifiques vérifiés formellement ou expérimentalement. Des fantasmes à la réalité, le plus court chemin est souvent la fuite dans le rêve ou dans l'idéalisation spéculative qui, si l'on n'y prend pas garde, peut se métamorphoser en nos pires cauchemars.

3.3 Des postulats

«Les idées préconçues sont nécessaires, indispensables : on ne fonde rien sans elles ; il faut seulement savoir les abandonner lorsqu'elles n'ont plus de raison d'être.» Claude Bernard [Bernard1858]

Que la finalité soit *making a mind* ou *modelling the brain* selon la célèbre proposition dichotomique de Herbert et Stuart Dreyfus [Dreyfus and Dreyfus1988], les sciences cognitives ainsi que l'ingénierie et les technologies qui en découlent, fondent leur projet de naturalisation de la pensée sur trois postulats :

60. L'université de la singularité, dont il est des fondateurs, est soutenu par des entreprises majeures des technologies du numérique associant des start-up de l'intelligence artificielle, de la robotique et des biotechnologies génétiques et synthétiques dans la Silicon Valley.

— La nature métaphysique de la connaissance.

Tel n'est pas le moindre des paradoxes des sciences cognitives, sans parler de leur caractère pluridisciplinaire. Si dès le XIX$^{\text{ième}}$ siècle, la psychologie tente de s'émanciper de la métaphysique pour fonder son projet scientifique [Flournoy1890], les sciences cognitives, sans doute influencées par la *théorie des trois mondes* de la métaphysique de Karl Popper [61] [Popper1991] et le projet de *l'intelligence artificielle*, fondent leur champ de recherches sur ce postulat. Elles justifient la dichotomie des approches sur des fondements philosophiques et épistémologiques différents : le fonctionnalisme et la phénoménologie. Ainsi, qu'il s'agisse de *créer un esprit* ou de *modéliser le cerveau*, ces deux voies de recherches et développement nécessitent la référence au concept de représentation : représentations logico-symboliques ou systèmes de représentation et de reconnaissance de forme.

Par ces références philosophiques, les sciences cognitives, postulant la nature métaphysique de la connaissance, s'aventurent dans les méandres du débat de la philosophie de l'esprit et de la question de la relation corps esprit. Elles risquent de se perdre dans la recherche d'une métaphysique de la métaphysique et de tomber dans une régression à l'infini.

— Le cerveau comme système cognitif traitant de l'information.

Au sortir de la deuxième guerre mondiale, à l'orée de la guerre froide, même l'opposition entre les courants scientifiques américains et soviétiques de la psychologie et de la neurologie relevait d'une posture idéologique.
D'un côté du détroit de Bering, l'école russe, s'appuyant sur les travaux de neuropsychologie d'Alexandre Luria [Luria1976] à la suite de l'école marxiste de la psychologie *culturelle historique* de Lev Vygotsky [Ivic2000], ancrait ses travaux sur le rôle déterminant de l'environnement, en particulier social, pour le développement de l'individu et de ses apprentissages. Sur l'autre rive, le *behaviorism*, résultant pour John Watson [Watson2009] de la nécessité de faire de la psyschologie une science objective, suivi par les travaux de Burrhus Skinner sur le conditionnement opérant [Skinner1938], ancrait ses recherches sur le rôle déterminant des caractères génétiques déterministes de l'individu. La réponse à un stimulus de l'environnement dépendait des propriétés de la boîte noire [62] que constitue un individu d'une espèce et d'un groupe donnés, et ce de façon quasi mécanique.
Malgré ses fondements idéologiques, la posture radicale du behaviorisme n'était plus tenable à la fin des année 1940. Les découvertes de la neurobiologie, la modélisation formelle des neurones [MacCulloch and Pitts1943] et la cybernétique avec son concept de *feedback* [Wiener1965], ébranlèrent le courant dominant nord américain. La boîte noire ne l'était plus autant que celà, même si l'allégorie de la caverne de Platon continuait à questionner le contexte épistémologique des sciences de la psyché.

61. Les trois mondes de Popper sont les suivants : d'abord celui des objets physiques et des états physiques ; ensuite celui des états de conscience ou des états mentaux ; et enfin celui de la connaissance objective (des contenus objectifs de la pensée : pensée scientifique, pensée poétique et œuvres d'art).

62. Désireux d'échapper à la psychologie introspective, John Watson avait fondé les principes du behaviorisme sur des observations objectivement observables : le stimulus et la réponse comportementale, considérant les bases biologiques comme non observables.

En 1948 Claude Shannon, le père de la théorie de l'information, publia son célèbre article *A mathematical theory of communication* [Shannon1948]. Dès le début des années 1950, des psychologues, considérant par analogie l'animal ou l'humain comme un système de communication effectuant du traitement de l'information (*information processing*), malgré le désaccord de Shannon, s'emparèrent de ses travaux pour faire de la boîte noire une boîte grise.

Avec l'avènement de la métaphore «*cerveau ordinateur*» [63], ce postulat marqua et marque encore profondément le champs des sciences cognitives.

— Du dualisme du corps et de l'esprit à la séparation corps-cerveau !

La tradition théologique et la philosophie de l'esprit interrogent la dualité du corps et de l'esprit, du bien et du mal, de la vie et de la mort. Si le dualisme spiritualiste s'oppose aujourd'hui à un matérialisme moniste [Baquiast2007], les sciences cognitives se déclarent monistes. Malgré ce postulat, sans doute du fait de leur *méta-métaphysique*, les sciences et l'ingénierie cognitives n'en demeurent pas moins dualistes de fait. Au problème de la dualité corps-esprit, elles substituent, paradoxalement, le problème corps-cerveau et l'étendent au problème corps-machine et machine-programme [64]. Les dualités sujet-objet et individu-environnement demeurent, agençant les concepts et les méthodes de développement (mécaniste) de la mise en relation de l'homme et de l'artifice.

3.4 De l'idéal à la réalité

La question de la relation de l'humain au monde naturel ou artificiel est ancienne, même si elle est amplifiée par les développements scientifiques et technologiques actuels.

De la pensée sauvage à la toute puissance, l'humain, au cours de son développement et de son histoire individuelle et collective, développe, en relation avec le monde qui l'entoure, des systèmes de connaissances rationnelles et des systèmes de pensées magiques. Il enchante le monde par ses croyances, son altérité, sa culture et ses artefacts scientifiques, techniques, artistiques ou religieux. Pour mieux affronter sa condition biologique, il tente d'ordonner le monde selon ses besoins et ses désirs.

Des fantasmes à l'imaginaire idéal, des fétiches aux symboles, il est contraint d'organiser son domaine de vie et d'activité en se confrontant au principe de réalité. Conscient de son état et de sa finitude, il fait sens par nécessité de cohérence.

63. Au XIX$^{\text{ième}}$ siècle, à l'apogée de la Révolution industrielle, la métaphore *cerveau - machine mécanique* existait déjà. Ces métaphores marquent la volonté narcissique de sacraliser le génie humain et ses créations techniques au risque d'un réductionnisme mécaniste finalement stérile.

64. cf. La machine universelle [Turing1936] et le test de Turing [Turing1950] et l'expérience *du cerveau dans la cuve* d'Hillary Putnam [Putnam1984].

Ce faisant, il interroge sa position duale au monde, entre spiritualité et matérialité.

— **De l'humanisme :**

« L'homme est la mesure de toute chose : de celles qui sont, du fait qu'elles sont ; de celles qui ne sont pas, du fait qu'elles ne sont pas. » Protagoras

La conception anthropocentrique de l'homme n'est pas nouvelle. De la philosophie poétique pré-socratique à l'humanisme postmoderne, de l'humanisme de la Renaissance à l'humanisme des Lumières, l'humanisme interroge la condition et la place de l'homme dans une épiphanie [65] pathétique ou idéale [Tzitzis2001] [Tzitzis2004].
Au premier siècle de notre ère, Vitruve fixa, selon des règles de d'architecture, les mesures et les proportions idéales de l'Homme telles qu'elles nous apparaissent dans le dessin de Léonard de Vinci intitulé le Pentaèdre. Au XVI$^{\text{ième}}$, l'École esthétique de Bologne définit les formes et les proportions idéales du visage et de ses éléments anatomiques, telles quelles sont utilisées aujourd'hui en chirurgie maxillo-faciale et esthétique [Zaoli1998].

De l'idéal individuel à l'idéal universel, l'humanisme pose les questions philosophiques de l'émancipation et de l'auto-termination, du libre arbitre, de l'autonomie, de l'individualité ou de la dignité d'un être de raison rationnel dans une logique de progrès. N'est-ce pas là une posture prométhéenne, où l'espérance serait le dernier des maux humains ?

Quoiqu'il en soit, l'humanisme n'est pas l'humanité.

— **De la culture :**

La culture est à la société ce que l'esprit est au cerveau.

Il est un domaine de création humaine qui nous éclaire et anticipe les évolutions possibles de nos société technoscientifiques, c'est celui de la création artistique. Il illustre nos peurs et nos fantasmes.
En témoigne la littérature de science fiction nord-américaine des années 1950 avec Isaac Asimov, dont les romans formulent les lois de comportements des robots [Asimov1950 1978], et Philippe K. Dick, qui interroge les *états d'âmes* des androïdes [Dick1968] [66].
Avant que l'Internet Society (ISOC), le World Wide Web Consortium (W3C)et les premiers logiciels butineurs ne voient le jour, le mouvement *Cyberpunk* avec ses deux écrivains emblématiques, William Gibson pour le roman *Neuromancer* en 1984 [Gibson1984 1998] et Neal Stephenson pour son roman *Snow-crash* en 1992 [Stephenson1992], questionnaient déjà l'intégration de l'esprit aux réseaux et aux *dystopies* numériques. Pour *Snow Crash* Neal Stephenson anticipe aussi la convergence NBIC et l'intégration homme-systèmes.

65. *Manifestation d'une réalité cachée.*
66. La nouvelle intitulée *Do androids dream of electric sheep ?* fut adaptée au cinéma par Ridley Scott en 1982 sous le titre de *Blade Runner*.

Nous n'aurions ainsi le choix qu'entre l'utopie de l'humanisme et la dystopie des *metavers* de la science fiction. Dans l'époque et la réalité socio-politique actuelles, deux cultures de gouvernance s'opposent ou s'entremêlent : la gestion par la peur et la culture de la prise de risque.
En ces temps où le concept philosophique de précaution et son principe constitutionnel prévalent dans la prise de décision [Godard1998] [COMEST2005], la gestion par la peur constitue un mode de gouvernance et de manipulation subtil et très efficace, même si le principe de précaution n'est pas la peur mais l'action en contexte d'incertitude. Il se fonde sur l'inhibition de l'action [Laborit1986] ou du moins la limitation volontaire du domaine de décision et d'action, «*à l'insu de son plein gré*» inconsciemmment et souvent au profit d'autrui.
L'autre alternative pragmatique et politique est la culture de la prise de risque et de sa maîtrise : «prendre un risque n'est pas une mauvaise chose lorsqu'on cherche à le comprendre et à le maîtriser... L'absence de prise de risque peut être un très gros risque.» [de l'Air et de l'Espace2008]. La maîtrise du risque est une culture scientifique et technique nécessaire à la sécurité et la fiabilité des systèmes artificiels, et aussi à la sûreté et à la fiabilité des organisations humaines et des systèmes homme-machines. Et parce qu'il n'y a pas d'innovation, et encore moins d'invention, sans une certaine part de prise de risque, il est nécessaire de définir le domaine de risque des créations technologiques. En se fondant sur des principes scientifiques vérifiés formellement et expérimentalement, et pas seulement sur des croyances et une doxa spéculative, il devient possible de poser des règles valides d'ingénierie ou d'organisation d'un nouveau système artefactuel. Ce sont des conditions nécessaires à la conception de l'architecture et à la maîtrise des bornes ou des limites du domaine de comportement et des évolutions, attendues et souhaitées, d'une innovation technique, quelles que soientt sa dimension spatiale et temporelle et son degré d'intégration avec l'humain, son corps ou son environnement.

Je fonde le projet scientifique de l'homme augmenté dans le cadre de cette culture de la prise de risque et de la maîtrise de ces risques .

3.5 De l'homme augmenté

De *l'animal machine* de René Descartes [Descartes1966] à *l'homme machine* de Julien Offray de la Méttrie [de La Mettrie1999], on retrouve deux positions qui animent encore le débat autour de *l'homme augmenté* : le rationalisme dualiste et mécaniste d'un côté et l'empirisme matérialiste réductionniste de l'autre.
Entre l'idéal philosophique, voire théologique, de l'Homme avec un H majuscule, et la généralisation rationnelle scientifique, de l'humain catégorie abstraite d'un système biologique, il y a la vie, la réalité multidimensionnelle et la mort. Comment concevoir théoriquement l'humain et les principes scientifiques de l'humain machine ou de l'homme augmenté ?

Il convient avant d'aller plus loin, de se confronter un instant à la réalité de la réanimation médicale et de l'activité spatiale humaine.

En réanimation médicale, le concept d'homme augmenté et la réalité de l'humain machine est strictement nécessaire à l'action. L'humain machine prend tout son sens pour le patient, sa famille et le personnel médical et soignant.

Le concept renvoie à une question de vie ou de mort ; pour les équipes médicales cela pose des questions pratiques et éthiques. Quelle que soit la sophistication de ces machines - ventilation mécanique, hémodialyse, circulation extra-corporelle..., une évaluation bénéfices / risques est toujours nécessaire et difficile. Il existe toujours des risques iatrogènes bien réels, même si de nombreuses boucles de rétrocontrôle automatique ont été développées [Chopin2007].

Pour envoyer et faire agir un homme dans l'eau ou dans l'espace, le problème est différent. Il ne s'agit plus de survie mais d'extension du domaine de vie et d'activité de la personne : des exigences du support vie et du domaine d'activité spécifiques. Les artefacts, modules de transport et de vie, et dispositifs vestimentaires (scaphandres) doivent donc être conçus de manière à maintenir :

(a) les fonctions nécessaires au maintien de l'intégrité corporelle et les fonctions physiologiques de base ;

(b) les fonctions nécessaires au maintien des fonctions relationnelles - sensorimotrices et cognitives, et de la capacité opérationnelle de l'opérateur en situation ;

(c) les fonctions physiologiques de l'opérateur dans un domaine fonctionnel compatible avec le retour sur terre en évitant, par exemple le risque d'embolie chez le plongeur ou de collapsus cardio-vasculaire chez le spationaute [67].

Dans la formulation de ces exigences, nous pouvons différencier plusieurs acceptions de *l'homme augmenté* en fonction de degrés de complexité et d'intégration homme-systèmes dans le temps et dans l'espace.
Réparé ou restauré, augmenté ou étendu, amélioré ou modifié, d'un point de vue conceptuel, il est possible d'imaginer et d'envisager *l'homme augmenté* dans toutes ses dimensions philosophiques ou fantasmagoriques. Mais si de nombreuses questions éthiques existent, seule la philosophie politique et un cadre législatif clairement défini et respecté peuvent fixer les limites de ce qu'il est possible de faire et de ce qui ne l'est pas, de ce qui est permis et de qui est interdit. Cette prise de décision politique nécessite de s'appuyer sur des modèles et des simulations développés sur des principes scientifiques fiables fondés eux-mêmes sur un cadre théorique vérifié.

Cette prise de décision *en connaissance de cause et en pleine conscience des effets* ne pourra se faire que dans le cadre d'un contexte scientifique renouvelé. C'est précisément dans cette perspective que se situe le projet de recherche *l'homme augmenté*.

Bibliographie

[Ameisen and Burlet2007] Jean-Claude Ameisen and Claude Burlet. AVIS N°96 Questions éthiques posées par les nanosciences, les nanotechnologies et la santé. Technical report, Comité consultatif national d'éthique pour les sciences de la vie et de la santé, 2007.

[Asimov1950 1978] Isaac Asimov. *I, Robot*. Bantam Dell, A division of Random House Inc., 1950, 1978.

67. Si maintenir en vie la personne est essentiel pour la réanimation médicale, limiter les risques iatrogènes et la morbidité est aussi un enjeu majeur pour la réadaptation post-réanimation et la qualité de vie ultérieure.

[Baquiast2007] Jean-Paul Baquiast. *Pour un prncipe métérialiste fort*. Éditions Jean-Paul Bayol, 2007.

[Bernard1858] Claude Bernard. *Sur la physiologie et la pathologie du système nerveux*, volume tome 1. J.-B. Ballière et Fils, 1858. Source Gallica.bnf.fr/ Bibliothèque H. Ev. C.H. de Sainte Anne.

[Biraux and Étienne2009] Claude Biraux and Jean-Claude Étienne. Le principe de précaution : bilan 4 ans après sa constitutionnalisation, Synthèse des interventions, Rapport n°25 (2009-2010). Technical report, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 2009.

[Bostrom2005] Nick Bostrom. A history of transhumanist thought. *Journal of Evolution and Technology*, 14(1) :1–25, 2005.

[Casilli2005] Antonio A. Casilli. *Le débat sur le nouveau corps dans la cyberculture : le cas des extropiens*, volume Le corps extrême dans les sociétés occidentales, pages 297–329. L'Harmattan, Paris, 2005.

[Changeux1983] J.P. Changeux. *L'homme neuronal*. Fayard, 1983.

[Chapoutier2001] Geoges Chapoutier. *L'Homme, ce singe en mosaïque*. Odile Jacob, 2001.

[Chopin2007] Claude Chopin. L'histoire de la ventilation mécanique : des machines et des hommes. *Réanimation*, 16(1) :4–12, 2007.

[Clayes and Vialatte2008] Alain Clayes and Jean-Sébastien Vialatte. Rapport sur L'évaluation de l'applicaiton de la Loi N° 2004-800 du 6 août 2004 relative à la bioéthique. Technical report, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 2008.

[COMEST2005] COMEST. Le principe de précaution. Technical report, UNESCO, 2005.

[Cyrulnik1997] B. Cyrulnik. *L'ensorcellement du monde*. Odile Jacob, Paris, 1997.

[de Chardin2007] Pierre Teilhard de Chardin. *Le phénomène humain*. Points Sagesses, 2007.

[de La Mettrie1999] Julien Offray de La Mettrie. *L'homme machine*. Éditions Mille et Une Nuits, Paris, 1999.

[de l'Air et de l'Espace2008] Académie de l'Air et de l'Espace, editor. *La prise de risque : une nécessité humaine qu'il faut gérer*, Toulouse, France, février 2008.

[de Rosnay1995] J. de Rosnay. *L'homme symbiotique*. Éditions du Seuil, 1995.

[Descartes1966] R. Descartes. *Discours de la méthode*. GF - Flammarion, 1966.

[Dick1968] Philip K. Dick. *Do Androids dream of electric sheep ?* Del Rey, 1968.

[Dreyfus and Dreyfus1988] H.L. Dreyfus and S.E Dreyfus. Making a Mind Versus Modeling the Brain : Artificial Intelligence Back at a Branchpoint. *Daedalus*, Winter 1988.

[Feretti2013] Alain Feretti. Principe de précaution et dynamique d'innovation. Technical report, Conseil économique, social et environnemental, 2013.

[Flournoy1890] Th. Flournoy. *Métaphysique et Psychologie*. H. Goerg Librairie, 1890.

[Gibson1984 1998] William Gibson. *Neuromancien*. J'ai lu, 1984, 1998.

[Godard1998] Olivier Godard. Sur la nature du principe de précaution et ses effets sur la responsabilité. *Esprit*, (6) :185–189, 1998.

[Ivic2000] Ivan Ivic. Lev s. vytgovsky. *Perspectives : revue trimestrielle d'éducation comparée*, XXIV(3/4) :793–820, 2000. UNESCO : Bureau international d'éducation.

[Kurzweil2005] Ray Kurzweil. *The Singularity is Near : When Humans Transcend Biology*. Viking Press, 2005.

[Laborit1986] H. Laborit. *L'inhibition de l'action : biologie comportementale et physiopathologie*. Masson, Paris, 1986.

[Lorrain and Raoul2004] Jean-Louis Lorrain and Daniel Raoul. Rapport sur « Nanosciences et progrès médical ». Technical report, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 2004.

[Luria1976] Alexandre Luria. *Cognitive Development : Its Cultural and Social Foundations*. Harvard University Press, 1976. http ://marxists.org/archive/luria/index.htm.

[MacCulloch and Pitts1943] Waren S. MacCulloch and Walter Pitts. A logical calculus of the ideas immanent in neural nets. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5 :115–137, 1943.

[Moore] Gordon E. Moore. Cramming More Components onto Integrated Circuits. *Proceedings of the IEEE*, 86(1). Reprint from Gordon E. Moore, "Cramming More Components onto Integrated Circuits", Electronics, pp. 114-117, 1965.

[More1990] Max More. Transhumanism, Towards a Futurist Philosophy. http ://www.maxmore.com/transhum.htm, 1990.

[More1995] Max More. *The Diachronic Self : Identity, Continuity, Transformation*. PhD thesis, University of Southern California, 1995.

[Nordmann2004] Alfred Nordmann. Converging technologies - Shaping the Future of European Societies. Technical report, European Communities, 2004.

[Popper1991] Karl R. Popper. *La connaissance objective*. Champs Flammarion, 1991.

[Putnam1984] Hilary Putnam. *Raison, vérité et histoire*. Les éditions de Minuit, Paris, 1984.

[Roco and Bainbridge2002] Mihail C. Roco and William Sims Bainbridge. Converging Technologies for Improving Human Performance - NANOTECHNOLOGY, BIOTECHNOLOGY, INFORMATION TECHNOLOGY AND COGNITIVE SCIENCE. Technical report, National Science Foundation, 2002.

[Shannon1948] C.E. Shannon. A mathematical theory of communication. *Bell Syst. tech. Journal*, pages 379–423, 623–656, 1948.

[Skinner1938] Burrhus F. Skinner. *The behavior of organisms : an exprimental analysis*. Appleton Century Crofts, New York, 1938.

[Stephenson1992] Neal Stephenson. *Snow crash*. Bantam Books, 1992.

[Turing1936] Alan M. Turing. On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 2(42) :230–265, 1936.

[Turing1950] Alan Turing. Computing Machinery and Intelligence. *Mind*, 59 :434–460, 1950.

[Tzitzis2001] Stamatios Tzitzis. *La personne, l'humanisme, le droit*. Les Presses de l'Université de LAVAL, Canada, 2001.

[Tzitzis2004] Stamatios Tzitzis. *La personne : criminel et victime.* Les Presses de l'Université de LAVAL, Canada, 2004.

[Vinge1993] Vernor Vinge. The Coming Technological Singularity : How to Survive in the Post-Human Era. In NASA, editor, *Vision-21 Interdisciplinary Science and Engineering in the Era of Cyberspace*, number CP-10129, pages 11–22, March 30-31 1993.

[Watson2009] John B. Watson. *Behaviorism.* Library of Congress, 2009. With a new introduction by Gregory A. Kimble.

[Wiener1965] Norbert Wiener. *Cybernetics or control and communication in the animal and the machine.* MIT Press, 1965.

[Zaoli1998] Giancarlo Zaoli. *Rhinoplastie esthétique.* Piccin Nuova Libraria S.P.A., Padoue, Italie, 1998.

Deuxième partie

Le projet de recherche : *l'homme augmenté*

We choose to go to the moon. We choose to go to the moon in this decade and do the other things, not because they are easy, but because they are hard, because that goal will serve to organize and measure the best of our energies and skills, because that challenge is one that we are willing to accept, one we are unwilling to postpone, and one which we intend to win, and the others, too.
President John F. Kennedy
Address at Rice University on the Nation's Space Effort,Houston, Texas, September 12, 1962

Ici se situe le champ d'exploration scientifique de **l'humain augmenté**, à l'interface écologique de la biologie, de l'éthologie et de l'anthropologie, des sciences et des techniques des modèles et de la simulation, des sciences et des techniques de l'artifice et des artefacts. Notre projet est le fruit de notre parcours **de l'art dentaire à la bio-ingénierie humain machine**.

La définition et la validation d'un cadre scientifique et générique est une nécessité et un défi pour la description, la modélisation de l'intégration humain systèmes et la bio-ingénierie des systèmes humain machine.

L'humain machine est un concept intégrant systèmes cyber-physiques et systèmes humains biologiques. Comme défi scientifique, l'humain machine a pour objet la conception d'un cadre théorique dédié à l'intégration humain artefacts (ou humain systèmes) et à sa modélisation. Son domaine scientifique s'étend de son épistémologie et de sa théorie aux méthodes formelles et empiriques (expérimentales) de conceptualisation et de conception. Comme défi pratique, l'humain machine a pour finalité la conception correcte, l'amélioration et la fiabilité de l'ingénierie de l'intégration humain systèmes, de l'interaction humain-machine aux systèmes socio-techniques, de son comportement et de sa performance opérationnelle d'ensemble.

L'enjeu est d'échapper tant à une métaphysique interprétative et métaphorique des systèmes vivants qu'au réductionnisme et à la mécanisation actuelle de l'humain, réduits à des facteurs comportementaux et calculables. Il s'agit donc de proposer une *biologisation* des artefacts et de définir leurs principes de conception intégrative.
Cette affirmation est le fruit de notre expérience : de l'aide au diagnostic à l'aide à l'action, du geste médico-chirugical du chirurgien dentiste à l'aide à l'activité du spationaute lors de sorties extra-véhiculaires ; de la pré-conception d'un artefact ou d'un dispositif technique devant être piloté ou opéré et maintenu par un humain ou une équipe, un avion ou une de ses parties ; à la conception et à la validation de nouveaux concepts opérationnels et de principes d'organisation stratégiques d'un système socio-technique et de ses « composants » humains, artificiels, normatifs et de leurs interactions. Une application peut en être faite au système aéronautique par exemple.

Des systèmes homme-machines aux systèmes socio-techniques, l'abstraction du problème posé par l'intégration humain systèmes reste la même : existe-t-il un **cadre conceptuel**[68] **général de l'intégration humain systèmes** fondé sur un *isomorphisme* de

68. *Conceptuel* est à comprendre dans ses sens théorique et pratique : concept et connaissance générale, et conception et cadre d'ingénierie.

principes, de modèles et de lois, garantissant le couplage « humain systèmes » et l'intégration structurale et fonctionnelle de systèmes de natures différentes dans une dynamique d'organisation hiérarchique multi-échelle d'espace et de temps ?

S'il fallait le formuler autrement, la question est : quelle est **la nature de l'humain augmenté** ? Existe-t-il une **théorie bio-intégrative** de l'humain augmenté à même de fonder sa technologie [69] et son ingénierie ?

Notre projet de recherche *l'homme augmenté* est scientifique et non philosophique. Mais c'est depuis plus de vingt années le projet de recherche d'un *honnête homme*.

En résumé :

(a) La question épistémologique générale de notre projet est : **comment conceptualiser et décrire l'humain augmenté ?**

Lui sont associées trois questions scientifiques :

— quelle est la nature de l'humain machine ?
— existe t-il un cadre conceptuel générique et théorique valide de l'humain machine permettant de décrire, de concevoir et de valider de façon sûre l'émergence de fonctions et de dysfonctions de systèmes humain machine ?
— qu'est ce qu'un bon modèle de l'humain machine garantissant sûreté, sécurité, fiabilité et adaptabilité ?

(b) Le thème central est **l'intégration humain systèmes**, de la validation théorique des principes de couplage humain artefact à la modélisation et à la conception sûre des artefacts bio-compatibles et bio-intégrables d'aide à l'activité humaine ou opérés par un humain.

(c) L'objectif est **la recherche d'une théorie bio-intégrative de l'humain machine et des principes d'intégration humain systèmes** : définir et valider un cadre de connaissance et de description fiable d'un système de systèmes hétérogènes (par nature) et les principes formels et expérimentaux de conception et d'organisation intégrative du couplage humain (système biologique), artefact (système physique et système d'information - système cyber-physiques).

(d) L'enjeu est de trouver et de valider **des règles et des méthodes de modélisation et de co-simulation pour la conception sûre des systèmes techniques (humain machine) et organisationnels (socio-techniques) assurant la fiabilité et l'augmentation de l'expertise humaine** - c'est à dire l'extension du domaine d'expertise lié à l'action, aux capacités et compétences opérationnelles, en particulier celles qui sont intégrées et qui sont relatives aux actions et aux gestes techniques.

(e) La question pragmatique du projet est : **comment concevoir et développer des systèmes « humain machine » garantissant l'intégration, fiable et correcte**

69. Ses règles de l'art et ses techniques.

par construction, des systèmes artificiels avec les systèmes naturels anatomo-physiologiques qui sont au fondement de l'expertise humaine, et garantissant en conséquence la sûreté de fonctionnement du système intégré dans son ensemble ?»

(f) Son domaine technique est celui **des systèmes «humain dans-la-boucle» en général, des systèmes embarqués cyber-physiques intracorporels et extracorporels, des systèmes vestimentaires [70], et des environnements virtuels (réalités virtuelles et réalités augmentées) et d'intelligence ambiante**.

(g) Son domaine pratique est la conception **de systèmes critiques - sécurité, mission et vie critiques**, dans les secteurs de la santé, de l'aérospatiale, de la sécurité et de la défense.

(h) Le domaine d'ingénierie est l' **ingénierie bio-intégrative**.

(i) Il fonde une conception **d'extension du domaine d'action et d'extension du domaine de la vie**.

MOYENS DE MISE EN ŒUVRE :

— **Création d'une équipe de recherche pluridisciplinaire** à l'interface de la biologie, de la santé, des sciences et technologie de l'information et de la communication, des sciences de l'ingénieur, des sciences de la décision et de l'organisation, de l'art et du design.

— **Développement d'une plate-forme technologique de modélisation et de simulation numérique et expérimentale pour la validation des méthodes de bio-ingénierie humain machine et de test des prototypes d'artefact de l'homme augmenté**.

— **Création d'un fonds de dotation dédié ou d'une fondation.**

— **Mise en place d'un conseil scientifique, technique et éthique.**

MOTS CLÉS : Homme augmenté, humain machine, intégration humain systèmes, physiologie théorique, intégration, modélisation, simulation, interaction, bio-ingénierie, système critique, aide à l'action et organisation, environnement virtuel, réalité augmentée, réalité virtuelle, système cyber-physique, système bio-cyber-physique.

70. Wearable systems en anglais

1

Pertinence du projet et contexte stratégique

Sommaire

1.1 Contexte et enjeux économiques et sociétaux 67
1.2 Retombées 70
1.2.1 Le domaine médical 71
1.2.2 Le domaine de la défense 73
1.2.3 Le domaine aérospatial 74

Dans le domaine aérospatial, de la défense ou de la médecine, et plus généralement dans le domaine des systèmes « sécurité critique », la conception systémique des organismes et des organisations complexes est un enjeu majeur pour comprendre et anticiper l'émergence des fonctions ou la survenue des dysfonctions.

Les méthodes et les outils actuels de l'ingénierie système, en particulier des « systèmes de systèmes », sont issus de la cybernétique, de l'automatique, des sciences et techniques de l'informatique et de la cognition, ainsi que des *facteurs humains* pour ce qui concerne les systèmes « homme dans-la-boucle ». Pour ce faire, elles modélisent le système par une approche axée sur les composants techniques et managériaux en décrivant les liens d'interaction et les dispositifs d'interfaces physiques et de communications. Dans ce paradigme, l'interaction est vue comme un processus de communication entre des composants du système réduits l'un à l'autre dans des boucles symétriques « entrée, traitement de l'information, sortie ». Si elle a démontré son caractère heuristique, cette conception *néo-behavioriste*, métaphorique et réductionniste, n'est pas suffisante pour modéliser les systèmes intégrés dans leur globalité et leur relativité d'échelle d'espace et de temps. La compréhension et la description de l'organisation de ces systèmes complexes, organiques ou organisés, nécessitent un appareil de connaissance, de représentation et de modélisation renouvelé.

Un nouveau cadre de connaissance et de conception est ainsi nécessaire pour comprendre, décrire, anticiper ou simuler l'émergence des fonctions ou des dysfonctions des systèmes critiques complexes. Ce cadre doit considérer les exigences liées à la nature différente des éléments structuraux, à leur forme et gestalt, et à leur dynamique de couplage. Il doit permettre de décrire et de prescrire, et donc de concevoir les spécificités de l'architecture, du

comportement et de l'évolution du système intégré dans sa relativité d'échelle d'espaces et de temps. Situé dans un domaine d'action et de viabilité défini, ce référentiel assurera la cohérence structurale et fonctionnelle du système humain artefacts désiré.

La proposition et la validation expérimentale et formelle de ce cadre intégratif conceptuel permettant une conception renouvelée sont précisément l'objet de notre projet. Ce cadre est formulé en se fondant sur notre expertise et nos travaux antérieurs sur l'homme augmenté, pris comme un système dont on étudie le fonctionnement d'ensemble [Fass2006a] [Fass2012].

Le contexte premier d'expertise, de modélisation et d'expérimentation de cette proposition épistémologique et méthodologique d'un cadre théorique de conception intégratif est le domaine médical et les questions de « l'homme machine » associées. Ces questions pratiques concernent l'aide au geste technique de l'opérateur, pour l'implantologie dentaire ou la chirurgie orthopédique, la conception de systèmes implantables (pacemakers cardiaques par exemple) ainsi que la réanimation médicale dans la perspective d'une automatisation de l'administration de drogue dans la prise en charge du choc septique. Le corps augmenté ou l'organisme assisté sont pour nous un prototype de ces systèmes de systèmes « homme dans-la-boucle ».

D'autres contextes d'expertise sont l'aérospatiale et la défense. Pour l'aide à l'activité spatiale humaine extra-véhiculaire, les domaines d'application sont l'aide au geste technique des opérateurs en situation opérationnelle ou l'aide à la conception et au design des systèmes artificiels devant être opérés ou maintenus en condition opérationnelle par un humain [Lieber and Fass2011]. Enfin le contexte de la defense, à l'origine du concept d'intégration humain systèmes d'un point de vue technique et organisationnel [Thurman1986], qui conduit à considérer l'humain comme un *composant* critique du système, constitue un champ d'investigation épistémologique et appliqué au domaine « humain système ».

Notre projet est en conséquence un projet théorique et expérimental dont l'objet est l'épistémologie, la théorie de l'homme augmenté et la bio-ingénierie de l'humain machine.

Son but est d'apporter une preuve de concept : d'une part valider et dégager des grands principes de conception et de description de l'homme augmenté et d'autre part envisager leur généralisation à tous les systèmes humain machine et humain artefacts.

Pour réaliser ce projet nous souhaitons constituer une équipe pluridisciplainre réunissant des spécialistes de la biologie théorique et des neurosciences appliquées, de l'informatique théorique et des méthodes formelles, de l'humain machine ou de l'homme augmenté.

Cette équipe sera en lien avec des experts des domaines concernés pour permettre l'élaboration d'une maïeutique experte, d'un retour d'expérience et d'une analyse scientifique et pratique des systèmes humain machine tant en santé (systèmes de réanimation, dispositifs implantables d'assistance et de suppléance, système d'aide au geste médico-chirurgical) que pour le domaine aérospatial (systèmes d'aide à l'action et aux gestes techniques de pilotage ou de maintenance). Les domaines de la défense et de l'expertise légale (*cybersécurité et investigation numérique*) seront aussi considérés.

1.1 Contexte et enjeux économiques et sociétaux

Le thème de l'humain-machine est actuellement une thématique de recherche et de développement tant technoscientifique que philosophico-anthropologique. D'un côté, le réductionnisme postule qu'on peut réduire l'organisme humain à une machine pensante assortie de propriétés physiques et computationnelles, dans la filiation de Descartes et de La Métrie. De l'autre côté, on s'inscrit dans un idéal humaniste, une conception de l'Homme métaphysique et transcendant, issu des Lumières, de la Renaissance et de Vitruve.

Entre réductionnisme rationaliste et idéalisme métaphysique, le thème de « l'humain machine » et plus encore de « l'humain augmenté », fait débat.

L'enjeu de ces systèmes humain machine, de réanimation médicale et d'aide à l'activité spatiale humaine (voir partie 1, paragraphe 3.5, page 54), n'est donc pas tant une question de communication humain-machine que d'intégration de l'ensemble humain machines en un système cohérent assurant la capacité fonctionnelle et limitant les dysfonctions soit directement, soit par contre-mesure ou suppléance. C'est une question de sûreté et de fiabilité.

Pour les missions et le travail en équipe, la conception des artefacts doit aussi intégrer les dimensions psychosociales, socio-culturelles et sociotechniques. Dans le domaine de la défense, ces exigences intègrent en plus les besoins liés à la survie. Aujourd'hui les besoins de concepts opérationnels nouveaux et d'analyse stratégique exigent, au delà des questions de communications et d'interaction homme machine, de comprendre les couplages entre les différents niveaux d'organisation des systèmes composés d'humains, biologiques et anthropologiques, de techniques et de technologies et d'éléments managériaux juridiques et économiques, voire financiers. Le tout doit aussi être intégré à l'environnement biotique, abiotique et géopolitique pour essayer de comprendre comment émergent des fonctions stables et des dysfonctions.

Dans la formulation de ces exigences, il est ainsi possible de différencier plusieurs acceptions de l'homme augmenté à partir de distinctions de degrés de complexité et d'intégration homme systèmes dans le temps et dans l'espace. Réparé ou restauré, assisté ou suppléé, augmenté ou étendu, amélioré ou modifié, il est possible d'imaginer et d'envisager d'un point de vue conceptuel l'homme augmenté dans toutes ses dimensions philosophiques ou fantasmagoriques. Mais si de nombreuses questions éthiques se posent, seule la philosophie politique et un cadre législatif clairement défini et respecté peuvent fixer les limites de ce qu'il est possible de faire et de ce qui ne l'est pas, du permis et l'interdit. Cette prise de décision politique nécessite de s'appuyer sur des modèles et des simulations développés sur des principes scientifiques fiables fondés sur un cadre de connaissance théorique vérifié.

Les visions duales (voir l'introduction du chapitre 3 de la partie 1 3, page 45), entre opportunités et principe de précaution - pour ne pas dire de peur, n'en constituent pas moins un champ de questions et de problèmes scientifiques fondamentaux à explorer si l'on souhaite prendre des décisions en connaissance de cause.

C'est pourquoi ce projet propose d'explorer la question scientifique de l'intégration homme

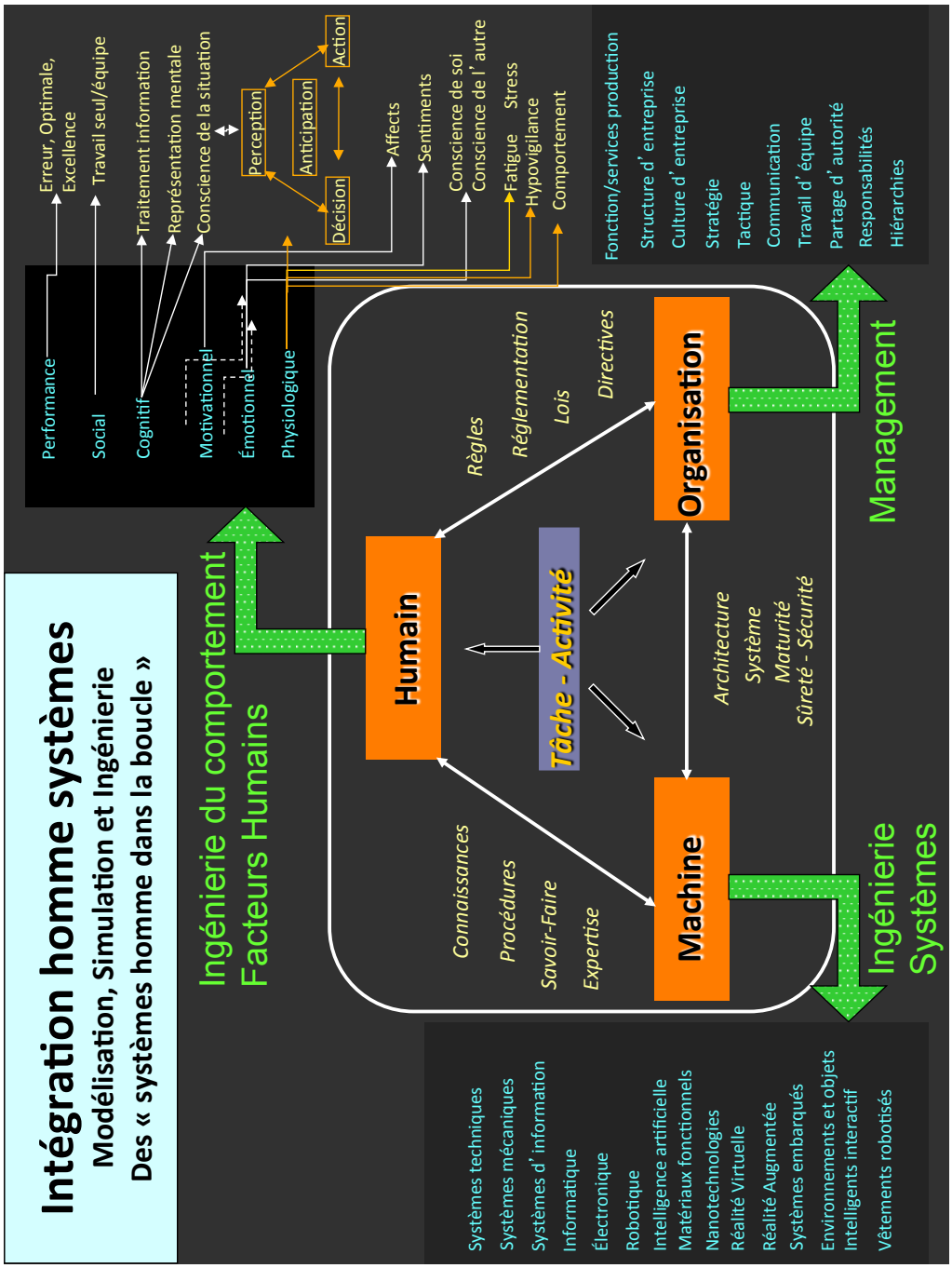


FIGURE 1.1 – Intégration humain systèmes : le développement des systèmes humain machine ou des systèmes socio-techniques dans un domaine d'activité donné a pour objet d'assurer dès la conception la cohérence, la fiabilité et la sûreté de l'intégration et du fonctionnement, entre le domaine de l'humain, habituellement dévolu à l'ingénierie du comportement et des facteurs humains, le domaine de la machine, habituellement dévolu aux spécialités de l'ingénierie en particulier de l'ingéniérie système, et d'autre part le domaine de l'organisation, habituellement dévolu aux juristes ou aux gestionnaires. L'enjeu scientifique est de proposer un cadre intégratif général de modélisation et de simulation pour une conception intégrée et correcte par construction. (Schéma produit par l'auteur dans le projet PAUSA en 2006).

systèmes et de l'humain machine. La connaissance des principes généraux de l'intégration humain systèmes, et des couplages possibles du niveau moléculaire au niveau social, devrait permettre de mieux appréhender et gérer les risques inhérents à la nature, aux nouvelles techniques et à la conception de l'homme augmenté.

Ces connaissances scientifiques nouvelles apparaissent comme un préalable pour fonder des projets de développement et de transferts innovants dans des domaines sécurité et vie critique ; indépendamment de l'impact et des évolutions possibles sur nos sociétés. Dans ce contexte, les questions éthiques et philosophiques de l'humain machine et de l'homme augmenté enrichissent de manière récursive l'épistémologie de l'humain machine. En créant des artefacts et des objets techniques, l'humain modifie sa relation au monde et à lui-même [Simondon1958]. Il étend sa condition [Arendt1958], et son domaine de vie et d'action. L'homme est par nécessité un « humain augmenté » [71].

Si le politique ou le législateur souhaite préciser les limites du développement de « l'homme augmenté », la décision en connaissance de cause et d'effet ne pourra se faire que dans le cadre d'un contexte de connaissance et de description scientifique renouvelé et validé. C'est dans cette perspective que se situe notre projet. Le cadre épistémologique renouvelé et fondé sur des principes théoriques vérifiés et des méthodes de modélisation et de simulation de systèmes humains artefacts, issus de ce projet, pourront servir à apprécier et anticiper l'émergence de fonctions bénéfiques ou indésirables des développements futurs de l'homme augmenté et à limiter les risques de dysfonction. Les résultats pourraient nourrir la réflexion éthique, et constituer des aides à la décision sociétales, législatives ou stratégiques, en connaissance de cause et en pleine conscience des effets induits, quand au développement ou non de technologies et de normes [72] pouvant agir sur l'humain et sa nature.

Les programmes de recherche résultent de décisions politiques qui intègrent des choix idéologiques, éthiques, stratégiques et économiques. C'est le cas par exemple pour la définition des futurs programmes « humain systèmes » pour les systèmes de défense.

L'enjeu de ce projet est éminemment double, théorique et pratique. L'évolution de notre démographie et de nos modes de vie nomades et connectés sont les véritables moteurs du développement et du marché des systèmes humain machines implantables, portables ou vestimentaires (« wearable »).

Avec le vieillissement de la population française et européenne dans son ensemble, la maîtrise de ces systèmes devient un enjeu de santé publique. En France, selon les chiffres de l'INSEE, plus de 30% de la population seront âgés de plus de 65 ans en 2040 ; en 2050 les plus de 65 ans seront 18 millions et 9% d'entre eux, soit 1,6 million de personnes, seront dépendantes. Les technologies de l'humain machine, de délivrance moléculaire, de stimulation ou de suppléance sensori-motrices et cognitives, seront les technologies de référence de la qualité de vie et de l'autonomie [Fass and Alson2009].

Dans le domaine purement médical, selon une étude américaine [Market2013] le marché des dispositifs médicaux implantables, des implants dentaires ou mammaires aux stimulateurs cardiaques et neurologiques, connaîtra une croissance de 8% par an d'ici à 2018,

71. Tout comme l'arraignée fait sa toile, la fourmi fait sa fourmillière ou l'oiseau fait son nid.

72. L'exemple de la mise en place contraignante d'une politique de l'enfant unique en République populaire de Chine [da Silva2006] a abouti à une modification de la famille, du comportement ou de la morphologie de ces enfants. À long terme c'est toute la société chinoise qui se trouve impactée.

représentant dès lors un marché de près de 80 milliards de dollars.

Pour les technologies portables - lunettes, montres, systèmes de capteurs et de monitoring intégrés aux vêtements, d'amélioration comportementale (« that improves user behavior ») [Technology2015], le marché passera de 14 millions d'unités vendues en 2011 et pour huit milliards et demi de dollars en 2012, à un marché de plus de 210 millions d'unités et un montant total supérieur à trente milliards de dollars en 2018. Ce marché est stimulé par ordre d'importance par la demande en dispositifs portables en parts de marché destinés à :

— la santé, majoritairement des dispositifs de mesure continue de la glycémie, avec une croissance de 50% d'ici à 2016 ;
— les loisirs en ligne (infotainment), majoritairement des montres connectées, avec croissance supérieure à 200% d'ici à 2016 ;
— le sport et le bien-être, à 65% des systèmes de monitoring de l'activité, avec une croissance de 50% d'ici à 2016.

Les dispositifs portables pour l'industrie et la défense représentent des parts de marché bien plus faibles même s'ils bénéficieront d'une croissance de l'ordre de 30% d'ici à 2016. Le développement et le marché des technologies de l'humain machine seront essentiellement portés par des applications de loisir, de bien-être et de santé. Les technologies actuelles sont essentiellement des systèmes "boucles ouvertes" non invasifs. Détecter qu'une personne a des troubles de l'équilibre avec risque de chute c'est bien, mais lui permettre de continuer à marcher normalement et de maintenir du lien social, en produisant par une interaction de couplage adaptée avec un artefact intégré un retour à un état fonctionnel viable, serait encore mieux.

Le projet « l'homme augmenté » s'inscrit dans cette perspective d'innovation, de la maîtrise des risques technologiques et sociotechniques et du respect de l'humain.

1.2 Retombées

La prise de risque et la maîtrise des risques sont au cœur de la conception des systèmes humain machine *sécurité critiques* des domaines médicaux, aérospatiaux et de défense. Ces risques opérationnels sont par nature aussi bien humains, techniques, environnementaux, juridiques, qu'également éthiques et politiques [Lin *et al.*2013]. Ces systèmes *sécurité critique* intègrent, sans doute depuis l'origine, la conception d'artefacts : du bâton au silex taillé ou au bistouri et au mini-manche du cockpit d'un avion, au poste de télé-opération de drone ou au poste de télé-chirurgie robotisé et de monitoring de réanimation. C'est un secteur qui est vecteur d'innovation conceptuelle et technologique. Les possibilités d'interaction de couplage humain machine augmentent. De nouvelles capacités opérationnelles apparaissent mais aussi de nouveaux risques. Les effets d'une automatisation de plus en plus sophistiquée ne sont pas sans risque lorsque des systèmes de plus en plus automatisés intègrent l'humain dans-la-boucle [Norman2014] [NTSB2014].

La conception sûre et la maîtrise de ces systèmes humain machine demandent une approche pluridisciplinaire qui répond aux enjeux fondamentaux scientifiques thématiques du domaine « homme et systèmes ».

En concevant l'humain machine comme un système dont on décrit et conçoit l'organisation dans son ensemble, comme intégrée, ce projet propose d'interroger et de renouveler

le cadre épistémologique de l'homme augmenté et de l'ingénierie des systèmes, sécurité, sûreté et vie critiques.

La validation experte, expérimentale et formelle de ces concepts a des répercussions à plusieurs niveaux dans les domaines concernés.

1.2.1 Le domaine médical

— **Les systèmes intracorporels** constituent la classe des systèmes destinés à être placés dans le corps. Ce sont des systèmes implantables (ou systèmes médicaux implantables). Il comportent trois catégories : les systèmes passifs, les systèmes actifs et les sytèmes interactifs. Les systèmes passifs sont des systèmes prothétiques implantables destinés à la chirurgie orthopédique, la chirurgie endovasculaire ou la chirurgie maxillo-dentaire. La caractéristique des systèmes passifs est d'assurer une réhabilitation, ou recontruction morphologique, pour l'organe ou la partie d'organe réparée ou remplacée. La biointégration est assurée par la forme et les propriétés bio-mécaniques. La bio-compatibilité est assurée par la nature même du ou des matériaux mis en œuvre et sa dynamique d'interaction moléculaire ou tissulaire. Des travaux de modélisation multi-échelle intégrant matériaux de structure, mise en forme et dynamique d'interaction permettraient de concevoir des dispositifs passifs à l'interface de l'ingénierie tissulaire et de biologie synthétique.
Les systèmes implantables actifs se caractérisent par l'action du matériau lui-même ou de son traitement de surface avec l'environnement tissulaire d'implantation, le système sanguin ou immunitaire. La modélisation théorique de ces interactions locales permettrait de mieux comprendre les principes de l'intégration entre des matériaux comme le titane ou l'hydroxyapatite utilisés en chirurgie maxillo-faciale.
Les systèmes implantables interactifs sont des sytèmes d'assistance (par exemple : les implants cochléaires), de suppléance (les systèmes d'électrostimulation cardiaque ou cérébrale) ou de remplacement d'un organe complet (cœur artificiel ou autre bioprothèse). La conception bio-intégrative et biocompatible de ces systèmes est un enjeu majeur de leur développement et de leur fiabilité à long terme. L'utilisation de matériaux biocompatibles ou de biomatériaux déspécifiés pour la fabrication de ces systèmes est un atout par exemple dans la fabrication d'un cœur artificiel et de sa partie endovasculaire. Une des difficultés importantes qui subsistent cependant est la biocompatibilité des algorithmes de contrôle et de commande [Carmat2015]. Les travaux de recherche que nous développons à l'interface de l'intégration humain système, de la biologie théorique et des méthodes formelles avec Dominique Méry et l'équipe MOSEL du Loria trouveront des applications pour la conception d'algorithmes biocompatibles corrects par construction, intégrant la nature des matériaux et systèmes mis en œuvre, la forme du système ou de l'organe et la dynamique d'ensemble assurant la sûreté de fonctionnement totale. Il sera aussi possible de travailler sur la conception et la simulation de géométries nouvelles de ces sytèmes implantables (par exemple la géométrie d'implantation intracardiaque ou péricardiaque des électrodes).

— **Les systèmes péricorporels** constituent la classe des systèmes destinés à être placés sur le corps au contact avec la peau et transcutanés. Deux catégories principales de systèmes péricorporels sont examinés : les sytèmes de transfusion ou de transtimulation et les systèmes portables vestimentaires (*wearable*).

La distribution automatique de drogue ou de médicament nécessite tant une modélisation physiologique que physiopathologique du fonctionnement et du dysfonctionnement associé. Qu'il s'agisse du traitement ambulatoire du diabète ou de la délivrance de noradrénaline dans le traitement du choc septique en réanimation, une approche physiologique systémique et intégrative est nécessaire pour modéliser ces pathologies, leur prise en charge et la délivrance optimale des molécules de traitement dans le corps. Comme pour les systèmes implantables, le but de nos travaux sera de fournir un outil de modélisation formelle et expérimentale pour la co-simulation de ces systèmes et l'automatisation du traitement médical, en particulier du choc septique. Les interactions générées et à modéliser par ces systèmes sont de nature « biochimique ». La modélisation biologique et intégrative est indispensable à la conception des algorithmes de monitoring et de commande d'injection biocompatibles et physiologiques. Ce travail sur la modélisation du choc septique et de son traitement fait l'objet d'une collaboration avec l'équipe du service de réanimation médicale et l'équipe INSERM 1116 dirigées par Bruno Lévy.
Les montres connectées constituent actuellement le prototype du système vestimentaire interactif avec les vêtements sportifs fonctionnalisés intégrant des capteurs de rythme cardiaque, de respiration, de capture de mouvement et de géolocalisation. Ces systèmes portables sont essentiellement destinés au monitoring des personnes. De nombreux projets de recherche et de développement concernent également le développement de la « robotique vestimentaire » avec le développement des exosquelettes qui visent à augmenter la force, l'endurance et la rapidité de déplacement. Comme pour le développement des prothèses robotisées myocommandables qui aujourd'hui posent de nombreux problèmes de conception, d'intégration et d'appropriation (pour ne pas dire incorporation) [Jarrasé2014], les exosquelettes médicaux ou techniques reposent sur une conception technocentrique. Notre contribution pour le développement de tels systèmes d'aide à l'activité humaine tout au long de la vie portera sur la spécification biologique (anatomique et physiologique) de ces systèmes et leur modélisation. Nous poursuivrons les travaux préliminaires initiés dans le cadre du Pôle fibre et du PPF « Matériaux fibreux » (voir paragraphe 3.2.4) sur la spécification physiologique de nouvelles fibres fonctionnelles permettant en particulier de *fonctionnaliser* les vêtements d'aide aux gestes techniques. Une autre voie de recherche et de développement est la modélisation intégrative et la fabrication personnalisée par technique de prototypage rapide et impression tridimensionnelle additive des exosquelettes de cicatrisation ou de contention post-traumatique et la fabrication des emboitures de prothèse pour les personnes amputées. La problématique de la conception et de la fabrication des emboitures est un cas remarquable d'intégration humain système. En effet, c'est l'élément d'interface et de fixation d'une prothèse qui assure le prolongement anatomique et proprioceptif de la prothèse passive ou active. Une collaboration avec la faculté de médecine et l'Institut régional de médecine physique et de réadaptation est envisagée.

— **Les systèmes extracorporels** concernent les systèmes à distance du corps. Les systèmes envisagés dans notre projet concernent l'automatisation et l'organisation de l'environnement de la chambre et du lit de réanimation d'une part et les systèmes de télémédecine et de téléopération médicale d'autre part.
L'automatisation de la prise en charge des malades en réanimation implique non seulement un cadre valide de modélisation mais aussi la conception d'un « tableau de bord » de monitorage et de pilotage permettant aux médecins et aux personnels soignants

de surveiller, de valider ou d'ajuster dynamiquement les paramètres du système selon la pathologie et l'état du patient, en particulier pour l'injection des substances à visée curative (cf. item ci-dessus).
L'autre axe d'application aux systèmes extracorporels médicaux est celui des systèmes de télémédecine, télédiagnostic et télétraitement. Actuellement les systèmes proposés sont des systèmes de surveillance, de diagnostic, d'expertise ou d'assistance aux prescriptions ou aux actes (Code de la santé publique, article R6316-1). Ces systèmes, s'ils sont « patient dans-la-boucle », sont destinés aux professionnels de santé pour la prise de décision et donc demeurent des systèmes boucle ouverte sans ces professionnels. L'enjeu est d'analyser le comportement sensori-moteur et cognitif lié aux mouvements ou aux gestes afin de produire des patrons de simulation artificielle multimodaux (*contre-mesures*) afin de maintenir ou d'améliorer la performance de l'opérateur ou d'augmenter l'autonomie des patients. Il s'agit donc de fermer la première boucle d'automatisation de ces systèmes en particulier pour les technologies de télémédecine assurant l'autonomie des praticiens avec augmentation de l'expertise (par exemple pour l'aide au geste médical chirugical en environnement de communication dégradé) ou pour la prise en charge ambulatoire des patients atteints de déficit sensori-moteur ou cognitif acquis avec le vieillissement. La question de l'autonomie dans un cadre intégratif est un enjeu pour la conception des technologies de l'autonomie des personnes âgées. Comme pour l'aide au geste médical chirurgical, les technologies non-invasives de l'autonomie de la personne âgée associent des systèmes péricorporels et des systèmes extracorporels de métacomputing, de prise de décision et de génération de « contre-mesures ».

1.2.2 Le domaine de la défense

— **Système d'aide à la gestion de crise et au commandement de situation à risque** : développement de méthodes et d'outils permettant de réfléchir sur les couplages émergeant selon les modifications du nombre et de la nature des éléments engagés, des formes tactiques et de la dynamique du système ou d'une bulle opérationnelle. Le but est de produire des simulations permettant d'anticiper l'évolution d'un système en crise ou les phénomènes de contagion et de couplage potentiellement à risque. Ceci permettrait de tester des hypothèses stratégiques d'intervention et des tactiques d'engagement en identifiant l'émergence de couplages à différentes échelles et donc l'apparition de fonctions ou de dysfonctions auxquelles personne n'avait encore pensé pour les éviter ou les provoquer.

— **Gestion des catastrophes** : permettre la prise en compte du changement d'échelle (de 1 à 10^9) et aider à la prise en charge des personnes quand l'expertise fait défaut dans une éventuelle composante santé. Notons aussi que la partie de modélisation appliquée à la réanimation médicale en particulier au traitement du choc septique, et du syndrome de choc en général, pourrait avoir des applications dans le domaine « nucléaire biologique chimique » (NBC).

— **Concepts opérationnels et ingénierie des systèmes homme machine à l'échelle individuelle ou des bulles opérationnelles** : mieux comprendre l'intégration humain systèmes et les effets des couplages non locaux et non symétriques à l'interface physique de deux sous-systèmes ou de deux organes (ou plus) pour définir et évaluer

de nouveaux concepts opérationnels, améliorer les méthodes de conception et d'ingénierie des futurs systèmes de combat (bulle opérationnelle individuelle ou de section). Assurer une réflexion sur la nature et l'économie des interactions de couplage homme système dans le cadre d'équipes opérationnelles hybrides et fournir un cadre de conception nouveau pour l'ingénierie des exigences et la spécification des futures applications et modalités de fonctionnement intégrées des systèmes homme robots, qu'ils soient terrestres, aériens, aquatiques ou vestimentaires.

1.2.3 Le domaine aérospatial

Le secteur aérospatial est le premier domaine, avec l'industrie nucléaire, des systèmes dits à « sûreté critique » (*safety critical*). La maîtrise des risques probables et la gestion de l'imprévu sot au cœur de la culture des concepteurs et des opérateurs des systèmes aérospatiaux, du développement de l'aéronautique civile et de défense, et de l'aventure spatiale.

L'aérospatial a donné naissance aux concepts et aux techniques d'ingénierie des *facteurs humains* initialement en lien avec la physiologie aérospatiale et la conception des systèmes de pilotage, le design des cockpits ou des vêtements techniques des personnels navigants techniques (combinaison de vol, pantalon anti-G, casque, head-up display, etc.).

Depuis une dizaine d'années le concept d'intégration humain systèmes se développe dans la recherche et le développement aérospatiaux, et associe dans le cadre de l'ingénierie de conception et de l'ingénierie systèmes les facteurs techniques, humains et organisationnels. La prise en compte de ces différents facteurs dans un ensemble intégré et cohérent est nécessaire pour garantir la sécurité et la fiabilité du système dans son ensemble ainsi qu'à ses différents niveaux d'organisation : du niveau socio-technique le plus complexe comme le système aéronautique national ou international, jusqu'à celui d'un dispositif ou à une partie du système pilotable ou opérable par un humain comme un cokpit ou un moteur en passant par le niveau d'un sytème technique majeur comme un avion ou un module spatial habitable (voir Fig. 1.2, page 75).

— **Le système aéronautique** est emblématique du système sociotechnique intégré.
Ses différents niveaux d'organisation sont le sol, le bord, l'espace aérien (espace de vol) et le spatial (pour les satelites de communication et de guidage). Ses éléments sont les aéroports, l'espace aérien (avec les différentes routes), le système de contrôle et de guidage au sol ou dans l'espace, et les avions. S'y ajoutent les institutions administratives d'organisation, de sécurité, de réglementation ou de certification (Eurocontrol, Agence européenne de sécurité aérienne - EASA, Direction générale de l'aviation civile - DGAC, Federal aviation administration - FAA, etc.). Avec une augmentation prévisible du trafic aérien de 4 à 5% par an dans les vingt prochaines années, l'organisation de ce dernier est devenu un enjeu majeur tant du point de vue technique ou économique qu'environnemental.
Elle comprend principalement trois aspects : premièrement le contrôle aérien - la gestion du mouvement des avions ; deuxièmenent la gestion de l'espace aérien - soit la gestion des différentes activités aériennes civiles, de defense et sans pilote, les volumes de trafic et les besoins en ressources ; et troisièmement la gestion des flux et des capacités, en organisant les priorités entre aéronefs pour aboutir à un flux ordonné. La

Système sociotechnique	Santé	Transport	Energie	Défense
A. Système extrêment complexe	Système national de santé	Eurocontrol	Ministère de l'énergie	Minsitère de la défense
B. Système très complexe	Hôpital ; Système d'information hospitalier	Système aéronautique national	Autorité de sûreté nuclaire	Armée Système de santé
C. Organisation complexe	Service hospitalier, S.I.	Compagnie aérienne	Centrale nucléaire	Bulle opérationnelle Groupe aéronaval
D. Système technique majeur	IRM, PETscan, TDM	Centre de contrôle aérien, avion	Salle de commande - contrôle	Aéronef
E. Sous-système technique critique	Respirateur, pompe à perfusion, ECMO, Pacemaker	Console de contrôle, cockpit	Dispositif de contrôle	Système d'arme Système de pilotage et de contrôle
F. Dispositifs et parties de système	Cathéter, aiguille, écrans, capteurs, effecteurs	Strip, Pilote automatique, HUD	Pompe d'alimentation, vanne	Lunettes de vision nocturne, vêtement, viseur, casque

FIGURE 1.2 – Les six niveaux de complexité intégrés d'un système sociotechnique de santé, de transport aéronautique, de production d'énergie et de défense d'après Booher [Booher2003]

question de l'automatisation et du partage d'autorité de régulation entre les systèmes de pilotage et de contrôle aériens intégrés est au cœur de projets internationaux tels le projet européen SESAR [73] ou le projet NextGen [74] aux États Unis. Elle porte sur les systèmes de pilotage et de contrôle aériens intégrés.

L'approche conceptuelle et scientifique proposée dans le projet PAUSA demeure actuelle (voir 3.2.3, page 134). Qu'il s'agisse de la gestion du vol, de la coopération homme systèmes autonomes ou des relations bord bord ou bord sol ou bord 1 - bord 2 [75], nous proposons d'étudier, de modéliser et de tester ces questions d'automatisation non plus dans une démarche de conception centrée sur l'homme mais d'intégration humain systèmes.

Le cadre conceptuel de l'humain augmenté permet d'appréhender l'automatisation et le partage d'autorité en termes d'intégration et d'interaction fonctionnelle avec l'organisation dynamique structurelle et fonctionnelle et non plus simplement en termes de relations structure-fonction et d'agent interactif. En effet, s'il existe une discontinuité structurale entre l'utilisateur et l'artefact ou bien un système d'artefact automatisé ou un système existant entre deux opérateurs partageant des interfaces de pilotage au travers d'un système artefactuel de communication, il existe une continuité fonctionnelle. Ainsi, un processus technologique ou comportemental du système considéré, comme le vol ou le pilotage d'un aéronef, peuvent être décrits dans un cadre intégratif unifié en termes de comportement d'ensemble, c'est-à-dire comme l'effet d'un produit ou comme le signal agissant, à partir d'un ensemble d'unités de structures qui peuvent appartenir à des niveaux différents de l'organisation structurale.

Cette définition en termes d'interaction fonctionnelle (inspirée de la physiologie théorique de Gilbert Chauvet) introduit une hiérarchie fonctionnelle construite sur des unités structurales qui sont autant de systèmes hiérarchiques et ne coïncide pas avec une hiérarchie linéaire (« anatomique ») liée à l'existence des discontinuités structurales. Cette approche permet de gérer dès lors les contraintes comportementales et environnementales de façon intégrée.

Dans ce contexte théorique, une mission aéronautique ou la réalisation d'un plan de vol est considérée comme un processus de production intégré à un système de production locale, le vol entre deux aéroports, ou comme un système local de contrôle aérien. Et, à des niveaux d'échelle supérieurs, le système de production est soit l'espace aérien national, soit l'espace aérien continental ou intercontinental, qu'il convient de gérer avec ses spécificités et ses contraintes particulières.

Cette approche, en termes de produit ou de production, permet de concevoir le partage d'autorité de régulation dans le système aéronautique comme un problème d'organisation et de gestion au sein duquel le pilotage d'un processus ou d'un système de production aéronautique est assimilable aux problèmes de gouvernance d'un système complexe ou de l'organisation du système d'information et de commande distribué et hétérogène d'une grande entreprise avec ses différentes filiales, unités de production et systèmes de distribution ; sans oublier la question de la gestion des ressources humaines.

73. Single European Sky ATM Research (ATM : Air traffic management)

74. Next Generation Air Transportation System.

75. "bord bord" désigne la relation des systèmes automatiques d'aide au pilotage et de contrôle aérien embarqué aves les pilotes, "bord sol" désigne la relation entre le contrôle aérien au sol avec les systèmes embarqués et l'équipage techniques de l'avion, "bord1 - bord2" désigne la relation entre les systèmes embarqués et les équipages de deux avions. Pour ces trois catégories, le but est d'assurer la séparation et l'anti-collision.

Dans les deux cas de l'aéronautique et de la gestion [76], les facteurs humains, dans leur diversité de culture d'entreprise ou de métier et leurs spécificités socioculturelles, ainsi que la diversité des dispositifs techniques de production (aéronefs, systèmes de contrôle aérien, aéroports) et de communication, présentent des caractéristiques organisationnelles similaires. Par exemple, la notion de tableau de bord est commune aux deux domaines. C'est un outil de pilotage ou de gouvernance. Nous proposons d'explorer et d'intégrer aussi dans ce projet les concepts et les techniques pertinents des sciences de gestion. Il sera possible ainsi de rechercher les principes et les primitives de couplage humain(s) automates(s) (ou agent autonome), humain - agent autonome ou encore humain - humain dans le système aéronautique, de définir de nouveaux concepts opérationnels et les scenarii associés, de les modéliser et de les simuler dans des modes naturels et formels sûrs et valides dans une perspective de certification.

— **Les systèmes opérables et de maintenance**
Tout système technique nécessite une maintenance, programmée ou non. C'est particulièrement le cas pour les systèmes sécurité critique dans l'aéronautique. Ces systèmes doivent ainsi être contrôlés, via un dispositif cyber-physique ou non, et opérés ou téléopérés, par un humain le cas échéant. La prise en compte de cette *opérabilité* par l'humain, seul ou en équipe, du système dans son ensemble ou d'une de ses parties qu'elle implique dès la phase d'ingénierie des exigences et de pré-conception, est une nécessité pour le maintien en condition opérationnelle dans le domaine de sécurité et de sûreté du système et une condition du respect des règles d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail compatibles avec la sécurité et la fiabilité des opérateurs.
En outre c'est aussi une nécessité pour la maturité du système, sa performance technique et économique, de son assemblage à, *in fine*, son démantèlement et son recyclage. À ce titre tout système technique est un système *humain dans-la-boucle* à un moment ou un autre de son cyle de vie.
Les concepteurs de ces systèmes techniques ont besoin de méthodes d'ingénierie systèmes et d'outils de modélisation fiables pour valider les architectures et les designs (mises en forme) des systèmes d'un avion en intégrant dès l'origine les facteurs humains aux facteurs techniques. Ces techniques de modélisation sont essentiellement numériques. Elles ont pour but de valider, par des simulations formelles ou par expérimentation directe en environnement virtuel, les choix techniques et la cohérence avec les procédures de maintenance et l'opérabilité des systèmes par des opérateurs humains. Qu'il s'agisse de paramètrer des manequins numériques ou de modéliser les facteurs humains intégrés aux exigences techniques, la question fondamentale demeure la justification, les *« rationale »*, des choix de conception.
Actuellement, ces choix sont justfiés par une approche qui réduit l'humain à des propriétés physiques, cybernétiques ou calculatoires avec pour postulat fondamental la sépartion de la machine et du programme ou du corps et du cerveau cognitif ; une conception qui est conforme au postulat introduit dans les années 1930 par Alan Turing, fondateur du courant classique de l'ingénierie cognitive et de l'interaction "homme-machine". Les mises en forme des systèmes opérables sont au mieux des choix guidés par des principes d'ergonomie physique et cognitive définis par des concepts empiriques de facteurs humains, au pire le résultat d'une optimisation d'espace et de

76. Nous préférons le mot gestion qui dénote de l'action de prendre en charge et du faire faire au mot magement dont l'origine est en lien avec l'activité de «diriger des chevaux».

forme soumise aux contraintes légitimes de sûreté de fonctionnement des systèmes techniques, ainsi que de leurs méthodes et règles de certification.
Cependant ce postulat heuristique trouve ces limites pour élaborer de nouveaux concepts opérationnels et répondre aux enjeux économiques liés à l'exploitation des aéronefs sans nuire à la sécurité des vols. Les enjeux liés à la concurrence entre les différents constructeurs aéronautiques et les exigences de maturité, de qualité de service et de performance économique demandées par les compagnies aériennes, nécessitent ainsi une approche du design et de l'ingénierie de conception de ces systèmes techniques opérables par un humain et des procédures associées. Une méthode de conception fondée sur des principes d'intégration humain systèmes, tels que nous les envisageons, nous semble prometteuse pour garantir la cohérence et la stabilité d'ensemble du système de maintence humain machine.
Comment dessiner un train d'atterrissage avec ses nombreux points de graissage qui garantissent la qualité du graissage en un temps donné, et donc la sûreté de sa cinématique, ainsi que la fiabilité opérationnelle des gestes du technicien de maintenance tout en assurant la sécurité de l'agent de maintenance ? Comment concevoir un système technique qui nécessite la présence de deux opérateurs de maintenance afin qu'il n'en mobilise plus qu'un tout en garantissant le même temps d'opération, la sécurité de fonctionnement du système ainsi que la la fiabilité et la sûreté de l'opérateur, quel que soit le contexte opérationnel. Voici deux exemples de questions auxquelles notre démarche permet d'apporter une réponse opérationnelle [77].

Dans le domaine spatial, en particulier celui des vols habités de longue durée, l'enjeu est d'anticiper les effets et la performance des concepts opérationnels envisageables associant humains et systèmes techniques automatiques ou robotiques lors des différentes phases de mission en environnement incertain, comme par exemple une mission sur Mars. Le défi pratique concerne l'amélioration et la fiabilité de l'intégration humain sytèmes des systèmes, allant de l'habitabilité aux systèmes socio-techniques, en passant par les interfaces d'interaction humain machines ou humain robots, assurant la santé de l'équipage et la performance des opérateurs et des sytèmes, c'est à dire la réussite de la mission en réduisant les risques identifiés associés à la mission. La définition et la validation formelle et expérimentale de fondements scientifiques nécessaires à l'ingénierie de conception intégrative de ces systèmes spatiaux est l'objet de notre collaboration avec le département "Human systems integration" du Ames Research Center de la Nasa (voir annexe B, page 207).

— **Les systèmes d'aide aux gestes techniques**
Au commencement était le geste, celui du chirugien-dentiste implantologiste ou de l'astronaute en sortie extravéhiculaire. La conception de systèmes d'aide au geste technique pour garantir sa fiabilité et sa performance opératoire et opérationnelle est à la source de notre motivation essentielle, initiale et actuelle (voir partie 1 - section 2.3, page 20).

Qu'ils soient médicaux, de défense ou aérospatiaux, ces systèmes humain artefacts nécessitent la mise en place de procédures et de méthodes scientifiquement validées pour

77. Les systèmes de pilotage, le cockpit ou la salle de gestion de la mission d'un drone, constituent une classe particulière de systèmes techniques automatisés opérables.

faire la preuve de leur sûreté et de la fiabilité d'ensemble. Notre projet a pour objectif de fournir une méthode de co-simulation intégrative et de certification de l'intégration humain systèmes fondée sur des principes théoriques et expérimentaux robustes.

2

Positionnement et objectifs du projet

Sommaire

2.1 Contexte scientifique et technique 82
2.2 L'intégration humain système 83
2.3 Épistémologie et modélisation des systèmes humain machine 84
2.4 Conception sûre des systèmes humain dans-la-boucle ou Bio-CPS 85
2.5 Modélisation intégrative physiologique et physiopathologique au service de l'automatisation de pratiques avancées en santé 87
2.6 La modélisation et la certification des systèmes humain machine critiques 87

La conception sûre et le développement maîtrisé des systèmes humain machine multi-échelles est un enjeu majeur tant pour les applications grand public que professionnelles, spécialement dans les domaines sécurité critique de la santé, de l'aérospatial et de la défense comme nous l'avons souligné dans le chapitre précédent.

Avec les systèmes interactifs ou cognitifs actuels [Engelbart1962] [Licklider1960], du smartphone au cockpit d'un avion et à la chambre de réanimation, ou avec les systèmes techniques devant être opérés ou télé-opérés par un humain, les limites entre l'humain et l'artifice, produit de l'humain, s'estompent. Avec la convergence pluridisciplinaire nano-bio-info-cogno (NBIC) [Roco and Bainbridge2002] [Nordmann2004] cette dynamique s'amplifie. Les futurs nano-systèmes biotechnologiques implantables, les technologies vestimentaires et les systèmes d'intelligence ambiante et ubiquitaire pour des applications ou de défense ou des application civiles à tous les âges de la vie laissent imaginer de nouveaux bénéfices et de nouveaux risques à maîtriser en connaissance de cause.

Cette disparition des limites entre l'humain biologique et social et l'artefact physique interactif et informationnel (système cyber-physique) questionne les méthodes actuelles d'ingénierie et d'ergonomie de conception des systèmes cognitifs [Amalberti1998] [Hollnagel and Woods2005], la maîtrise des risques et le cadre juridique définissant les bonnes pratiques. Les développements actuels et futurs de l'homme augmenté posent ainsi de nouveaux défis

scientifiques et techniques mais aussi de nouveaux questionnements épistémologiques [Bailly and Longo2006].
Actuellement, l'humain « biopsychosocial », pour reprendre l'expression d'Henri Laborit, est réduit à un être cognitif computo-logico-symbolique désincarné dans une relation métaphorique réciproque et symétrique aux artefacts. Bien qu'elle se veuille réductionniste, cette conception humain systèmes demeure dualiste. La question philosophique de la dualité « corps esprit » a été remplacée par la question de la dualité « corps cerveau », où le cerveau est conçu comme une machine cognitive ou computationnelle indépendante de son substrat organique qui traite de l'information avec des boucles de rétrocontrôle [Conant and Ashby1970] [Ashby1957]. La vision en est inspirée des machines de Turing et de Von Neumann, de la théorie de la communication de Shannon, Wiener et Weaver, de l'automatique et de la cybernétique [Wiener1965].
Avec la convergence pluridisciplinaire, les enjeux de « l'humain machine » et des systèmes « humain artefacts » évoluent. Les métaphores heuristiques comportementales et cognitives, qui demeurent productives pour la conception des systèmes automatiques, génèrent des questions et des problèmes nouveaux et nous conduisent à questionner les fondements conceptuels théoriques et expérimentaux de « l'humain machine ».
La conception correcte et la technologie sûre des techniques et des artifices de « l'homme augmenté » nécessitent un système de connaissances et de description revisité, sans (trop) d'*a priori* idéologiques et métaphoriques. Il s'agit pour nous de concevoir un cadre d'intégration allant des systèmes homme-machine aux systèmes socio-techniques [Booher2003] de l'humain avec ses artefacts comme une question de couplage intégratif dans les dimensions multi-échelles de deux systèmes de natures différentes et non réductibles l'un à l'autre [FASS2002] : l'humain, biologique et anthropologique [Edelman2006] et l'artefact physique computo-logico-symbolique.
La compréhension de cette hybridation synthétique nécessite un nouvel appareil conceptuel et un nouveau système de connaissances de l'intégration humain systèmes, capable de penser l'humain machine et ses nouvelles pratiques, de les modéliser et de les tester comme un tout structural et fonctionnel intégré : une épistémologie de l'extension du domaine de la vie et de la nature humaine augmentée.

2.1 Contexte scientifique et technique

Le projet se situe dans un contexte scientifique et technique multidisciplinaire. Il institue des liens entre les sciences de l'humain et de la santé, de la biologie moléculaire à la biologie théorique systémique et intégrative en passant par la bio-éthique et le droit de la santé et de la personne, les sciences des systèmes et des systèmes de systèmes et les sciences informatiques, en particulier l'algorithmique et les méthodes formelles. Il met en place des liens entre l'expertise médicale, art et techniques, et les technologies de l'information, de la modélisation et de la simulation avec l'ingénierie système, la bio-ingénierie et la conception des systèmes humain machine.

Il anticipe des besoins à venir quand le monitoring sera complété par des couplages de « régulation » ou de contre-mesure générés par des systèmes d'interfaçage dynamiques fermant la boucle aussi bien sur des systèmes organisationnels que sur des personnes, en vue de permettre leur maintien en condition opérationnelle, l'aide à la décision et l'aide à

l'action afin de soutenir ou d'augmenter les capacités opérationnelles. Ces futurs systèmes humain machines agiront sur la dynamique des fonctions sensori-motrices et cognitives. Ils assureront l'homéostasie ou la stabilité structurale des systèmes dans leur domaine de viabilité [Aubin2005].

Le projet explore 5 thèmes scientifiques et techniques majeurs interdisciplinaires :
— intégration humain systèmes : de la science des systèmes à la biologie et la physiologie intégrative théorique appliquée à l'ingénierie homme systèmes ;
— épistémologie et modélisation des systèmes humain machine : quel système de connaissances et de description ?
— conception sûre des « systèmes humain dans-la-boucle » : modélisation numérique, ingénierie systèmes et facteurs humains ;
— modélisation physiologique et physiopathologique au service de l'automatisation du traitement ou de la prise en charge du patient qu'il soit hospitalisé ou en ambulatoire ;
— modélisation et certification des systèmes médicaux critiques.
La description synthétique de ces thèmes et leurs enjeux s'appuie sur nos travaux et nos résultats de recherches antérieures et ceux de nos partenaires.

2.2 L'intégration humain système

L'intégration humain systèmes (IHS) est à l'origine un concept technique et managérial [Haskins2010] inventé dans les années 1980 dans les domaines de la défense aux USA. Il est utilisé dans la définition des exigences des programmes d'acquisition afin d'assurer une approche complète ou holistique des systèmes de défense [Dep2012]. C'est à l'origine un terme parapluie qui recouvre différents domaines de la recherche en facteurs humains et de l'ingénierie systèmes qui prend en compte les différents niveaux d'échelle possibles des systèmes humain-artefacts, du niveau homme-machine au niveau socio-technique. Il inclut des thèmes comme la conception et le design technique, l'interaction humain-machine [Division] ainsi que les ressources humaines, les capacités personnelles, la gestion des risques professionnels, la formation et l'entraînement, la performance humaine ou la capacité de survie (*survavibilité*). Définir un système plus largement que les aspects matériels et logiciels renvoie à la conception centrée sur l'humain (*human centred design*) [Ehrhart and Sage2003], par opposition à la conception centrée sur l'automatisation et la machine [Amalberti1998]. Cette approche nécessite de penser l'humain comme un élément du système et de le traduire qualitativement au cours du processus de conception, de développement et de test [78].
Cette méthodologie [Pew and Mavor2007] a pour objet l'intégration des capacités et des performances humaines, du niveau individuel au niveau social [Rouse and Boff2005], pour la conception des systèmes humain smachines complexes assurant la sécurité, la sûreté, l'efficacité et le maintien en condition opérationnelle, voire la survie. C'est un enjeu majeur de fiabilité d'ensemble des systèmes [Booher2003].
Dans le cadre du projet *L'homme augmenté*, l'intégration homme systèmes n'est pas seulement une question technique et organisationnelle, elle est nécessaire à la spécification sûre des technologies et des artefacts ayant pour finalité d'augmenter les capacités

78. Les dimensions économique (coût effectif, rentabilité économique, retour sur investissement...) et cycle de vie (de la conception au démantèlement) doivent aussi être pris en compte, et ceci dès les premières phases de conception (analyse des besoins et ingénierie des exigences) [Rousse2010].

et d'améliorer les performances opératoires et opérationnelles, sensori-motrices et cognitives. L'établissement d'un cadre théorique et de principes scientifiques formels et expérimentaux valides est un enjeu scientifique majeur pour le développement des systèmes interactifs actuels (du smartphone au cockpit et à la chambre de réanimation) de même que pour l'ingénierie de conception de systèmes techniques devant être opérés par un humain, par exemple pour leur maintenance mécanique. Il l'est d'avantage encore pour les futurs développements, déjà envisagés, des nanosystèmes biotechnologiques, des systèmes d'intelligence ambiante et ubiquitaire ou des futurs systèmes de défense et du futur système aéronautique. Les principes et les méthodes résultant de ce projet pourront servir à simuler et anticiper les effets et donc à prendre des décisions ayant des répercussions sur la société en connaissance de cause quant au développement ou non de technologies susceptibles d'agir sur l'humain et sa nature. C'est un enjeu éthique.

En questionnant le concept d'intégration humain systèmes dans le contexte de l'homme augmenté, notre projet vise à dépasser cette approche et à lui fournir des fondements épistémologiques nouveaux.

2.3 Épistémologie et modélisation des systèmes humain machine

La conception des environnements et des systèmes artificiels pour l'entraînement ou les activités opérationnelles nécessite de prendre en compte simultanément les systèmes techniques, les *patterns* de stimulations multimodales générés artificiellement et leur intégration dans la dynamique du comportement humain cognitif, sensorimoteur etc.

Il s'agit du couplage de deux systèmes de natures différentes : d'une part un système biologique, l'humain, et d'autre part un système physique, l'artefact interactif plus ou moins immergé, portable ou englobant.

Parce que l'intégration sensori-motrice est un élément essentiel au contrôle de la posture, de la locomotion et du geste, comme dans les activités intégrées complexes du corps telles que la saisie d'objets et la manipulation d'outils, l'intégration humain systèmes est l'un des principaux défis pour la conception des systèmes interactifs d'aide à l'action et au geste technique.

L'objet de l'IHS est d'intégrer de façon cohérente les composants humains et les technologies passives et interactives. Pour être sûrs et prédictifs, les modèles d'IHS, les concepts d'interaction et d'intégration, les méthodes et les règles d'ingénierie de conception doivent être épistémologiquement bien fondés. Tout comme une théorie mathématique de la physique et des principes fondent la mécanique ou les sciences des matériaux, par exemple pour l'ingénierie technique des avions, l'IHS requiert une théorie de l'intégration, un cadre théorique (mathématique) et des principes généraux, pour le couplage d'un système biologique (le ou les humains) avec un système physique (le ou les artefacts - suivant le degré de complexité du système artificiel).

Par conséquent, selon les concepts de l'IHS, la conception des environnements artificiels ou organisationnels implique un véritable changement de paradigme d'une ingénierie de conception métaphorique fondée sur des scénarios d'usage, d'utilité et d'activité - avec des modèles et des règles métaphysiques de l'interaction et de la cognition -, à une ingénierie de l'interaction et de l'intégration fondée sur une théorie intégrative de la biologie humaine

et ses principes. C'est un enjeu fondamental pour la conception prédictive, l'opérabilité et la maturité des futurs systèmes techniques et/ou informationnels, les systèmes sécurité et vie critiques en aéronautique, en médecine ainsi que pour les systèmes de défense [Fass and Chauvet2006].

Actuellement, pour la majorité des systèmes humain machines existants, l'interaction humain systèmes se fait via des dispositifs d'interface ou de communication qui ne sont pas directement « connectés » au corps des utilisateurs et en boucle ouverte. Seuls les dispositifs automatiques médicaux implantables et les systèmes des environnements virtuels (réalité virtuelle et réalité augmentée) ferment la boucle. Ils intègrent l'humain dans-la-boucle pour assurer une fonction qui serait altérée ou impossible sans ces dispositifs techniques.

De nouveaux concepts techniques et opérationnels apparaissent pour ces systèmes humain machines à boucles fermées qui étendent le domaine fonctionnel capacitaire et d'expertise, et induisent une extension du domaine de vie et de comportement humain.

Le premier domaine concerné par ces nouveaux concepts est celui de la médecine.

2.4 Conception sûre des systèmes humain dans-la-boucle ou Bio-CPS

L'intégration humain systèmes comprend la conception augmentée de l'humain dont les objectifs sont, en utilisant des technologies comportementales, d'accroître les capacités humaines et d'améliorer la performance humaine dans des activités et opérations critiques.

La première approche consiste à intégrer, dès les phases d'analyse des besoins et de formulation des exigences, la prise en compte des déterminants biologiques sensori-moteurs et cognitifs des capacités opératoires de l'humain et à les traduire sous forme de spécifications de design technique selon le concept d'affordance [Gibson1977] [Fass2015].

Pour la deuxième approche, grâce à l'usage de systèmes vestimentaires faits de technologies similaires à celles des environnements virtuels ou à la robotique vestimentaire, il existe de nombreuses applications possibles pour l'aide au geste technique, par exemple dans l'aéronautique, le spatial ou la chirurgie.

En effet, le geste est un comportement psychophysiologique hautement intégré, produit de l'organisation dynamique de nombreuses fonctions physiologiques [Kelso *et al.*2001] [Soetching and Flanders1992] [Roll2003] et des interactions fonctionnelles avec l'environnement naturel ou artificiel. Assister le geste et améliorer les habiletés humaines revient à coupler les fonctions physiologiques et les organes avec des systèmes techniques grâce aux interactions multimodales que ces derniers génèrent artificiellement.

Ainsi, la conception d'un système homme dans-la-boucle doit intégrer de manière sûre et cohérente les facteurs humains anatomiques et (neuro-) physiologiques qui fondent les comportements opérationnels. Elle conditionne les technologies cognitives interactives d'assistance ou le design intégratif de systèmes techniques opérables par l'humain. Il s'agit là de l'ingénierie de conception des systèmes *homme dans-la-boucle* [Fass2006b].

Cette approche est nécessaire à la modélisation robuste et la conception des futures règles de l'ingénierie de l'IHS ayant pour but d'assurer la stabilité ou d'augmenter les capacités et la performance humaines. Concevoir un tel système nécessite une théorie intégrative

qui tienne compte d'une part des spécificités de l'organisation biologique des systèmes vivants, en accord avec les principes de la physique et d'autre part de la manière cohérente d'organiser et d'intégrer les éléments structurels (structurels aux niveaux atomique et moléculaire) et fonctionnels artificiels. De plus, tout comme les systèmes d'ingénierie reposent sur des principes physiques et leur modélisation sur des représentations mathématiques, les systèmes « humain dans-la-boucle » nécessitent d'être fondés sur des principes physiologiques d'intégration, leurs représentations mathématiques et leur formalisme [Chauvet1993a] [Chauvet1993b] [Chauvet1993c].

En conséquence, il y a deux facteurs qui limitent actuellement l'IHS. Le premier est une mauvaise compréhension de l'autonomie des systèmes vivants. Le second est une sous-estimation de la nature des interactions et du processus biologique d'intégration impliqué dans la dynamique de connaissance, qui est la fonction physiologique de couplage adaptatif du corps vivant à son environnement.

Par ailleurs, l'intégration de systèmes pour concevoir des systèmes *humain dans-la-boucle* :

i. implique le passage d'une ingénierie de conception développée sur des métaphores [Stanney1995] et des scénarii d'activités et d'usages, établis sur des modèles, des principes ontologiques et des règles métaphysiques de l'interaction et de la cognition, à une science et une ingénierie système fondée sur des concepts scientifiques validés expérimentalement et formellement, et des concepts opérationnels validés par les experts du domaine concerné,

ii. nécessite une nouvelle approche épistémologique et théorique de la nature de la connaissance et de la cognition comme processus intégrés et intégratifs biologiques, tant anatomique et que physiologique.

En augmentant la cognition et les boucles sensori-motrices par une méthode de conception intégrative de couplage avec des systèmes techniques ou automatiques, on modifie ou on augmente les fonctions supports des capacités et des activités humaines. Par ailleurs, on prolonge ou on étend l'anatomie par l'outil ou l'artefact physique et la physiologie du comportement par les capacités dynamiques de couplage ou d'affordances (les bases fonctionnelles) du système homme machine.

Concevoir et développer ces systèmes avec les technologies des environnements artificiels nécessite d'intégrer les éléments artificiels et structurels de design général par des interactions de couplage artificielles ou artefactuelles fonctionnelles.

Dans ce cadre scientifique, la question posée devient : comment intégrer les besoins et les exigences techniques et humaines dans les spécifications d'un système technique (système physique et informationnel) opérable par un humain (système biologique), garantissant la stabilité, la cohérence fonctionnelle et la viabilité du système global dans l'espace et dans le temps ?

Dans cette perspective, il est nécessaire de concevoir les principes théoriques de l'intégration humain systèmes en se fondant sur une approche continue entre biologie et anthropologie [Lorenz2010] [Lyon2006] [Edelman2006], en tenant compte des principes vérifiés et isomorphiques de la science des systèmes [Bertalanffy1968] et en s'appuyant sur les principes de la biologie et de la physiologie intégrative théorique de Chauvet [Chauvet1998]. Cette approche pluridisciplinaire nous permet de formuler des méthodes et les justifications rationnelles et expertes de conception et de production de couplages humain artefacts sûrs et fiables et, le cas échéant, prédictives dès la phase d'ingénierie des exigences.

À partir de nos travaux expérimentaux sur l'aide à l'action et l'homme augmenté, nous avons proposé et publié un cadre de description et de modélisation intégratif pour l'ingénierie système.

2.5 Modélisation intégrative physiologique et physiopathologique au service de l'automatisation de pratiques avancées en santé

Peu connus du grand public, le sepsis et le choc septique sont deux états pathologiques majeurs où le pronostic vital est engagé. Dans tous les cas, ils nécessitent une hospitalisation lourde en service de réanimation. Devant les nouveaux risques infectieux, améliorer le diagnostic précoce et l'efficacité thérapeutique du sepsis et du choc septique est donc un enjeu majeur de santé publique et d'économie de la santé pour les années à venir.

Les patients en état infectieux sévère nécessitent un traitement par perfusion continue de médicaments destinés à soutenir leur fonction cardiovasculaire. Actuellement, la surveillance et l'ajustement des doses de médicaments délivrés en continu par les pompes sont faits toutes les demi-heures ou toutes les heures par les infirmières. Celles-ci suivent les consignes des médecins avec pour objectif de rétablir ou de maintenir la pression artérielle au dessus d'un seuil minimal (diastolique). Mais la surveillance et les ajustements sont faits de façon discontinue selon des principes empiriques. Des travaux préliminaires semblent montrer que le pilotage automatique dynamique des pompes permettrait de diminuer le temps de perfusion de médicaments, utiles mais potentiellement toxiques [Merouani *et al.*2008].
Une amélioration des stratégies de traitement du choc septique pourrait s'appuyer sur l'automatisation du traitement et de l'analyse des signaux physiologiques (rythme cardiaque, pression artérielle...) et des données biologiques pour la prise de décision et la distribution automatique des médicaments par des pompes asservies en fonction de modèles dynamiques physiologiques et non plus suivant une distribution linéaire. Des résultats préliminaires montrent qu'un monitorage automatique de l'injection de noradrénaline diminuerait de 3 jours le temps d'hospitalisation. Il s'agirait de tester la faisabilité technique de l'automatisation du monitorage et de l'administration des médicaments à visée cardiovasculaire dans les états de choc.
Actuellement, toutes les grandes études thérapeutiques fondées uniquement sur la biologie moléculaire du choc septique ont été des échecs [Ward20012]. Cela rend nécessaire une approche intégrée et intégrative (physiologie système) [Pierre Asfar2013]. Notre projet s'inscrit directement dans la perspective de ce cadre renouvelé de la compréhension et du traitement du choc septique en particulier pour son automatisation en réanimation.

2.6 La modélisation et la certification des systèmes humain machine critiques

Les systèmes intégrant une ou plusieurs entités logicielles en interaction avec l'environnement prennent de plus en plus de place dans notre vie quotidienne et le domaine de

la santé. Le projet concerne les systèmes réellement implantés dans le corps, comme un pacemaker [Scientific2007] ou les systèmes implantés en vue de contrôler les soins apportés au patient. D'une certaine mesure, il s'agit de systèmes enfouis ou embarqués avec un aspect critique très accentué par la relation au patient. Ces systèmes sont chargés de contrôler et de superviser des organes et d'ajuster leur action (de "décider") en fonction de paramètres de l'environnement. La fiabilité et la sûreté de tels systèmes sont des enjeux majeurs tant pour le patient que pour le soignant. Leur développement s'appuie sur des techniques de test, qui ont atteint leurs limites [Insup Lee and Sha2006] et il en est de même des questions liées à la certification et à la validation. Si les questions liées aux patients sont très critiques, il en va de même pour les personnes dont le travail est de mettre en place de tels systèmes et d'effectuer leur maintenance. Par le passé, un certain nombre d'événements ont conduit à s'interroger sur la sûreté et la fiabilité de tels systèmes. Le cas du Therac 25 [Levenson and Turner1993] est une bonne illustration de ces questions. Il met en exergue les techniques de génie logiciel nécessaires pour concevoir des systèmes cliniques et de soins satisfaisant à des exigences de fiabilité et de sûreté. L'utilisation de tels systèmes, comme par exemple un appareil chargé d'injecter une certaine quantité d'un produit médical à un patient, nécessite une formation des personnels soignants car les interfaces de tels systèmes sont parfois très délicates à utiliser. Harold Thimbleby avait mis en évidence des incidents regrettables dans la manipulation de tels systèmes au cours de son exposé de la conférence FMIS 2006. Le cas dit *des surirradiés de l'hôpital d'Épinal* en est également un malheureux exemple [Guillaume Walk and Seligman2007].

L'interaction avec de tels systèmes est également un point critique. C'est un aspect que plusieurs types de techniques peuvent permettre de résoudre. Les systèmes deviennent de plus en plus complexes et cette complexité génère de nouvelles questions liées à la décomposition et à la composition des entités logicielles induisant des interactions de service parfois fatales. Même un dispositif assez courant comme le pacemaker cardiaque demeure un système à maîtriser sur le plan de la modélisation formelle comme l'indique le challenge [Cliff Jones2006] lancé sur les systèmes critiques à l'initiative de Tony Hoare [Hoare2003]. Cette activité a pour objet de valider des approches formelles sur de vrais systèmes et le cas du pacemaker est donné comme un système intéressant pour comprendre les questions posées par la modélisation et la validation de tels systèmes.

Durant ces dernières années,dans l'équipe MOSEL au LORIA, Dominque Méry et Niraj Singh ont développé un ensemble de modèles formels du pacemaker [Méry and Singh2010], de la conduction électrique du coeur [Méry and Singh2011a] ainsi que du diagnostic médical pr ECG, [Méry and Singh2011b] [Méry and Singh2011]. Au cours de ces études, ils ont dégagé des techniques permettant d'élaborer les modèles de fonctionnement de ces systèmes médicaux cyber-physique [Lee *et al.*2012] [Méry and Singh2013]. Dans le cadre des questions de certification, ils ont proposé un processus de certification [Méry and Singh2010b] intégrant la méthodologie formelle sous la forme du langage Event B et d'outils de la plate-forme Rodin [Coleman *et al.*2005]. Cette méthodologie nécessite d'être validée sur des études de cas ayant trait à des aspects médicaux. L'étendue de cette méthodologie permet d'associer des industriels et des médecins.

Le développement de modèles formels pour le pacemaker (une électrode et deux électrodes), pour le modèle électrique du cœur et pour l'ensemble (cœur, pacemaker) a permis de dégager une méthodologie fondée sur la combinaison de plusieurs techniques comme la vérification et la validation de modèles, mais aussi l'animation en temps réel [Méry and Singh2010a] de modèles formels. La méthodologie permet de couvrir une par-

tie de ce qui est appelé certification [Méry *et al.*2014]. Il est absolument nécessaire de la reprendre et de procéder à une étude de cas de cette classe d'applications. Il s'agit dans cette perspective d'étudier la modélisation aidée par la preuve de telles entités tant du point de vue du patient que du point de vue du soignant et de développer des modèles de référence de ces systèmes en vue de leur validation, certification, maintenance, utilisation et adaptation.

3

Objectifs

Sommaire

3.1 Rechercher, développer et transférer 92

3.1.1 Objets de recherche 92

3.1.2 Contenus de développement 92

3.1.3 Application et transfert envisagés 93

3.2 Synthèse : l'homme augmenté 93

Notre projet a plusieurs objectifs, complémentaires à notre sens :

i. Répondre à trois questions :

— Quel est le cadre conceptuel et théorique valide et générique de l'humain machine pour sa modélisation et sa co-simulation qui permettrait d'anticiper et d'évaluer de façon fiable ses bénéfices et ses risques ?
— Qu'est-ce qu'un bon modèle de l'humain machine garantissant sûreté, sécurité, vie privée et adaptabilité ?
— Quelle est la nature de l'humain machine ?

i.i. Proposer :

— Une taxonomie des systèmes humain machines « humain dans-la-boucle » intégrant des éléments d'analyse éthique et du droit de la santé en plus de ceux des sciences, des technologies de l'information et de la communication, ainsi que de l'ingénierie système et cognitive ;
— Un cadre épistémologique renouvelé de concepts et de principes théoriques généraux des systèmes humain machines « humain dans-la-boucle » ;
— Une méthode et des outils de modélisation *correcte par construction*, de test, de simulation et de vérification fiables des systèmes humain machines « humain dans-la-boucle » ;

i.i.i. Appliquer en priorité notre méthode à trois catégories de systèmes humain machines « humain dans-la-boucle » critiques :

— Les systèmes de perfusion en réanimation et leur automatisation ;
— Les systèmes implantables, par exemple ceux d'électrostimulation cardiaque ;
— Les systèmes d'aide aux gestes techniques.

3.1 Rechercher, développer et transférer

En vue de servir ces objectifs, il est selon nous nécessaire de répondre à une question :

Quels sont les principes théoriques de *l'intégration humain systèmes* et les concepts validés d'une "bio-ingénierie humain machine" permettant d'imaginer, de modéliser, de simuler, de développer et d'organiser de façon fiable et sûre les éléments artificiels et les artefacts bio-compatibles de *l'homme augmenté* ?

Pour répondre à cette question il convient de :

(a) fournir une analyse épistémologique et une cartographie pluridisciplinaire des concepts scientifiques, techniques, éthiques et juridiques de l'homme augmenté ;

(b) proposer un cadre épistémologique renouvelé de l'homme machine et un cadre de conception de l'homme augmenté ;

(c) tester la validité expérimentale de notre cadre épistémologique de l'homme augmenté ;

(d) fournir une méthode de modélisation intégrative, de validation par simulation ou co-simulation) et de certification des artefacts de l'humain augmenté.

La finalité du projet est donc triple : scientifique, technologique et appliquée.

3.1.1 Objets de recherche

Se fondant sur le cadre général de la biologie systémique,, en particulier de la théorie mathématique de la physiologie intégrative (MTIP) de Chauvet, et sur une approche multidisciplinaire, ce projet a trois objets de recherche et de vérification formelle et expérimentale :

— celle des **principes scientifiques de l'intégration humain machine ou humain systèmes** ;

— celle des **méthodes et des outils de modélisation et de simulation des systèmes hommes dans-la-boucle** ;

— et enfin celle des **règles et méthodes de conception sûre de la bio-ingénierie humain systèmes**.

3.1.2 Contenus de développement

Les développements envisagés portent sur les méthodes et les outils de conception et de validation [79] des systèmes humain machine et homme dans-la-boucle sécurité et sûreté critiques. Ils s'appuieront sur le développement d'une plate-forme de modélisation et de co-simulation formelle et expérimentale d'aide à la conception et à l'évaluation.

Cette plate-forme est destinée à intégrer des outils de modélisation formelle (i.e. Rodin pour Event-B, méthode de médélisation et d'analyse formelle de systèmes ou le programme

79. Du dessin au dessein : de l'art à l'ingénierie et l'organisation.

PAL - the Personalized Assistant that Learns). Elle associera des outils de et de simulation expérimentale permettant la co-simulation et la co-analyse de designs techniques en situations opérationnelles (environnement virtuel, systèmes embarqués vestimentaires, système d'intelligence ambiante et de monitoring). La plate-forme permettra simultanément l'analyse du comportement du ou des opérateurs en intégrant des systèmes de monitoring physiologique, de balistique oculaire et de capture de mouvement.

Il s'agira aussi de développer des prototypes d'outils pour l'aide aux gestes techniques, au maniement et à l'opération [80] de systèmes complexes naturels et artificels.

3.1.3 Application et transfert envisagés

Le projet *l'homme augmenté* a émergé d'un questionnement initial sur des problèmes réels, dans les domaines de la santé et de l'aérospatial, et d'une volonté de trouver des solutions innovantes, simples et robustes à ces problèmes. Il comporte donc un volet application et transfert destiné à diffuser les résultats de ces recherches et développements à l'enseignement, à l'industrie ainsi qu'à la création de produits ou à l'utilisation par des entreprises innovantes.

Les domaines d'application retenus sont : la santé, l'aérospatial, la défense et l'expertise légale (*forensics* en anglais).

Le transfert destiné à l'utilisation par des entreprises innovantes peut dans un premier temps prendre la forme d'innovations pédagogiques pour la formation initiale ou continue, en particulier sur des projets de recherches appliquées à "l'intégration humain machine" et au travers de l'enseignement des méthodes de conception bio-intégrative des systèmes artificiels bio-compatibles.

3.2 Synthèse : l'homme augmenté

L'objet de notre recherche est la connaissance de *l'homme augmenté* : il associe d'une part l'élaboration d'un cadre conceptuel théorique renouvelé et adapté, avec la validation des principes formels et expérimentaux de *l'homme augmenté* et d'autre part le développement de méthodes de conception sûres pour la *bio-ingénierie* « humain machine » d'autre part.

L'objectif général de ce projet est la conception, la validation et la certification d'une classe de systèmes critiques particuliers : les systèmes *homme dans-la-boucle*. Ces systèmes complexes sécurité et vie critiques, dans lesquels l'humain est un élément couplé à des éléments artificiels et/ou à d'autres humains, nécessitent pour leur modélisation et leur simulation (informatique) des principes scientifiques vérifiés. La construction correcte et la validation prédictive de ces modèles nécessitent des méthodes rigoureuses et expérimentales de simulations numériques et comportementales adaptées. Si la compréhension théorique de ces systèmes justifie une approche classique analytique pour comprendre la spécificité et la nature de chacun des éléments qui les

80. Le mot *opération* est pris dans son sens éthymologique : *action sur un système en vue de produire un effet conforme à sa nature*. Les actions pouvant être : piloter, manager, maintenir ou opérer au sens médical.

composent, elle suppose aussi une approche nouvelle synthétique et intégrative garantissant la cohérence structurale et fonctionnelle du système dans son ensemble. Notre ambition est de fonder ce changement de paradigme sur les principes de la physiologie intégrative théorique ainsi que sur les sciences de l'ingénieur et des systèmes artificiels.

Les sciences et technologies de l'information et de la communication, en particulier les méthodes formelles, les environnements virtuels, les systèmes cyber-physiques - systèmes embarqués et d'intelligence ambiante, sont en conséquence au cœur de ce projet, d'une part pour la modélisation et la simulation et d'autre part pour le développement technologique de systèmes prototypes pour l'aide, l'assistance ou la suppléance en situations opérationnelles.

Les domaines d'application de ces recherches sont la santé (l'odontologie - l'aide au geste chirurgical, l'ergonomie et l'organisation du cabinet dentaire ; la réanimation médicale - la modélisation du choc septique et l'automatisation de sa prise en charge), l'aérospatial (l'aide au geste technique, le pilotage, la maintenance et la conception intégrée de systèmes techniques devant être maintenus ou opérés), la défense (domaines hommes et systèmes, augmentation des capacités opérationnelles sensori-motrices et cognitives, action en milieu incertain) et enfin l'expertise légale (formulation sûre d'hypothèse, preuve et expertises).

Le projet de recherche s'appuiera sur la création d'une jeune équipe multidsciplinaire et sur le développement d'une plate-forme technologique de modélisation et d'expérimentation.

Cette équipe est appelée à accueillir des étudiants et à assumer l'encadrement de masters et de thèses d'université (budget propre et contrats CIFRE). Elle concevra et participera à des projets ANR, des projets industriels et des projets européens (programme cadre et Interreg) et favorisera la création de jeunes entreprises innovantes.

Afin de former les futurs créateurs, chercheurs et développeurs de ces systèmes, ce projet comporte un volet enseignement et innovation pédagogique dont le but sera l'acquisition des concepts, des connaissances et des méthodes de développement intégratives et synthétiques pour aller en quelque sorte de l'art à l'ingénierie.

Enfin, pour améliorer la fluidité de la décision et du développement, il est envisagé en parallèle de la mise sur pied de l'équipe et de la plate-forme, la mise en place d'un fonds de dotation spécifique. Ce fonds aura aussi vocation à renforcer les liens avec des investisseurs et des entreprises partenaires.

4

Programme scientifique et technique, organisation du projet

Sommaire

4.1 Organisation scientifique et technique 96
4.1.1 Les cinq étapes de notre méthode de recherche 96
4.1.2 Articulation et cohérence de la méthode pluridisciplinaire : de la modélisation à la certification 97
4.2 Les axes principaux du projet 100
4.2.1 Axe 1 - Épistémologie et théorie de l'homme augmenté 100
4.2.2 Axe 2 - Étude de cas et maïeutique de l'expertise appliquées aux domaines du projet 101
4.2.3 Axe 3 - Méthode et outils de la modélisation intégrative 101
4.2.4 Axe 4 - Plate-forme logicielle et expérimentale d'aide à la conception et de certification des systèmes humain machine sûreté critique . . 102
4.2.5 Stratégie de valorisation 102
4.3 Personnels et moyens nécessaires 103
Bibliographie 104

Notre programme de recherche a pour but la production d'une théorie et de concepts renouvelés et validés, d'un nouveau corpus cohérent de concepts et connaissances pluridisciplinaires et d'un cadre de conception et de description ou de modélisation générique et fiable. L'objet de la production de ce nouvel appareil épistémologique et sémantique est de proposer un cadre scientifique et technique de *l'humain machine* pour la modélisation intégrative sûre et le développement correct par contruction de systèmes de *l'homme augmenté*.

L'enjeu pratique est de produire une méthode et des outils de modélisation de l'intégration humain système, des outils d'aide à la conception bio-intégrative et de développement biocompatibles avec les systèmes techniques et organisationnels. Ces outils de simulation permettront d'anticiper le fonctionnement ou le dysfonctionnement et de valider ou d'invalider les choix d'architecture et de mise en œuvre en toute connaissance de cause. Ce sera aussi un outil d'exploration et d'évaluation des limites admissibles ou non de *l'humain augmenté*[81].

81. Un outil de simulation éthique et d'aide à la décision déontologique.

4.1 Organisation scientifique et technique

L'organisation scientifique et technique du programme s'appuie sur une méthode de recherche et de développement en cinq étapes (1+4 en fait) et un schéma général d'articulation et de cohérence pluridisciplinaire.

4.1.1 Les cinq étapes de notre méthode de recherche

La méthode de recherche (voir Fig. 4.1, page 98) est à la fois théorique, formelle, expérimentale et pragmatique. Elle s'appuie sur la réalité pratique et opérationnelle pour définir le cadre et les principes théoriques. Elle est conduite selon un cadre scientifique et des principes vérifiés, soit formellement soit validés par l'expérience ou tout du moins admis comme corrects par une communauté scientifique pertinente.

La formulation d'hypothèses et la construction de modèles abstraits à partir de situations prototypiques des domaines d'application concernés permet de tester la robustesse de la théorie. Les méthodes formelles garantissent la validation interne des modèles. Leur validité externe est établie par leur mise en cohérence avec les principes théoriques et les savoir et savoir-faire experts du ou des domaines d'application. Des scénarios appliqués aux modèles situés fondent les simulations numériques et expérimentales. La validation du cadre et des principes théoriques est avérée s'il y a cohérence entre la validation formelle et la validation expérimentale. Dans le cas contraire, une révision de chacune des étapes de la méthode peut être nécessaire dans un processus itératif d'amélioration.

La méthode mise en place s'articule en cinq étapes :

— **Étape 1** ; étape d' *élaboration* : elle se fonde sur l'observation, l'imagination, l'intuition et l'abstraction à partir de l'expérience ou du retour d'expérience. En associant et en reliant des faits avérés avec des connaissances théoriques et empiriques (expertise et savoir-faire), elle permet la formulation des concepts pluridisciplinaires nécessaires à la conceptualisation de l'humain machine.

— **Étape 2** ; étape *épistémologique* : elle interroge les concepts et le mode de conceptualisation produits et fournit une analyse critique et comparative avec d'autres modes de conceptualisation. Enfin elle fournit une synthèse théorique hiérarchisée des concepts validés. Cette étape permet la formulation correcte et la vérification du cadre théorique proposé et de ses principes.

— **Étape 3** ; étape *sémantique* : elle teste la robustesse de la thèse ou de la théorie proposée en formulant une ou des hypothèses par abduction, à partir de cas ou de faits, plus ou moins abstraits ou concrets selon le niveau de précision souhaité. Tester ces hypothèses supose la construction de modèles. Pour éprouver la cohérence du modèle et valider une hypothèse interviennent deux sous-étapes complémentaires et parallèles de validation interne et externe.
  La première sous-étape concerne la construction ou l'architecture du modèle. La validation interne du modèle est affirmée de façon déductive. La déduction permet l'établissement et la correction du modèle (détection des erreurs logiques). La validation utilise des méthodes formelles (mathématique, logique ou informatique) pour vérifier la cohérence et la correction de la structure logique.
  La seconde sous-étape consiste à tester la cohérence et la robustesse du modèle par rap-

port à la théorie de référence et à des observations de situations ou de cas, qu'ils soient abstraits ou pratiques. Principalement inductive, la validation externe s'établit par la vérification expérimentale.

— **Étape 4** ; étape *pragmatique* : elle a pour finalité la mise en action des modèles à partir de scénarios paradigmatiques fournissant des valeurs pour des paramètres et des variables du modèle, grâce à des corpus de données recueillies *a priori* pour la simulation numérique ou par manipulation directe et production de données en situation expérimentale contrôlée. Dans le cas de l'humain machine, la simulation est en fait une co-simulation, qu'elle soit numérique ou par manipulation directe ou interactive.
Par exemple, pour modéliser un système d'électrostimulation cardiaque, il faut non seulement modéliser le système technique et ses algorithmes mais aussi le cœur lui même. Pour les systèmes *humain dans-la-boucle*, c'est le comportement global du système humain machine qu'il convient de décrire et de valider. Les environnements virtuels, dont l'humain est un « élément », sont exemplaires à ce titre. Pour les applications à la réanimation médicale cependant, l'accès à l'expérimentation animale est une étape indispensable de validation des hypothèses et des modèles avant toute étude clinique, même si la clinique nous forunit des données issues du monitoring des malades pour la modélisation statistique et les simulations numériques.

— **Étape 5** ; étape de *validation* : elle vérifie la cohérence ou l'incohérence entre la validation formelle et la validaton expérimentale. Si la cohérence est établie, les modèles numériques et les algorithmes peuvent être mis en œuvre dans des systèmes réels utilisant les dispositifs prototypes développés pour la validation expérimentale. A ce stade une mise en développement et mise en production pourra aussi être envisagée. En cas d'incohérence, il conviendra de réviser les concepts, la théorie, les hypothèses, les modèles ou les paradigmes de simulation dans un processus itératif associant traçabilité et amélioration.

La question de la preuve et de la validité des hypothèses et des modèles traverse les sciences et les techniques, en particulier celles de l'humain augmenté. Fondées sur la simulation, elles exigent une observation de la réalité et des ensembles de données fiables issus de l'observation directe ou recontruits à partir de méthodes épistémologiques et de moyens techniques spécifiques. Elles doivent en outre se fonder sur une théorie vérifiée, sous peine de demeurer spéculatives. L'enjeu de cette méthode est de proposer un cadre et des principes théoriques génériques, fiables et sûrs pour un développement *en toute connaissance de cause*[82].

4.1.2 Articulation et cohérence de la méthode pluridisciplinaire : de la modélisation à la certification

Le champ scientifique de l'humain machine relève de la recherche des principes théoriques de l'intégration humain sytèmes. Comme souligné dans le premier chapitre de cette partie (voir Fig.

82. Et si possible en ayant à l'esprit les effets.

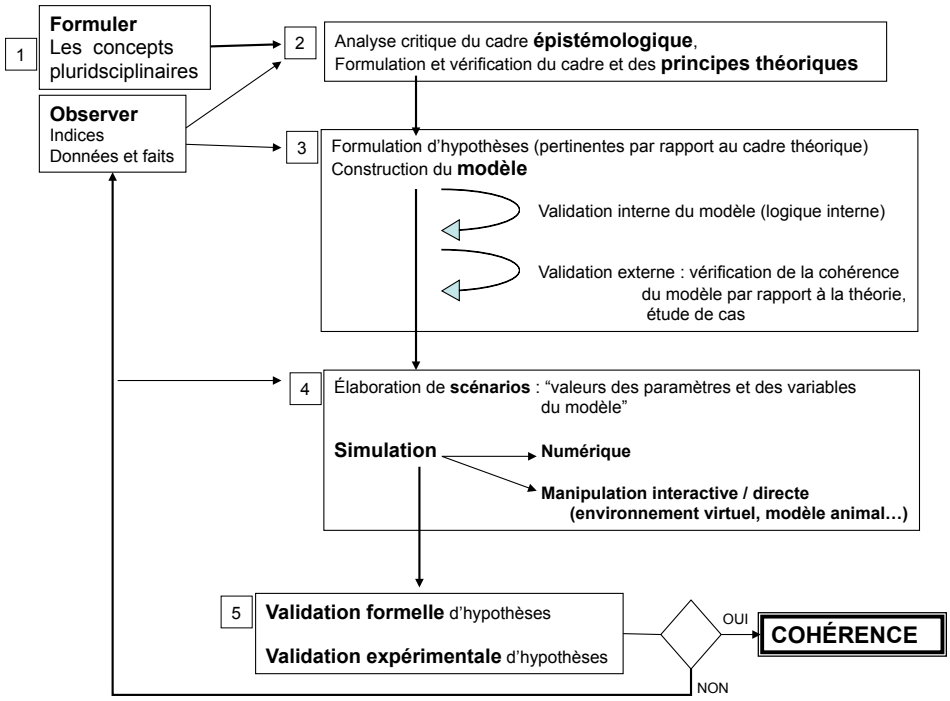


FIGURE 4.1 – Schéma méthodologique du projet

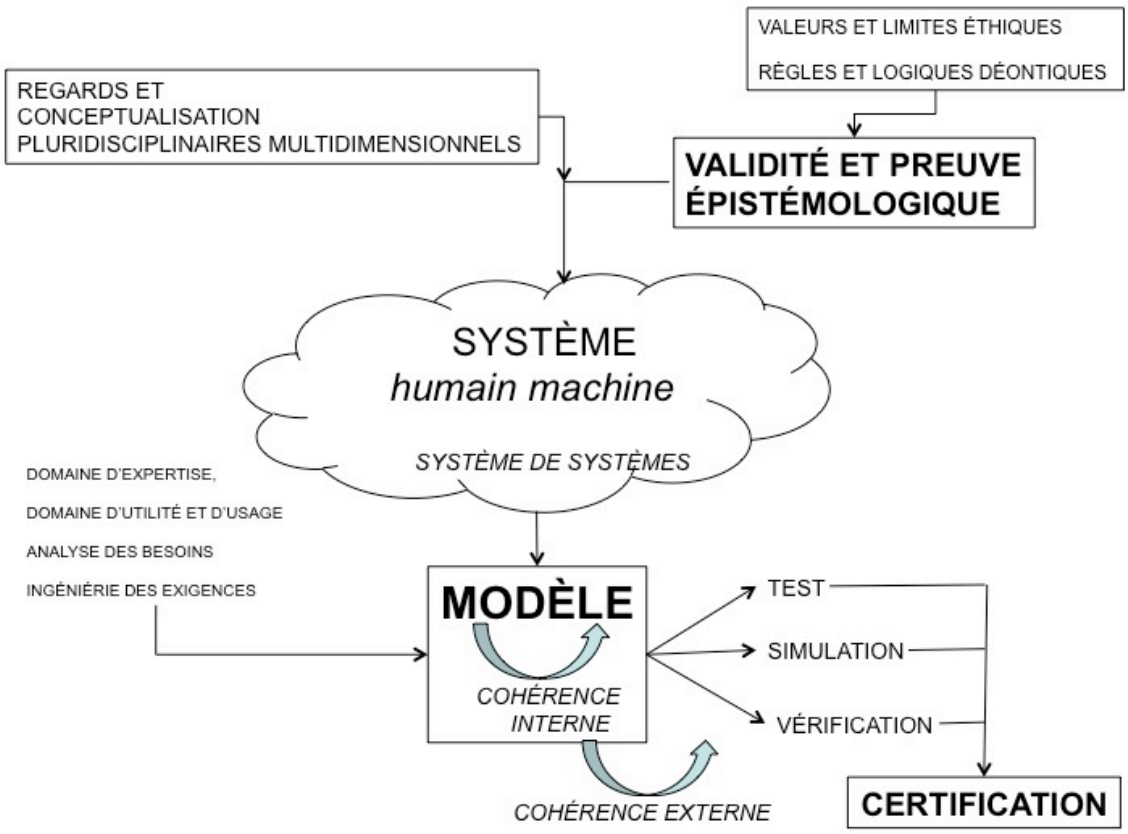


FIGURE 4.2 – Schéma général d'articulation et de cohérence pluridisciplinaire.

1.1, page 68), la conception intégrative relève d'une méthode transdisciplinaire qui assure l'articulation et la cohérence pluridisciplinaires de la modélisation des systèmes humain machine,jusqu'à leur certification et à leur production (voir Fig 4.2, page 99). Cette démarche s'appuie sur un accord transdisciplinaire, sur l'épistémologie et la gnoséologie, dans une démarche intégrée pour concevoir et conceptualiser l'humain dans sa relation au monde et pour envisager la réalité. La cohérence épistémologique des principes théoriques de *l'homme augmenté* fonde la validité de sa modélisation, sa cohérence interne. Sa cohérence externe est assurée d'une part par l'expertise du domaine d'usage et d'utilité concerné et d'autre part par la mise en place expérimentale des systèmes humain machine répondant à l'expression des besoins et des exigences spécifiques au domaine de développement. La certification des systèmes de l'humain machine résulte dès lors de la cohérence d'ensemble du modèle [83].

4.2 Les axes principaux du projet

Notre projet de recherche comporte quatre axes pluridisciplinaires complémentaires de recherche et de production scientifiques. Ces quatre axes de recherche sont complétés par des actions de dissémination et de valorisaton.

4.2.1 Axe 1 - Épistémologie et théorie de l'homme augmenté

Le premier axe est épistémologique et théorique.

Son objectif est de produire une analyse critique épistémologique des concepts de l'homme augmenté et une cartographie pluridisciplinaire des concepts théoriques, scientifiques, techniques, éthiques et juridiques de l'humain machine.

L'analyse des concepts se fera par une revue de littérature et une veille concernant les méthodes et les outils de modélisation des systèmes humain machine dans les domaines médicaux, de l'informatique, de l'automatique, des facteurs humains, de l'ergonomie, ainsi que des sciences cognitives.

L'inventaire des concepts en informatique et automatique, de la science des systèmes et la cybernétique, aux systèmes complexes, méthodes statistiques, probabilistes et d'intelligence artificielle (système-multi-agent, systèmes connexionnistes) ainsi qu'aux méthodes formelles est destiné à questionner la conceptualisation et la modélisation de l'humain machine.

L'analyse prendra en compte les retours d'expérience concernant la valeur pragmatique du cadre épistémologique et théorique de l'intégration humain systèmes pour les domaines d'applications envisagés.

Les travaux de cet axe fourniront une cartographie conceptuelle dynamique et évolutive des concepts de l'humain machine et une taxonomie critique des paradigmes philosophiques, scientifiques et techniques de l'homme augmenté.

Les questionnements éthiques (éthique de la méthode) et juridiques (logique déontique) y seront aussi abordés.

83. *Paradigme* en grec, représente une maquette abstraite de la réalité sur laquelle on souhaite agir. C'est la chose que l'on montre pour expliquer ce que sera l'objet final. C'est par là-même un support de pensée, de construction et d'action.

4.2.2 Axe 2 - Étude de cas et maïeutique de l'expertise appliquées aux domaines du projet

Le deuxième axe est dédié à l'étude comparative des concepts et des méthodes de conceptualisation et de modélisation des systèmes humain machine critiques, et la maiëutique de l'expertise des concepteurs, des praticiens ou des opérateurs des domaines d'application.

L'analyse des concepts et du cadre théorique mis en oeuvre, de leurs relations et de leur influence sur la conception et la sûreté - sécurité et fiabilité, des systèmes réels humain machine se fera à partir de l'étude de systèmes conçus qui fonctionnent et de systèmes conçus qui dysfonctionnent. Cette analyse critique portera sur la modélisation formelle et la modélisation expérimentale qui fondent la simulation et la co-simulation des sytèmes de l'humain machine. La maïeutique de l'expertise des systèmes humain machine reposera sur la verbalisation et la description experte de systèmes actuels (systèmes d'aide au geste technique, stimulateur cardiaque, etc.) et de systèmes souhaitables ou envisageables. Cet axe de recherche permettra d'identifier les problèmes, questions et avantages des méthodes de modélisation selon les cadres épistémologiques sous-jacents à la modélisation et à la systématisation. La pertinence des outils de modélisation, qu'ils soient statistiques, informatiques ou autres, sera étudiée.

La question de la détermination et de la pertinence théorique et opérationnelle de l'automatisation *versus* la biologisation des systèmes humain machine sera également explorée.

La description formelle des cadres de conceptualisation et de modélisation de chacun des courants théoriques canoniques (behavioriste, cognitiviste, systémique cybernétique, systémique organiciste ou intégrativiste) sera appliquée à l'évaluation comparative et pragmatique de méthodes de conception qui s'en réclament afin de comparer leurs intérêts et leurs limites. Cette évaluation comparative sera menée avec des experts concepteurs et des praticiens des domaines d'application sur des cas réels qui fonctionnent ou dysfonctionnent.

4.2.3 Axe 3 - Méthode et outils de la modélisation intégrative

Le troisième axe a pour objectif scientifique de répondre à une question qui nous paraît fondamentale : *s'il existe un cadre épistémologique général de l'humain machine, peut-on imaginer et développer une méthode formelle et expérimentale intégrative valide tant pour la modélisation, correcte par construction, que pour la simulation ou co-simulation des systèmes humain machine de l'homme augmenté ?*

Il a pour finalité technique le développement d'une méthode générique et intégrative de modélisation et de simulation de l'humain machine applicable aux différents domaines d'application.

Il comprend deux vecteurs de recherche. Le premier se propose d'étudier les méthodes spécifiques de modélisation actuelles utilisées en médecine et biologie d'une part, et en informatique d'autre part, en particulier celles liées aux méthodes formelles.

Des méthodes d'analyse de la valeur serviront à selectionner les éléments méthodologiques pertinents et le besoin pour définir les exigences liées à une méthode de modélisation intégrative de l'humain machine. Nous mettrons en oeuvre des méthodes formelles et expérimentales ainsi que des méthodes et des outils de la créativité et du design (wall-ideas, story-telling, storyboarding...). Notre démarche permet d'associer aux méthodes scientifiques rationnelles des méthodes de recherche permettant l'expression de l'intuition des experts afin de définir une description nouvelle et pertinente des couplages intégratifs entre systèmes de natures différentes.

Nos travaux de recherche antérieurs nous donnent à penser que ces liens ou couplages existent

et sont complémentaires pour assurer la cohérence de notre démarche de recherche et de conception. En associant méthodes formelles et expérimentales de modélisation et de simulation, nous pourrons vérifier la qualité de conception des systèmes de l'humain machine et valider la sûreté d'ensemble de l'intégration humains systèmes.

Ces travaux reposeront sur les résulats de l'axe 1 et feront l'objet d'une validation par des actions spécifiques en lien avec l'axe 2.

4.2.4 Axe 4 - Plate-forme logicielle et expérimentale d'aide à la conception et de certification des systèmes humain machine sûreté critique

Les résultats des recherches et des développements de l'axe 3 seront testés et vérifiés *in silico* et expérimentalement en simulation ou sur des animaux [84].

La modélisation numérique des systèmes de systèmes et des systèmes humain machine repose actuellement sur des outils UML (Unified Modelling Language) ou SysML (System Modelling Language). Ces outils d'ingénierie dirigée par les modèles et de modélisation de l'ingénierie systèmes reposent sur une approche descriptive fonctionnelle respectivement de cas d'utilisation pour la première et de diagramme des exigences pour la seconde. Ces langages de description de systèmes pilotés par des modèles reposent sur des fondements épistémologiques et *fonctionnalistes* où structure, fonction et dynamique sont considérés comme de même ordre et complémentaires. La cohérence des éléments représentés ou modélisés se fait sous forme de liens sémantiques ou d'interactions selon la syntaxe sous-jacente au langage et par une description pragmatique dépendante du domaine de conception.

À partir des résultats de recherche des axes précédents, nous envisageons le développement d'une plate-forme de modélisation fondée sur notre cadre épistémologique intégrativiste. Elle intégrera les outils de vérification formelle des modèles numériques pour le modèle checking et la vérification de la cohérence intrinsèque des modèles. Cet outil de construction correcte des modèles numériques sera complété par des briques logicielles dédiées à la simulation numérique et à la manipulation directe multimodale des objets et modèles numériques.

La plate-forme logicielle sera interopérable pour tout ou partie avec des dispositifs d'interface plus ou moins immersifs, connectés ou portables, via un système d'interfaces multimodales d'interaction bidimensionnelle ou tridimensionnelle, immersives ou non, permettant la simulation et la vérification de leur cohérence externe.

4.2.5 Stratégie de valorisation

Actions de dissémination

Nous prévoyons de diffuser les résultats de ce projet à travers les moyens conventionnels de dissémination scientifique : publications dans des revues, conférences et ateliers scientifiques.

Les supports de publications scientifiques envisagés ont un caractère transdisciplinaire comme par exemple les journaux de l'IEEE *Systems, Man and Cybernetics Society* ou de la série *Frontiers in* édités par l'Ecole fédérale polytechnique de Lausanne. Des publications en épistémologie, en ingénierie système, en informatique ou en neurosciences seront proposées au fur et à mesure des résultats spécifiques. Une revue à facteur d'impact élevé pourra ensuite être envisagée, par exemple dans Nature.

84. Ce sera le cas dans la collaboration avec l'U1116 Inserm pour la modélisation du choc septique dans la perspective de l'automatisation de sa prise en charge.

La participation à des conférences internationales (IEEE, ACM,...) ou spécialisées en interaction est envisagée ainsi que des communications dans des conférences spécialisées, par exemple dans le champ de la réanimation médicale ou de la cardiologie.

Nous organiserons des ateliers pluridisciplinaires sur ou autour du thème de l'intégration humain systèmes et de la conception de systèmes humain machine sécurité critique, dans la suite de celui organisé avec la Nasa à Nancy [85] en juin 2015, dont la reconduction est prévue en 2016 ou 2017 en Californie.

Actions de transfert

Les actions de transfert dépendront du niveau de maturité technologique (Technology Readiness Level - TRL) des développements techniques envisagés dans le projet. Elles porteront sur les productions de l'axe 3 et de l'axe 4 (voir paragraphes 4.2.3 et 4.2.4) comme envisagé ci-dessus. Nous envisageons rapidement d'atteindre le niveau 2 pour ces développements. L'objectif sera d'atteindre dans les trois années à venir le niveau 6 afin de fournir un outil de conception validé et sûr ainsi qu'une plate-forme de certification pour les technologies de l'humain augementé.

Nous sommes prêt à mener le processus de recherche et de développement jusqu'à un transfert industriel et commercial.

Par ailleurs, le projet présente un fort potentiel de valorisation pour la société. En effet, si l'approche est féconde, elle permettra d'éclairer par des éléments objectifs et vérifiés les réflexions éthiques et politiques relatives à *l'homme augmenté*. Les résultats du projet permettront d'éclairer et de décider, en connaissance de cause et avec une perception juste des risques, des limites acceptables ou non et potentiellement dangereuses et des développements futurs pouvant modifier substantiellement la nature humaine.

L'enseignement et l'innovation pédagogique constituent un aspect de ces actions de transfert. C'est aussi un moyen de recruter les futurs doctorants ou membres de l'équipe de recherche. Nous souhaitons développer des modules pédagogiques aujourd'hui dédiés à la formation initiale pour les adapter aux spécificités de la formation continue. Une réflexion sur l'enseignement numérique (moocs, serious games) sera élaborée en outre en vue d'attirer des talents internationaux.

4.3 Personnels et moyens nécessaires

Le projet nécessite de recruter des personnels de recherche : doctorants, post-doctorants, enseignants-chercheurs, et des personnels de développement : ingénieurs en informatique et en bio-ingénierie.

Le thème de recherche nécessite des travaux de recherche couvrant plusieurs domaines : biologie et informatique, facteurs humains et ingénierie systèmes, etc.. Il est donc envisagé que les doctorants de l'équipe soient co-encadrés pour couvrir les champs de connaissances nécessaires à l'exploration des questions scientifiques et techniques soulevées par le thème de l'humain augmenté.

Les moyens nécessités sont d'une part des outils informatiques pour le développement du logiciel de modélisation et de validation formelle et des moyens de simulation et d'expérimentation interactive (réalité virtuelle et réalité augmentée) de la plate-forme d'aide à la conception et de certification des systèmes humain machine sûreté critique.

85. http ://lorianasa-2015.loria.fr/

Bibliographie

[Amalberti1998] René Amalberti. Les facteurs humains à l'aube de l'an 2000. *Phoebus*, pages 5–12, 1998.

[Arendt1958] Hannah Arendt. *The human condition.* The University of Chicago Press, 1958.

[Ashby1957] W. Ross Ashby. *An introduction to cybernetics.* Chapman & Hall, London, 1957.

[Aubin2005] Jean-Pierre Aubin. Théorie de la viabilité : régulation de l'évolution des systèmes de réseaux et morphogénèse des contraintes sous incertitudes tychastique - synthèse. lastre.asso.fr/aubin/Viabilite-Synthese.doc, 2005.

[Bailly and Longo2006] Francis Bailly and Giuseppe Longo. *Mathématiques et sciences de la nature : la singularité physique du vivant.* Hermann éditeurs, Paris, 2006.

[Bertalanffy1968] Ludwig K. Von Bertalanffy. *Théorie générale des systèmes.* Dunod, 2012 edition, 1968.

[Booher2003] Harold H. Booher. *Handbook of human systems integration*, chapter Human systems integration. Systems Engineering and Management. Wiley, 2003.

[Carmat2015] Carmat. http ://www.carmatsa.com, mai 2015.

[Chauvet1993a] G.A. Chauvet. Hierarchical functional organization of formal biological systems : a dynamical approach. i. the increase of complexity by self-association increases the domain of stability of a biological system. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 339 :425–444, 1993.

[Chauvet1993b] G.A. Chauvet. Hierarchical functional organization of formal biological systems : a dynamical approach. ii. the concept of non-symmetry leads to a criterion of evolution deduced from an optimum principle of the (o-fbs) sub-system. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 339 :445–461, 1993.

[Chauvet1993c] G.A. Chauvet. Hierarchical functional organization of formal biological systems : a dynamical approach. iii. the concept of non-locality leads to a field theory describing the dynamics at each level of organization of the (d-fbs) sub-system. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 339 :463–481, 1993.

[Chauvet1998] Gilbert Chauvet. *La vie dans la matière : le rôle de l'espace en biologie.* Champs. Flamarion, 1998.

[Cliff Jones2006] Jim Woodcock Cliff Jones, Peter O'Hearn. Verified software : A grand challenge. *IEEE Computer*, 39(4), April 2006.

[Coleman *et al.*2005] Joey Coleman, Cliff Jones, Ian Oliver, Alexander Romanovsky, and Elena Troubitsyna. *RODIN (rigorous open development environment for complex systems).* University of Newcastle upon Tyne, Computing Science, 2005.

[Conant and Ashby1970] Roger C. Conant and W. Ross Ashby. Every good regulator of a system must be a model of that system. *International Journal of Systems Science*, 1(2) :89–97, 1970.

[da Silva2006] Pascal Rocha da Silva. La politique de l'enfant unique en république populaire de chine. Université de Genève, département d'histoire économique, 2006. Mémoire de licence.

[Dep2012] Department of Defense. *Defense Acquisition Guidebook*, January 2012. https ://dag.dau.mil.

[Division] Human Systems Integration Division. What is human systems integration. http ://human-factors.arc.nasa.gov/awards$_p$*ubs*/*hf*101.*php*.

[Edelman2006] Gerald M. Edelman. *Second nature. Brain science and human knowledge.* Yale University Press, New Haven and London, 2006.

[Ehrhart and Sage2003] Lee Scott Ehrhart and Andrew P. Sage. *Handbook of human systems integration*, chapter User-centred systems engineering framework, pages 295–373. Wiley, 2003. Series in Systems Engineering and Management.

[Engelbart1962] Douglas C. Engelbart. Augmenting human intellect : A conceptual framework. Summary report, sri project no. 3578, Standford Research Institute, Menlo Park, California 94025, USA, 1962. http ://dougengelbart.org/.

[Fass and Alson2009] Didier Fass and Brice Alson. L'accès à l'internet n'a pas d'âge. Technical report, Renaissance numérique, Octobre 2009. Livre blanc de la commission sénior.

[Fass and Chauvet2006] Didier Fass and Gilbert Chauvet. The mathematical theory of integrative physiology : a fundamental framework for human systems integration and augmented human design. In *Enactive 06 : Enaction and Complexity*, page 135. Enactive Networ (NOE-IST EU), November 2006.

[FASS2002] Didier FASS. *Base de connaissances multimodales et esthétique de la connaissance, aide à l'action et réalité virtuelle : théorie et expériences.* PhD thesis, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 2002.

[Fass2006a] Didier Fass. Rationale for a model of human systems integration : the need of a theoretical framework. *Journal of Integrative Neuroscience*, 5(3) :333–354, 2006.

[Fass2006b] Didier Fass. Rationale for a model of human systems integration : The need of theoretical framework. *Journal of integrative neuroscience*, 5(3) :355–372, 2006.

[Fass2012] Didier Fass. *Systems Engineering - Practice and Theory*, chapter Augmented Human Engineering : A Theoretical and Experimental Approach to Human Systems Integration, pages 257–276. Intech, March 2012.

[Fass2015] Didier Fass. Affordances and safe design of assistance wearable virtual environment of gesture. Number 3, pages 866–873. 6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2015) and the Affiliated Conferences, AHFE 2015, Elsivier, 2015. www.sciencedirect.com.

[Gibson1977] James J. Gibson. *Perceiving, Acting and Knowing : toward an ecological psychology*, chapter The theory of affordance, pages 67–82. Lauwrence Erlbaum associates edition, 1977.

[Guillaume Walk and Seligman2007] François Lalande Guillaume Walk and Marc-David Seligman. Résumé du rapport ASN n° 2006 ENSTR 019 - IGAS n° RM 2007-015P sur l'accident de radiothérapie d'Épinal. Technical report, Inspection générale des affaires sociales, 2007.

[Haskins2010] Cecilia Haskins, editor. *Systems Engineering Handbook : a guide for processes and activities.* International Council on Systems Engineering (INCOSE), January 2010.

[Hoare2003] Tony Hoare. The verifying compiler : A grand challenge for computing research. *Journal of the ACM*, 50(1), 2003.

[Hollnagel and Woods2005] Erik Hollnagel and David D. Woods. *Joint cognitive systems : Foundations of cognitive systems engineering.* CRC Press / Taylor Francis, Boca Raton, FL, 2005.

[Insup Lee and Sha2006] Rance Cleaveland John Hatcliff Bruce H. Krogh Peter Lee-Harvey Rubin Insup Lee, George J. Pappas and Lui Sha. High-confidence medical device software and systems. *IEEE Computer*, 39(4) :33–38, April 2006.

[Jarrasé2014] Nathanaël Jarrasé. Le mythe de l'humain augmenté. *Le journal du CNRS*, (279) :59, 2014.

[Kelso *et al.*2001] J.A Scott Kelso, Philp W. Fink, Corey R. DeLaplain, and Richard G. Carson. Haptic information stabilizes and destabilizes coordination dynamics. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 268(1472) :1207 – 1213, 2001.

[Lee *et al.*2012] Insup Lee, Oleg Sokolsky, Sanjian Chen, John Hatcliff, Eunkyoung Jee, BaekGyu Kim, Andrew King, Margaret Mullen-Fortino, Soojin Park, Alexander Roederer, et al. Challenges and research directions in medical cyber–physical systems. *Proceedings of the IEEE*, 100(1) :75–90, 2012.

[Levenson and Turner1993] Nancy G. Levenson and Clark S. Turner. An investigation of the therac-25 accidents. *IEEE COmputer*, 26(7) :18–41, 1993.

[Licklider1960] Joseph C.R. Licklider. Man-computer symbiosis. *IRE Transactions on Human Factors in Electronics*, 1 :4–11, March 1960.

[Lieber and Fass2011] Romain Lieber and Didier Fass. Human systems integration design : Which generalized rationale ? In M. Kurosu, editor, *Human Centered Design*, volume 6776 of *LNCS*, pages 101–109. HCII2011, Berlin Heidelberg, 2011.

[Lin *et al.*2013] Patrick Lin, Maxwell J. Mehlman, and Keith Abney. Enhanced wardfighters : risk, ethics, and policy. Technical report, The Greenwall Foundation, January 2013. http ://ethics.calpoly.edu/greenwall$_r$*eport.pdf*.

[Lorenz2010] Konrad Lorenz. *L'envers du miroir : Une histoire naturelle de la connaissance*. Flammarion, Champs sciences, 2010.

[Lyon2006] Pamela Lyon. The biogenic approach to cognition. *Cognitive Processing*, 7(1) :11–29, 2006.

[Market2013] Transparency Research Market. Implantable medical devices market (Reconstructive joint replacement, spinal implants, cadiovascular implants, dental implants, intraocular lens and breast implants) - US industry analysis, size, share, trends, growth and forecast 2012 - 2018, institution = Transparency research market. Technical report, 2013. http ://www.transparencymarketresearch.com/implantable-medical-devices-market.html.

[Merouani *et al.*2008] M. Merouani, Guignard B., Vincent F., Borron S.W, Karoubi P., Fosse J.P, Cohen Y., Clec'h C., Vicaut E., Marbeuf-Gueye C., Lapostolle F., and Adnet F. Norepinephrine weaning in septic shock patients by closed loop control based on fuzzy logic. *Critical Care*, 12(6), 2008.

[Méry and Singh2010] Dominique Méry and Neeraj Kumar Singh. Functional Behavior of a Cardiac Pacing System. *International Journal of Discrete Event Control Systems (IJDECS)*, December 2010.

[Méry and Singh2011a] Dominique Méry and Neeraj Kumar Singh. Formalisation of the Heart based on Conduction of Electrical Impulses and Cellular-Automata. In Zhiming Liu and Alan Wassyng, editors, *International Symposium on Foundations of Health Information Engineering and Systems (FHIES, 2011)*, Johannesburg, South Africa, 2011.

[Méry and Singh2011b] Dominique Méry and Neeraj Kumar Singh. Medical Protocol Diagnosis using Formal Methods. In Zhiming Liu and Alan Wassyng, editors, *International Symposium on Foundations of Health Information Engineering and Systems (FHIES, 2011)*, Johannesburg, South Africa, August 2011.

[Méry and Singh2010a] Dominique Méry and Neeraj Kumar Singh. Real-Time Animation for Formal Specification. In Marc Aiguier, Francis Bretaudeau, and Daniel Krob, editors, *Complex Systems Design & Management 2010*, Proceedings of the First International Conference on Complex System Design & Management CSDM 2010, pages 49–60, Paris, France, 2010. Springer.

[Méry and Singh2010b] Dominique Méry and Neeraj Kumar Singh. Trustable formal specification for software certification. In *Leveraging Applications of Formal Methods, Verification, and Validation*, pages 312–326. Springer, 2010.

[Méry and Singh2011] Dominique Méry and Neeraj Kumar Singh. Technical Report on Interpretation of the Electrocardiogram (ECG) Signal using Formal Methods. Technical report, 2011.

[Méry and Singh2013] Dominique Méry and Neeraj Kumar Singh. Formal specification of medical systems by proof-based refinement. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, 12(1) :15, 2013.

[Méry *et al.*2014] Dominique Méry, Bernhard Schätz, and Alan Wassyng. The pacemaker challenge : Developing certifiable medical devices (dagstuhl seminar 14062). *Dagstuhl Reports*, 4(2) :17–37, 2014.

[Nordmann2004] Alfred Nordmann. Converging technologies - Shaping the future of European societies. Technical report, European communities, 2004.

[Norman2014] Don Norman. The human side of automation, December 2014. Keynote talk presented at the Automated Vehicles Symposium, San Francisco Airport, 2014.

[NTSB2014] National Transportation Safety Board NTSB. Descent Below Visual Glidepath and Impact With Seawall, Asiana Airlines Flight 214, Boeing 777-200ER, HL7742, San Francisco, California, July 6, 2013. Technical Report NTSB/AAR-14/01 PB2014-105984, National Transportation Safety Board, Washington, D.C., June 2014.

[Pew and Mavor2007] Richard W. Pew and Anne S. Mavor, editors. *Human-System Integration in the System Development Process : A New Look.* The National Academies Press, committee on human-system design support for changing technology, committee on human factors, national research council, national research council edition, 2007. http ://www.nap.edu/openbook.php ?record$_id = 11893$.

[Pierre Asfar2013] Jacques Duranteau Eric Kipnis Marc Leone Bruno Lévy Jean-Paul Mira Pierre Asfar, Yann-Erick Claessens. Residual rates of mortality in patients with severe sepsis : a fatality or a new challenge ? *Annals of Intensive Care*, 3(27), 2013.

[Roco and Bainbridge2002] Mihail C. Roco and William S. Bainbridge. Converging technologies for improving human performance - nanotechnology, biotechnology, information technology and congnitive science. Technical report, National Science Foundation and Department of Commerce, 2002.

[Roll2003] Jean-Pierre Roll. Physiologie de la kinesthèse. la proprioception musculaire : sixième sens ou sens premier ? *Intellectica*, (36-37) :49–66, 2003.

[Rouse and Boff2005] William B. Rouse and Kenneth R. Boff, editors. *Organizational Simulation.* Wiley, 2005.

[Rousse2010] William B. Rousse. *The Economics of Human Systems Integration : Valuation of Investments in Peoples Training and Education, Safety and Health, and Work Productivity.* Wiley, 2010.

[Scientific2007] Boston Scientific. Pacemaker system specification. Technical report, January 3 2007. http ://sqrl.mcmaster.ca/$_SQRLDocuments/PACEMAKER.pdf$.

[Simondon1958] Gilbert Simondon. *Du mode d'existence des objets techniques.* Aubier, 1958.

[Soetching and Flanders1992] John F Soetching and Martha Flanders. Moving in three-dimensional space : frames of reference, vectors, and coordinate systems. *Annual Review in Neurosciences*, (15) :167–191, 1992.

[Stanney1995] Kay M. Stanney. Realizing the full potential of virtual reality : Human factors issues that could stand the way. In *Virtual reality annual international symposium*, pages 28–34. IEEE Computer Society Press, March 11-15 1995.

[Technology2015] IHS Technology. Wearable technology intelligence service. https ://technology.ihs.com/Services/511880/Wearable Technology Intelligence Service/Analysis ?f=261 :143021, January 2015.

[Thurman1986] Max Thurman. *Manpower and Personnel Integration (MANPRINT).* US Army, 1986.

[Ward20012] Peter A Ward. New approaches to the study of sepsis. *EMBO Molecular Medecine*, 4(12), 20012.

[Wiener1965] Norbert Wiener. *Cybernetics or control and communication in the animal and the machine.* MIT Press, 1965.

Troisième partie

Expérience

1

Curriculum Vitae

1.1 État civil

Didier FASS
Né à Nancy, le 31 mai 1963
Nationalité française
Vit en couple, 2 enfants.
Inscrit au tableau de l'ordre des Chirurgiens dentistes (n° national : 45 390).

1.2 Prix et distinctions

— Médaille de bronze de la Défense nationale

— Lauréat de la bourse de recherche du Collège national d'occlusodontie (1991)

1.3 Parcours académique

2010	Diplôme inter-universitaire de formation à l'expertise judiciaire, faculté de médecine, Université Henri Poincaré, Nancy-Université.
2002	Docteur de l'Université Henri Poincaré Nancy1, option neurosciences
1995	Certificat de psychophysiologie de la faculté de médecine de Nancy, Université Henri Poincaré Nancy1.
1994	DEA de sciences cognitives, Université Orsay Paris XI - stage de recherche au laboratoire d'informatique pour la mécanique et les sciences de l'ingénieur - LIMSI.
1992	DESS «Certificat d'aptitude à l'administration des entreprises» IAE de Nancy, Nancy2.
1991	Docteur en chirurgie dentaire summa cum laude, faculté d'odontologie, Université Henri Poincaré Nancy 1.
1988	Diplômé de la Faculté d'Odontologie, Université Henri Poincaré Nancy1.
1985	Entraîneur de club de ski alpin bénévole, comité régional des Vosges, fédération française de ski.

1.4 Expériences professionnelles

Depuis 2005	Professeur associé à ICN Business school et chercheur au laboratoire lorrain de recherche en informatique et ses applications - LORIA, équipe MOSEL ; porteur de l'action pluridisciplinaire ARTEM «*l'homme augmenté*».
2006 - 2008	Responsable de la Tâche 3 « Partage d'autorité centré sur l'humain » du projet PAUSA - Partage d'autorité dans le système aéronautique du Pôle de compétitivité mondiale aéronautique, espace et systèmes embarqués - Aerospace valley ; Membre du groupe « ingénierie de l'interaction et facteurs humains » du pôle.
2003 - 2008	Collaborateur au Groupe de recherches sur la gestion des organisations (GREGOR) de l'IAE Paris 1 Panthéon Sorbonne.
2002 - 2006	Membre du pôle *Ingénierie de l'interaction* du Centre national de recherche technologique Aéronautique et espace (CNRT A&E) du thème « transport centré sur l'homme » ; responsable du thème *homme augmenté* pour l'aide à l'activité spatiale humaine et aéronautique.
2005	Représentant de l'INRIA dans le conseil d'administration du Centre national de recherche et technologie Aéronautique et Espace (CNRT-A&E), Toulouse.
2000 - 2005	Membre fondateur et secrétaire général du groupe de réflexion Éthique et STIC : *STIC and the city : l'observatoire des sciences et technologies de l'information et de la communication.*
2001 - 2004	Ingénieur expert INRIA, membre de l'équipe CORTEX du LORIA, INRIA Lorraine.
1998 - 1999	Chercheur sur financement du CNES, Laboratoire de biologie et physiologie du comportement UHP Nancy 1 et au LORIA.
1996 - 1997	Ingénieur de recherche, responsable de l'antenne MEDES Lorraine, institut de médecine et physiologie spatiale (MEDES) et Pôle européen de santé, Nancy.
1995 - 1998	Attaché à la faculté de chirurgie-dentaire, Université Henri Poincaré Nancy1, département de Biologie.
1991 - 2004	Chargé d'enseignement à la Commision nationale de qualification des assistantes en odonto-stomatologie - CNQAOS (chirurgie parodontale, puis psychologie appliquée au cabinet dentaire et ergonomie et organisation du travail).
1988 - 1994	Attaché à la faculté de chirurgie-dentaire, Université Henri Poincaré Nancy1, département de Parodontologie (parodontologie et implantologie orale).
1988 - 1996	Chirurgien-dentiste, excercice libéral.

1.5 Participation à des organismes scientifiques ou professionnels

1. Associations scientifiques et techniques :

- Membre de l'association francophone des spécialistes d'investigation numérique -AFSIN, membre du conseil d'administration et du conseil scientifique (www.afsin.org)

- Membre de l'AFRV - Association française de réalité virtuelle, augmentée, mixte et d'interaction 3D (www.afrv.fr)

- Membre en qualité de personnalité qualifiée, de l'Espace lorrain d'éthique pour la santé.

- Membre du bureau, ASTI - Fédération des associations françaises des sciences et technologies de l'information (www.asti.asso.fr) - responsable du groupe éthique (2004-2011)

- Membre de AFIS - association française d'ingénierie système (www.afis.fr), membre du groupe de travail « résilience et ingénierie Système » (2007-2011)

- Member de INCOSE - International council on systems engineering (www.incose.org) (2007-2011)

2. Think Tank :

- Membre de « Renaissance numérique » (http ://renaissancenumerique.org/)

3. Organisation internationale (United Nations Specialized Agency) :

- Membre du Board de TELECOM - Forum Advisory Committee, Union internationale des télécommunications (UIT), Genève (www.itu.int/ITUTELECOM/whats_telecom/itutelecom_board.html) [depuis 2007 - 2012]

1.6 Éléments remarquables

Résumé des éléments remarquables décrits dans les chapitres ci-après.

1.6.1 Thèses encadrées

2 thèses soutenues (une thèse d'université et une thèse d'exercice), 2 thèses d'université en cours (une Université de Lorraine, une GeorgiaTech - Atlanta, USA).

1.6.2 Masters encadrés

4 Masters recherche, 5 Masters professionnel.

1.6.3 Participation à des projets de recherches

1 projet européen, 2 projets Pôle de compétivité, 2 projet nationaux, 2 projets internes.

1.6.4 Financement de projets de recherche

1 financement thèse DGA (100%), 1 financement thèse CIFRE Airbus (100%), financements Union européenne, État français (fonds actions de recherche et innovation - Aérospace Valley), ministère de la recherche, Région lorraine, communauté urbaine du grand Nancy - CUGN, CNES.

1.6.5 Tâche d'intérêt collectif

Membre du groupe valorisation du LORIA.

2

Expériences d'enseignement

2.1 Enseignement

2.1.1 Faculté d'odontologie - Université Henri Poincaré (UHP) Nancy 1

— 1988-1995 : Attaché d'enseignement clinique Parodontologie et implantologie

— 1995-1998 : Attaché département de Biologie, cours sur la "décision médicale" dans le cadre de l'option *Philosophie des sciences*

2.1.2 Master Sciences Cognitives et médias numériques, UFR Mathématiques et Informatique - Université de Lorraine

2005 - 2012 Responsable de l'UE 19 du M2 : *Esthétique de l'interaction* des modules de cours :

— Physiologie de la connaissance
— Physique qualitative
— Les environnements virtuels.

Depuis 2012, module *Environnements interactifs*(UE907 EC3)

2.1.3 ICN Business School - Master Grande École

— Première Année : responsable du module *Creative thinking*
— Deuxième année : Responsable de l'Atelier Artem Entreprises *L'humain augmenté*
— Troisième année : responsable du module «humanités Artem» *design de l'interaction*

2.1.4 École nationale supérieure des Mines de Nancy

2007, Option «Transports guidés», 3ème année, module TC3 *Facteurs humains et fiabilités des systèmes homme - machine*, commun ENSMN et ENSEM (INPL)

2.1.5 École nationale supérieure d'Art de Nancy

2005 à 2007 - Concepteur et co-animateur de l'Atelier Artem / Atelier de recherche et de création (ARC) « *réalité augmentée* ».

2.1.6 Faculté de médecine de Nancy

2009 - 2012 Master Éthique de la santé et médecine légale :

- Spécialité éthique, communication, expertise et droit de la personne : UE6 Personne, corps et technique ; séminaire *L'homme augmenté*

- Spécialité criminalistique et archéologie, responsable de l'UE 7 Modélisation cognitive et numérique du crime.

2.1.7 Centre national de qualification des assistantes en odonto-stomatologie (CNQAOS)

1991-2004 : Centres de Paris et Nancy

- Cours sur la chirurgie parodontale et son instrumentation
- Cours de psychologie et d'organisation du travail appliquées au cabinet dentaire.

2.2 Encadrement et co-encadrement d'étudiants

2.2.1 Thèse d'université

Thèse soutenue

- 2008-2013, Thèse CIFRE AIRBUS, UHP Nancy 1, CRAN et LORIA, doctorant Romain LIEBER : *Approche intégrative et physiologique de la modélisation numérique de l'inter-opération homme-système.* (Thèse d'université UHP, ED IAE+M, DFD Automatique) [1 publication IEEE et 1 publication LNCS].

Thèses en cours

- 2014-2017, Thèse de l'Université de Lorraine Rémi NAZIN : *Modélisation de l'humain machine : quels fondements épistémologiques pour une conception sûre ?*, financement 100% DGA , LORIA - Perseus. [1 publication LNCS]

- 2015-2018, Ph.D. Thesis, Gorgia Tech, Atlanta, US - Sebastien MAMESSIER Semantically integrated cognitive engineering, Ph.D. Committee : K. Feigh, A. Goel, E. Feron, D. Dreyer, D. Fass, Cognitive Engineering Center, College of Engineering.

Thèse interrompue

- Octobre 1997-février 99 , Fabrice MALNOY, co-encadrement, Thèse d'Université UHP Nancy 1, thème réalité virtuelle et aide au mouvement (École doctorale BIOSE), interrompue suite au départ inopiné du Pr. LESTIENNE du Laboratoire de physiologie de biologie et physiologie du comportement- URA CNRSS 1293. [1 publication dans La Lettre de l'intelligence artificielle]

2.2.2 Thèse d'exercice

- 2004-2005, Thèse pour le diplôme d'État de docteur en chirurgie dentaire, Maxime VAUTRIN, *Intérêt de la robotique chirurgicale dans l'aide à l'implantologie orale*, présentée et soutenue

publiquement le 18 janvier 2005.

2.2.3 Stagiaires de Master

— Année universitaire 1996 - 1997 :
Pascal HENCK, DEA instrumentation et microélectronique - option instrumentation, UHP Nancy 1 : *Instrumentation appliquée à la quantification des oscillations posturales et à la détection des troubles de l'équilibre*- co-tuteur avec Pr. F. LESTIENNE

Fabrice MALNOY, DEA de physiologie et de biomécanique de la performance motrice - option : biomécanique et physiologie du mouvement, Université Paris XI, Paris Sud Orsay : *Vection et activité posturale : application à la réalité virtuelle.*- co-tuteur avec Pr. F. LESTIENNE

— Année universitaire 2004 - 2005 :
Cédric SHOINDRE, stage de maîtrise de sciences cognitives, Université Nancy 2 : *Spécification cognitive d'un logiciel d'aide au geste graphique*- Tuteur

— Année Universitaire 2006 - 2007 :
Romain LIEBER, stage Master 2 Sciences cognitives et applications, chez AIRBUS France, *Aircraft Operability : Human factors and Numerical Manikins*- Tuteur

Julien ANDRÉ, Nicolas GOERGEN, Jean-Louis HUYNEN, Jonathan PERRINÉ, Projet Tutoré Master 1 Sciences cognitives et applications, *Calibration d'un environnement virtuel.*- Tuteur

Nicolas GOERGEN, Jean-Louis HUYNEN, Jonathan PERRINÉ, Stage d'été M1 et stage temps-partiel M2 Master Sciences cognitives, dans le cadre du projet PAUSA, *Développement d'un environnement de simulation aéronautique et d'analyse comportementale multimodale* - Tuteur

— Année universitaire 2007 - 2008 :
Antoine GALMICHE, Master 1, IUP Ingénierie de la santé, faculté de médecine UHP Nancy 1, financement Conseil régional de Lorraine, *Interfaçage des systèmes de monitorage de réanimation et modélisation des signaux physiologiques cardiovasculaires pour le pilotage de la délivrance automatique des médicaments (drogues cardiovasculaires) chez les patients en état de choc* - co-encadrement avec le Professeur Bruno LEVY, Service de réanimation médicale et Groupe choc équipe Avenir INSERM.

Jean-Louis HUYNEN, Master 2 professionnel, Sciences de la cognition et applications, UFR MathInfo Nancy 2, entreprise GraphiK, Maxéville, *Site internet dans la perspective du tactile*, tuteur

— Année universitaire 2008 - 2009 :
Leslie ROZE, Master 2 professionnel, Sciences de la cognition et applications, UFR MathInfo Nancy 2, *Manipulation intuitive d'objets 3D* - tuteur dans l'équipe MOSEL LORIA.

— Année universitaire 2009 - 2010 :
Jennifer CARMICHAEL, Master 2 Sciences de la cognition et applications, UFR MathInfo Nancy 2, spécialité Technologies des médias numériques - tuteur de stage en entreprise au Crédit Agricole.

— Année universitaire 2010 - 2011 :
Camille TERUEL, Master 2 Informatique, option Logicielle, UFR Sciences et techniques UHP Nancy 1 - Stage recherche de février à juin 2011. Sujet : *Modélisation et validation des systèmes homme dans-la-boucle.*

Mohamed OVA et Mesbah ZITOUNI, Master 1 Informatique, UFR Sciences et techniques UHP Nancy 1 - Stage d'initiation à la recherche de février à mai 2011. Sujet : *Environnements virtuels et système homme "dans-la-boucle".*

— Année universitaire 2012 - 2013
Mathieu HULOT, Master 2 Sciences de la cognition et applications, spécialité cciences cognitives et médias numériques - option Analyse comportementale et ingénierie de l'interaction, UFR MathInfo, Université de Lorraine, mars à août 2013. - tuteur d'un stage en entreprise chez AREVA.

— Année universitaire 2013 - 2014
Rémi NAZIN, Master 2 Sciences de la cognition et applications, spécialité sciences cognitives et médias numériques, UFR MathInfo, Université de Lorraine, de mars à août 2014 - encadrement d'un stage de recherche, équipe MOSEL LORIA. Sujet : *Quels fondements épistémologique pour l'humain machine ?.*

2.2.4 Élèves ingénieurs

— Année universitaire 2005 - 2006 :
Projet d'initiation à la recherche 3ème année de l'École des Mines de Nancy, projet interdisciplinaire commun aux départements Informatique et Matériaux de l'ENSMN, Guylaine BOITTIN, Cyril NOE et Aurélien ROBERT : *Quelle architecture informatique et matérielle pour un vêtement d'aide au geste ?*

Projets dans le cadre de l'Atelier Artem Aéronautique 2A de l'École des Mines :
L'homme augmenté en microgravité : Arnaud CHALAMONT, Julien GIRARDIN, Guillaume MERCUSOT, Florian ROSE et Yifei ZHANG.
Le facteur humain dans le cadre du transport aérien de passager : Paul ROUERS et Virgile SERLET.

— Année universitaire 2006 - 2007
Projet 2ème année, département Informatique de l'École des Mines de Nancy, *iVest : une veste d'aide au geste*, Sylvain EVEILLARD et Olivier GENEST.

— Année universitaire 2008 - 2009 :
Guillaume BERCAUD, 2ème année de l'École des Mines de Nancy, financement Communauté Urbaine du Grand Nancy, *Étude statistique d'un corpus de données physiologiques multimodales de patients victimes de choc septique en vue de la modélisation pour l'automatisation du*

monitoring et de l'administration d'une drogue thérapeutique (noradrénaline)- Tuteur. Stage effectué en relation avec Le Professeur Bruno LÉVY, Service de réanimation médicale, CHU Nancy Brabois et Groupe choc Équipe Avenir INSERM.

— Année universitaire 2009 - 2010 :
ESIAL - École supérieure d'informatique et applications de Lorraine, Projet interdisciplinaire ou de découverte de la recherche 2ème année : Nicolas ANDRÉ et Coralie PICOT, *Comment rendre accessible par le geste les éléments d'un modèle en utilisant les interfaces de réalité virtuelle et de réalité augmentée.*

— Année universitaire 2010 - 2011 :
ESIAL - École supérieure d'informatique et applications de Lorraine, Projet interdisciplinaire ou de découverte de la recherche 2ème année : Anthony BARONNE et Guillaume BOHR, *Implémentation de fonctions de visualisation 3D de données issues de périphériques multiples.*

— Année universitaire 2015 - 2016 :
ESIAL - École supérieure d'informatique et applications de Lorraine, Projet interdisciplinaire ou de découverte de la recherche 2ème année : Adrien PHEULPIN et Julien FEUVRIER, *Spécification et développement d'une plateforme de réalité virtuelle et de réalité augmentée à visée expérimentale..*

2.2.5 ICN Business School

— Année universitaire 2005 - 2007
Tutorat d'un projet École 1ère année *Nancy Ville Services* en relation avec la Chambre de commerce et d'industrie de Meurthe et Moselle et les Vitrines de Nancy.

— Année universitaire 2008 - 2009
Tuteur de l'année de césure de Romain JOST, Université de Bombay et stage en entreprise IPSOS Marketing.
Tuteur de stage de l'année de césure de Marion BRIDOT.

— Année universitaire 2009 - 2010
Accompagnement - conseil et aide au dévelopement du projet professionel personnel - de 20 élèves de 2ème année.

Tuteur de mémoires de synthèse de fin d'études du Master Grande École :
Marion BRIDOT : *Internet, bouleversement du paysage mediaset et nouvelles stratégies d'informations.*
Romain JOST :*Brand and Online Brand Awareness.*
Pierre-Antoine BEAUDOIN :*The emergence of the new Middle-Class in China : How to reach a new-born class ?*

— Année universitaire 2012 - 2013
Tuteur de mémoires de synthèse de fin d'études du Master Grande École :
Gersende KRUZIK : *La place du mécénat culturel en France en 2013*

— Année universitaire 2013 - 2014
Tuteur de mémoires de synthèse de fin d'études du Master Grande École :
Arnaud ALLAIN : *Contrôle de gestion et conscience de la situation et du risque.*
Frédéric BOUDOUX d'HAUTEFEUILLE : *Le co-développement : une proposition pour répondre aux limites intrinsèques du développement contemporain des longs métrages en France.*
Annie SANGANY : *L'évolution des industries culturelles en France face à l'émergence du digital.*

3

Productions

3.1 Publications

3.1.1 Thèses et mémoire de DEA

— FASS, D.(2002) Base de connaissances multimodales et esthétique de la connaissance, aide à l'action et réalité virtuelle : théorie et expériences, Phd thesis, LORIA UMR CNRS 7503, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 2002 - sous la direction de Jean-Paul HATON (Informatique et intelligence artificielle) et Francis LESTIENNE (Neurophysiologie).

Travail de recherche théorique et expérimental sur la biologie, la physiologie et l'esthétique de la connaissance, sa modélisation pour l'intelligence artificielle, l'interaction homme-machine, et l'utilisation des technologies de réalité virtuelle et de réalité augmentée pour l'aide à l'action. Au cours de cette recherche, financée par le CNES, la région Lorraine et l'INRIA LORIA, participation à la mission de vols paraboliques n8 CNES-SPACEHAB pendant laquelle il a été effectué un test pour la première fois au monde d'un système de réalité virtuelle et de réalité augmentée pour l'aide à l'action en apesanteur et en hypergravité.

— FASS, D (1994) Stratégies cognitives mises en œuvre dans l'utilisation d'une station de travail multimodale, Mémoire de stage de DEA de sciences cognitives, université Paris XI, effectué au LIMSI CNRS - sous la direction de Michel DENIS (groupe cognition humaine), Daniel TEIL et Yacine BELLIK (Architecture et modèles pour l'interaction).

Travail de recherche sur l'étude des stratégies cognitives mises en œuvre dans une tâche de cognition spatiale imagée et linguistique dans l'utilisation d'une station de travail multimodale et son application au dessin d'une part et d'autre part la réalisation pour la première fois d'une évaluation ergonomique d'une interface multimodale sur une tâche de dessin non simulée.

— FASS, D (1991) Principes et réalisation d'une base de connaissances d'aide au diagnostic des dysfonctionnements crânio-mandibulaires en tomodensitométrie et en imagerie par résonance magnétique. Faculté d'odontologie, UHP Nancy 1 - sous la direction des professeurs Daniel ROZENCWEIG (Odontologie) et Auguste TRÉHEUX (Imagerie médicale).

Travaux de recherche sur la modélisation des connaissances expertes pour l'analyse d'images en tomodensitométrie (scanner) et en imagerie par résonnace magnétique nucléaire (IRM)

pour l'aide au diagnostic des dysfonctionnements crânio-mandibulaires.

3.1.2 Revues internationales à comité de lecture

— FASS, D. (2009) Augmented human design for human space life and activities : an integrative physiological theoretical and experimental approach. Journal of Gravitational Physiology. 16(1),119-120.

— FASS, D. (2006) Rationale for a model of human systems integration : The need of a theoretical framework. Journal of Integrative Neuroscience, 5(3), 355-372. [I.F. : 1,294]

— FASS, D. (2005) Virtual environment a behavioral and countermeasure tool for assisted gesture in weightlessness : experiments during parabolic flight, Journal of Gravitational Physiology, Volume 12, Number 1 ; July 2005, pp.19-20.

— FASS,D., HATON J.P., LESTIENNE F. (1996) Approche physiologique de l'action : application à l'interaction homme-machine et au génie cognitif, Arch. Physiol. and Biochem., 104, 5, 548. [I.F. : 0,479]

3.1.3 Revues nationales à comité de lecture

— FASS, D. (2002) Éléments d'organisation du complexe individu-environnement artefactuel : évaluation d'un système de réalité virtuelle d'aide à l'action. RIHM - Revue d'interface homme-machine, 3, 2 : 75-94, 2002 .

— WIEDERSPIEL A., R.BERWICK, BAUCHOT D., FASS D. (1993) La phase chirugicale, Chap 4 - L'implantologie en odontologie, réalités quotidiennes et perspectives d'avenir, Mainard D., Merle M., Delagoutte J.P., Louis J.P. (Eds.), Actualité en biomatériaux, Romillat, Paris, vol 2, 234 - 238.

3.1.4 Papiers de conférences internationales publiés dans Lecture Notes (Springer) et IEEE

— NAZIN, R. and FASS, D. (2015) Human machine epistemology survey, in Vincent G. Dufy (ed.),Digital Human Modeling. Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management, Lecture Notes in Computer Science, Springer, 9184, pp 345-356.

— FASS, D. and GECHTER, F. (2015) Towards a theory for Bio - Cyber Physical Systems Modelling, in Vincent G. Dufy (ed.), Digital Human Modeling. Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management, Lecture Notes in Computer Science, Springer, 9184, pp 245-255.

— FASS, D. (2014) Reclaiming human machine nature, Digital Human Modeling. Applications in Health, Safety, in Vincent G. Dufy (ed.), Ergonomics and Risk Management, Lecture Notes in Computer Science, Springer, 8529, pp 588-599.

— FASS, D. (2013) Putting in perspective human-machine system theory and modeling : From theoretical biology to artifacts integrative design and organization, Vincent G. Dufy (ed.), Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics, and Risk Management. Healthcare and Safety of the Environment and Transport, Lecture Notes in Computer Science Volume 8025, 2013, pp 316-325.

— LIEBER, R. and FASS, D. (2011), Human systems integration design : which generalized rationale ?, in Kurosu, Masaaki (Ed.), Lecture Notes in Computer Science, 2011, Volume 6776, Human Centered Design, Springer, ISBN 978-3-642-21752-4, 101-109.

— FASS, D. and LIEBER, R. (2009), Rationale for human modeling in human in the loop systems design, in proceeding 3rd Annual IEEE International Systems Conference, SysCon, Vancouver, 27-30.

— FASS, D. (2007), Integrative Physiological Design : A Theoretical and Experimental Approach of Human Systems Integration, in D. Harris (Ed.) : Engin. Psychol. and Cog. Ergonomics, Lecture Note in Artificial Intelligence, Springer-Verlag, 4562, pp. 52-61.

3.1.5 Conférences internationales à comité de lecture

— NAZIN, R., FASS, D. and BASTIEN, C. (2016) Human Machine : From interaction to integration, ESA / ISGP / CNES Joint Life Sciences Meeting 2016, Toulouse, 5 - 10 juin 2016 (accepté).

— FASS, D. (2015) Affordances and safe design of assistance wearable virtual environment of gesture, 6^{th} International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AFHE2015), 26 - 30 July 2015, Las Vegas, Nevada, US, in T. Ahram, W. Karnowski et D. Schmorrow (eds.), Proceedia manufacturing, Elsevier, 3, pp 866-873.

— FASS, D. and CHAUVET, G. (2006) The mathematical theory of integrative physiology : a fundamental framework for human system integration and augmented human design, in Proceedings 3rd International Conference on Enactive Interfaces (Enactive /06), November 20-21,Montpellier, France, 135-136.

— FASS, D and HATON J.P. (2006), Augmented human design : a new approach of knowledge, I-Cap2006 Computers & Philosophy, American Association for Artificial Intelligence, Laval, France, 3-5 May.

— FASS, D. (2005) Graphical gesture analysis : a behavioral tool for virtual environment design, Measuring behavior 2005, 5th International conference on Methods and techniques in behavioral research, 30 August to 2 September 2005, Wageningen, The Netherlands, In CD Conference proceedings and in paper conference proceedings, 233-236.

— FASS, D., HATON, J.P. and LESTIENNE F. (1998), Multimodal knowledge-based systems and virtual reality interfaces, in Interfaces : Virtual Reality - Tools & Techniques, NIMES 98 : Complex Systems, Intelligent systems, & Interfaces, Nimes, 25 - 25 mai 1998, in "La lettre de l'IA" mai-juin 1998 : LLIA, 134-135-136, 125-128.

— MALNOY, F., FASS, D. and LESTIENNE F. (1998), Vection and postural activity : application to virtual environment design, in Interfaces : Virtual Reality - Tools & Technique, NIMES 98 : Complex Systems, Intelligent systems, & Interfaces, Nimes, 25 - 25 mai 1998, in "La lettre de l'IA" mai-juin 1998 : LLIA, 134-135-136, 121-124.

3.1.6 Conférences nationales à comité de lecture

— FASS, D. (2001) Éléments d'organisation du complexe individu-environnement artéfactuel : une évaluation dynamique d'un environnement de réalité virtuelle d'aide à l'action, dans les actes des JIM 2001, Troisièmes journées de l'informatique messine, IHM et Assistance, Grand public, Système Complexe et Handicap, Metz 4-6 juillet 2001.

— FASS, D. (1999) Les 4P de la portabilité et la réalité virtuelle : Théorie et Expérience, in Actes des Journées réalité virtuelle et cognition, 14-15 décembre 1999, École nationale supérieure des Télécoms Paris, 57 - 70.

—
s

3.1.7 Chapitres d'ouvrages

— FASS, D. (2012) Agmented human engineering : a theoretical and experimental approach to human system integration, Ed. Boris Cogan, System Engineering, Intech - Open Access Pub lisher, Rijeka, Croatia ISBN 979-953-307-410-7, mars 2012, www.intechopen.com/chapters/95113).

— JANOT, F. and FASS, D. (2012) Le corps d'une prophétesse ? Le Luth dans l'Égypte ancienne. La tombe de la « Prophétesse » d'Antinoé au musée de Grenoble, Florence CALAMENT, Ricardo EICHMANN et Christophe VENDRIES (éd.), Verlag Marie Leidorf GMBH Rahden/Westf.,pp. 190, Deutsches Archäologisches Institut, Orient-Abteilung Orient Archäologie Band 26, Berlin, Deutschland, mai 2012, pp. 19-30, ISBN 978-3-86757-656-3.
Mitteilungen des deutschen Instituts für Ägyptische Altertumskunde - MADAIK (Kairo, Berlin/Wiesbaden/Mainz.

— MÉRY, D. et FASS, D. (2011) Top modèles, top simulation : la momie de Lunéville (Observation, modélisation, simulation et validation), Ed. Francis JANOT, La Dame d'Antinoé : une « momie » au Château de Lunéville. Ouvrage collectif. Collection « Archéologie, espaces, patrimoines », Presses universitaires de Nancy. ISBN 978-2-8143-0088-0.

3.1.8 Publications à visée didactique

— FASS, D. (2009), L'homme augmenté : design et ingénierie des systèmes homme dans-la-boucle. Dossier « R&D dans la santé : et demain ? » , Mines Revue des Ingénieurs, ARTMINES, mars/avril 2009, 439, pp 36-37.

— Livre Blanc de la commission séniors : *L'accès à l'internet n'a pas d'âge*, Eds. ALZON, B. and FASS, D. , Renaissance numérique (2009)

— Rapport intermédiaire de l'Initiative France numérique 2012, Ed. Renaissance Numérique, (2008) http ://renaissancenumerique.typepad.fr/accueil/publi.html

— FASS, D. (2007), Sensations augmentées, dans Futur 2.0 : comprendre les 20 prochaines années , dans Layet M., Bultez Adams P. et Kaplan F. (eds.), FYP Editions/ Futuroscope, 102-104. (Livre édité pour les 20 ans du Futuroscope).

— FASS, D. (2006), L'homme augmenté, dans Robots extraordinaires, Fievet, C. and Bultez Adams P. (eds.), FYP Editions/ Futuroscope, 18-21.

— FASS D. (2006), Quels principes de conception sûre pour les nouvelles technologies de l'homme augmenté ? Du bloc opératoire au cockpit d'un avion de ligne. 22ième Forum Intégration Homme - Systèmes, Académie de l'Air et de l'Espace, Toulouse, 67-70.

— FASS, D. and BOY, G. (2006), Dental Offices Management as Complex Socio-Technical Systems, EURISCO Newsletter number 5, edited by EURISCO International, European Institute of Cognitive Sciences and Engineering. http ://www.eurisco.org/, March.

— FASS D., (1992), Quel examen de l'ATM l'odontologiste doit-il demander au radiologue ?, Info. Dent., 2961-2968.

3.1.9 Conférences invitées

— FASS, D. (2015), Concevoir l'intégration humain systèmes dans un système « sécurité critique », session 2, Sécurité : un frein à l'innovation, Journée Innvation et sécurité en santé numérique, Alsace e-santé - IRCAD - les hopitaux universitares de Strasbourg, Strasbourg le 6 octobre 2015, https ://www.alsace-esante.fr/suivez-en-direct-la-journee-innovation-securite-en-sante-numerique.

— FASS, D. (2013), Gestes et hypothèse. Colloque international «Indices et traces 2 : la mémoire des gestes», 19-21 juin 2013 UFR d'odontologie de Nancy, Nancy.

— FASS, D. and MÉRY, D.(2011), Vue universitaire sur le futur du numérique, dans le cadre commun du 2ème colloque Francopol sur la Cybercriminalité et 5èmes journées francophones de l'investigation numérique de l'AFSIN (Association des spécialistes francophones d'investigation numérique), École nationale de police du Québec, Nicolet (Québec), Canada, 12-14 octobre 2011.

— FASS, D. (2010), From integrative neurosciences to augmented human engineering, NEUROTALK 2010 : From nervous functions to treatment, Singapore, June 25-28, 2010.

— FASS, D. (2009), Avenir de l'occlusodontie : de quoi demain sera-t-il fait ?. Journées Internationales d'occlusodontie « Occlusodontie clinique : à l'heure des bilans - Consensus ou controverses » , Collège national d'occlusodontie (CNO), Nancy 12- 14 mars 2009.

— FASS, D. (2007), De l'aide à l'activité spatiale à l'aide à l'enfant atteint de paralysie cérébrale : intérêt et perspectives de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée, Congrès GERIMOC - Groupe d'étude et de recherche sur l'infirmité motrice d'origine cérébrale, La

paralysie cérébrale en Europe, DIJON, France 21, 22 mai 2007 http ://www.gerimoc.org/.

— FASS, D. (2007), Conception sûre des environnements virtuels d'aide aux gestes techniques : une approche des affordances, session thématique Réalité virtuelle, Congrès de la Société française de psychologie, Nantes, 13-15 Septembre 2007, p122 (conférence invitée et revue)

— FASS D., (2006), Quels principes de conception sûre pour les nouvelles technologies de l'homme augmenté, Forum IHS, Académie nationale de l'air et de l'espace, Du bloc opératoire au cockpit d'un avion de ligne, Mercredi 21 juin 2006, DGAC, Paris, http ://www.academie-air-espace.com/upload/doc/ressources/blocOp.swf

— CORNIAUT, D. and FASS, D. (2001), Réalité virtuelle et cognition : De l'art pariétal á la réalité virtuelle : évolution comparée. In actes de RESCIF 2001, La cognition : de l'artificiel au naturel , Collège de France, Paris, 26 et 27 octobre 2001, pp 46.

— FASS, D. (2001), Réalité virtuelle et cognition : recherche de l'esthétique du complexe individu - environnement artéfactuel. In actes de RESCIF 2001, La Cognition : de l'artificiel au naturel, Collège de France, Paris, 26 et 27 octobre 2001, pp 47.

— FASS D. (1997), Help for portable action, in "human and cultural aspect : intelligent community agora", Key Notes Speaker, Forum Telecom Interactive 97, International Telecommunication Union, Geneva, 8-14 september 1997, in : CD-ROM, Forum Telecom Interactive 97, ITU, Geneva, 1997.

— FASS, D. (1995), Lauréat de la bourse du C.N.O. 1991 : L'évolution d'une recherche, 12èmes journées internationales du Collège national d'occlusodontologie, Paris, 24 et 25 mars 1995.

— FASS, D. (1992), Le diagnostic radiologique des dysfonctionnements crânio-mandibulaires : une nouvelle approche, Journées internationnales de prothèse et d'occlusion de Nancy, Société lorraine de prothèse, Nancy, 11 et 12 septembre 1992.

— FASS, D. (1992), La bourse de recherche du C.N.O. Augusta : base de connaissances d'aide au diagnostic des dysfonctionnements crânio-mandibulaires en scanner et IRM, Actes des 9ème journées internationales du Collège national d'occlusodontologie, Lyon, 13 au15 mars 1992, pp 349-351, 1992.

— FASS, D. (1990), Intérêt pédagogique d'un système expert original, séance poster, 11èmes journées françaises de parodontologie, Société française de parodontologie, Cannes, 2 au 4 juin 1990.

— FASS, D. et LALLEMAND P. (1989), Réalisation d'un système expert pour l'analyse de l'imagerie de l'ATM, scanner et IRM - 13èmes journées du collège national de prothèse dento-maxillo-faciale, Nantes 29 et 30 septembre 1989.

— ROZENCWEIG D. et FASS D. (1988), Nouvelle imagerie de l'Articulation temporo-mandibulaire : scanner ou résonance magnétique nucléaire, Congrès international de l'association dentaire française, Paris, 21 au 24 Novembre 1988.

3.1.10 Publication dans workshops

— FASS, D. (2012) Augmented human : from biology to organization, First annual International research workshop, Research Chair in Art and Sustainable Entreprise (IRCASE), September 26, 2012, ICN Business School, Nancy.

— MÉRY D. et FASS D. (2012), Modélisation 3D, archéologie et criminalistique. Journée d'accueil de la délégation des recteurs de la Conférence régionale est des universités d'Algérie (CRUEst), coopération pédagogique en archéologie, U.F.R. d'odontologie, université de Lorraine, Samedi 21 janvier 2012

— FASS, D. (2009), Résilience et organisation des systèmes vivants. 7me journée thématique, De la sûreté de fonctionnement à la résilience des systèmes, Association Française d'Ingénierie Système, Cdrom AFIS, Toulouse, France, 1 juillet 2009.

— FASS D., (2007), Apport des sciences du vivant à l'ingénierie système. Atelier n°9 Système de systèmes, Forum académique AFIS'07, Association française d'ingénierie système, 28-29 Novembre 2007 Campus scientifique des Aiguillettes Villers les Nancy.

— FASS D., (2006), Quels matériaux fibreux pour les interfaces humains-machines appliqués aux domaines aérospatial et santé ? Pôle de compétitivité matériaux fibreux, journée scientifique du 10 novembre, faculté des sciences et techniques, UHP Nancy1.

— FASS, D. (2006), Émotions et design de l'interaction : accord à corps, Workshop « Émotions et cognition », 30 octobre 2006, Supaéro Toulouse - co-organisateur avec Guy BOY (Eurisco International SA).

— FASS, D. (2005), Des émotions à la conscience de la situation : l'esthétique, un principe pour l'ingénierie de l'interaction, workshop « Esthétique et interaction », 10 mai 2005, Supaéro Toulouse - co-organisateur avec Mélanie MOREL (Eurisco International SA).

— FASS, D. (2003), Esthétique de l'interaction. Journée visualisation de l'information EICSTES (IST-1999-20350), INIST CNRS ET INRIA LORIA, 19 janvier 2003.

— FASS D., GHAFOURI M. et LESTIENNE F. (1998), Multimodalité de la perception de l'espace d'action et conception d'environnement de réalité virtuelle et de réalité augmentée, Alexandre F. et Kant J.D. (Eds), Actes des 9ıèmes Journées Neurosciences et sciences de l'ingénieur, NSI'98, Munster, 11-14 mai 1998.

— LESTIENNE F., GHAFOURI M. et FASS D. (1997), Évaluation de la performance gestuelle chez les personnes âgées : une voie de recherche possible pour le diagnostic de la maladie d'Alzheimer, Table ronde : exemples d'application de la recherche spatiale a la médecine quotidienne, MEDEC, Paris, 23 au 27 mars 1997.

3.1.11 Divers Publications

— ITU TELECOM World 2011, panelist, session F23 «Driving Innovation», Genève, Suisse, 24-27 octbre 2011.

— ITU TELECOM Africa 2008, Le Caire, Égypte, 12 au 15 mai 2008 Forum Officer and Youth forum panelist session YF6, «ITU and academia commitment for the future of ICTs».

— ITU TELECOM Asia 2008, Bangkok, Thaïland, 2 au 5 septembre 2008 : New generation, new values, Forum Officer, Organizer and speaker Session «New generation of user interfaces», september 2sd 2008.

— FASS, D. (2007), abstract of the article published in Journal of Gravitational Physiology, Volume 12, Number 1 ; July 2005, pp. P19-P20, ref 20060054310, in Scientific and Technical Aerospace Reports (STAR), NASA, vol 44, 26, p 125.

— ASTI 2005, Organisateur et participant de la session thématique « Éthique et pilotage stratégique des STIC » avec comme participants, J. CABY (IAE de Paris), B. CYRULNIK (écrivain et neuropsychiatre) et JP HATON (UHP Nancy1 et Institut Universitaire de France), Clermont-Ferrand, 26 octobre 2005, http ://www.isima.fr/asti2005/programme.php

— FASS D., (2000), From biology to technology : an attempt at infocom technology design, The 31st annual conference of the International Institue of Communications, « Communication by design : exploring the digital future » , ST Pete Beach, Florida, USA, 25-28 september 2000.

— FASS, D. (1996), Camera Virtuosa "vision critique" - Actes de la première biennale de Metz, "un printemps d'artistes Ars multimédia", Metz, 13 au 17 mars 1996.

3.1.12 Chairman de session - Conférence internationale

— 2015, co-organisateur avec Brian GORE, Nasa AMES research center, et chairman de la session «Enhancing "human machine" behavior and performance : from human factors and ergonomic engineering to integrative bioengineering », HCI International 2015, 2-7 August 2015, Los Angeles, CA, United States. (http ://www.hcii2015.org)

— 2014, co-organisateur avec Brian GORE, Nasa AMES research center, et chairman de la session «Back to the future of human systems integration : from human factors to co-simulation», HCI International 2013, 22-27 June 2014, Heraklion, Crete, Greece. (http ://www.hcii2014.org)

— 2013, co-organisateur avec Brian GORE, Nasa AMES research center, et chairman de la session «Automation design and human systems integration : modeling, validation and certification issues», HCI International 2013, 21-26 July 2013, Las Vegas, Nevada, USA.
(http ://www.hcii2013.org)

— 2011, organisateur et chairman de la session «Human systems integration : from biology to technology and organization», HCI International 2011,9-14 July 2011, Orlando, Florida, USA.
(http ://www.hcii2011.org)

— 2009, BUS.6 : Future innovation : Scientific and technological foundations Friday, 09 October 2009, 09 :00 - 10 :30, Room B, ITU TELECOM World 2009, Geneva.
(http ://www.itu.int/tlc/WORLD2009/forum/entries/session.1003.html)

— 2007, Chairman de la session Cognitive issues in user interface design III, HCI International 2007, Beijing, P.R. China, August 21 th -27th.

3.1.13 Revues d'articles et expertise projet

— **Revue occasionnelle** : Journal of integrative neurosciences, Journal of intelligent manufacturing, Intellectica, Revue technique et sciences informatiques et IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications, International Colloquium of Art and Design Education Research (iCADER).

— **Expertise ANR** : 2006, Appel à projets TECSAN. 2013, Appel à projets - APPRENTISSAGE.

— **Comité scientifique** : 2016, Journée internationale des jeunes chercheurs, Aux frontières des disciplines - Recherche et interdisciplinarité : quelles pratiques pour quelles enjeux ?, École doctorale Stanislas, Campus lettre et sciences humaines, Université de Lorraine, Nancy (France). 17 juin.
— **Revue de Thèse** :
Rapporteur, thèse de Doctorat en business administration (DBA), Grenoble École de Management : Fernando Lagraña, *When e-mail crosses boundaries - exposure to spam and protection strategies*. Soutenue le 8 décembre 2011 à Grenoble.

3.1.14 Séminaires invités

— 2015 : NASA Ames Research Center, Human systems integration division, *Integrated human systems design : bridging the gap between formal and experimental approaches*, Mofett Field, CA, USA, July 31th 2015.

— 2015 : Airbus group - Innovations, creative design concept center TXDDI, Munich, Germany, April 1st 2015.

— 2015 : Séminaire équipe PerSeUS, Université de Lorraine, *L'homme augmenté*, Metz, le 24 février 2015.

— 2013 : NASA Ames Research Center, Human systems integration division, *Theoretical and experimental approach of human machine integration*, Mofett Field, CA, USA, July 23rd 2013.

— 2013 : Séminaire commun ONERA - Centre de recherche de l'École de l'air, *Approche théorique et expérimentale de l'intégration humain machine*, Salon de Provence, 10 avril 2013.

— 2011 : Comité scientifique «Sport et Résilience», Eurosport (Laurent-Éric LE LAY, Philippe

BOUHOURS, Boris CYRULNIK) : *L'homme augmenté*, Issy-les-Moulineaux, le 10 janvier 2011.

— 2008 : Séminaire Maison des Sciences de l'Homme - Paris Nord : *Réalité augmentée et homme augmenté*, Saint-Denis la Plaine, le 25 mars 2008.

— 2006 : Séminaire (industriel), Bertin Technologies Conseil, Pôle ergonomie et facteurs humain : *L'homme augmenté : interaction et organisation*, Montigny-le-Bretonneux, le 6 avril 2006.

Séminaire, 2B Finances, *Sciences intégratives de l'interaction : de l'écologie à l'économie intégrative de l'interaction*, Paris, le 23 mai 2006.

— 2005 : Séminaire de l'équipe «Systèmes et Transports» de l'UTBM : *L'interaction : une question d'organisation*, Belfort, le 8 février 2005.

— 2003 : Séminaire *espace réel - espace virtuel* de l'Action spécifique «Suppléance perceptive», STIC CNRS, Nancy le 14 novembre 2003 (organisateur et orateur avec le Pr. Gilbert CHAUVET).

Séminaire GREGOR IAE Paris 1 Panthéon Sorbonne, *Physiologie de la connaissance, organisation et pilotage des systèmes complexes*, Paris, le 10 décembre 2003.

— 2002 : 6ème Congrès international de chirurgie dentaire - Marseille Provence, *L'informatique, la télétransmission et l'organisation du cabinet dentaire : évolution ou révolution ?*, 21 mars 2002.

Congrès de l'Association dentaire française - ADF 2002, *Ergonomie et organisation : de l'aéronautique au cabinet dentaire* Paris, 2 novembre 2002.

Séminaire de l'association Progrès du management - APM club Vosges, *La réalité virtuelle : de la simulation à l'aide à l'action*, Nancy, 12 décembre 2002.

— 2001 : Journée scientifique du réseau Grand-Est sciences cognitives, CogniEst, La Petite Pierre, Organisateur et intervenant, session *Ésthétique et cognition*, Jeudi 18 octobre 2001.

— 1999 : Journée régionale des assistantes dentaires Strasbourg, *Érgonomie et organisation du travail dans le cabinet dentaire de l'an 2000*, 9 octobre 1999.

— 1998 : École des Mines de Paris, séminaire du centre de robotique CAOR, *Le geste et la conception d'environnements de réalité virtuelle*, 1er octobre 1998.

— 1997 : École nationale d'arts de Cergy : *Réalité virtuelle, perception et esthétique*, 18 mars 1997.

CNAM Paris, séminaire de la valeur C5 : conception des systèmes multimédia, option Art-espace temps, *Espace-temps : la réalité virtuelle et la réalité augmentée*, 19 mars 1997.

CNAM Paris, conférence DEA Média et multimédia, Laboratoire de langage électronique : *Perception, esthétique et design d'interface Homme-machine*, 27 octobre 1997.

— 1996 : CRIN/INRIA Lorraine, séminaire équipe RFIA : *Représentation mentale de l'action et du geste, expression motrice : application à la réalité virtuelle et à la réalité augmentée*, 8 janvier 1996.

CNAM Paris, séminaire de la valeur C5 : conception des systèmes multimédia, option Art et science : *Neurosciences cognitives et esthétique*, 4 avril 1996.

Archives - Centre d'Études et de recherche Henri Poincaré, Nancy, Les pratiques philosophiques de la modernité, séminaire d'épistémologie : *Approche neurophysiologique et psychophysiologique de l'interaction homme-machine : conséquences épistémologiques*, 14 mai 1996.

CNAM Paris, séminaire de la valeur C5 : conception des systèmes multimédia : *Esthétique et cognition*, 13 novembre 1996.

— 1995 : CRIN/INRIA lorraine, séminaire transversal RFIA : *Réalité virtuelle, réalité augmentée : une approche neurophysiologique et psychophysiologique de l'interaction homme-machine*, novembre 1995.

3.1.15 Organisation de conférences et workshops

— First Loria Nasa workshop, *Safety critical human-system integration designs in the aerospace, defense and medical operational domain*, Nancy du 9 au 12 juin 2015, http ://lorianasa-2015.loria.fr/.

— Journées francophones de l'investigation numérique, https ://www.afsin.org/jfin/ :

- 2015, École de police de Jurbise près de Mons, Belgique, 8-10 septembre 2015.

- 2014, LORIA, Vandoeuvre-lès-Nancy, France, 7-9 octobre 2014.

- 2013, Haute école ARC, Insitut de lutte contre la criminalité économique, Neuchâtel, Suisse, 10-12 septembre 2013.

- 2012, Levallois-Perret, France, 10-12 octobre 2012.

— ASTI'2005, deuxième rencontre des sciences et technologies de l'information, Clermont-Ferrand, 24-26 octobre 2005.

3.2 Projets scientifiques et industriels

3.2.1 Projet de thèse Ministère de la défense - direction générale de l'armement (DGA)

Octobre 2014 - Décembre 2017

Financement : **DGA, 100%**

Participants LORIA : Didier FASS

Rôle dans le projet : Auteur du sujet de thèse, de la soumission initiale et co-encadrant

Résumé : La conception sûre et le développement maîtrisé des systèmes humain-machine individuels et sociaux est un enjeu majeur tant pour les applications grand public que dans des usages professionnels, spécialement dans les domaines de sécurité critique de la santé, de l'aérospatial et de la défense.

Avec les systèmes interactifs ou cognitifs actuels, du smartphone au cockpit et à la chambre de réanimation, ou avec les systèmes techniques devant être opérés ou télé-opérés par un humain, les limites entre l'humain et l'artifice, produit de l'humain, s'estompent. Avec la convergence pluridisciplinaire nano-bio-info-cogno (NBIC), cette dynamique s'amplifie. Les futurs nano-systèmes biotechnologiques implantables, les technologies vestimentaires et les systèmes d'intelligence ambiante et ubiquitaire pour des applications civiles à tous les âges de la vie ainsi que pour des usages de défense laissent imaginer de nouveaux bénéfices et de nouveaux risques à maîtriser en connaissance de cause.

Cette disparition des limites entre l'humain biologique et social et l'artefact physique interactif et informationnel questionne les méthodes actuelles d'ingénierie et d'ergonomie de conception des systèmes cognitifs, la maîtrise des risques et le cadre juridique définissant les bonnes pratiques. Les développements actuels et futurs de l'humain assisté, suppléé, réparé, étendu ou augmenté posent ainsi de nouveaux défis scientifiques et techniques mais aussi de nouveaux questionnements épistémologiques.

Actuellement, l'humain « biopsychosocial » (Henri Laborit) est réduit, dans une relation métaphorique réciproque et symétrique aux artéfacts, à un être cognitif computo-logico-symbolique désincarné. Même réductionniste, cette conception humain-système demeure dualiste. La dualité philosophique « corps esprit » a cédé la place à une dualité « corps cerveau », le cerveau étant une machine cognitive ou computationnelle indépendante de son substrat organique qui traite de l'information avec des boucles de régulation ou de rétrocontrôle, une vision inspirée des machines de Turing et de Von Neumann, de la théorie de la communication de Shannon, Wiener et Weaver, de l'automatique et de la cybernétique.

Avec la convergence pluridisciplinaire, les enjeux de « l'humain machine » et des systèmes « humain artefact » évoluent. Les métaphores heuristiques comportementales et cognitives, si elles demeurent productives pour la conception des systèmes automatiques génèrent des questions et des problèmes nouveaux qui nous conduisent à questionner les fondements conceptuels théoriques et expérimentaux de « l'humain machine ».

La conception correcte et la technologie sûre des techniques et des artifices de « l'homme augmenté » nécessitent un système de connaissances et de description revisité, avec le moins possible d'a priori idéologiques et métaphoriques. Il s'agit pour nous de concevoir un cadre d'intégration de l'humain avec ses artefacts comme une question de couplage dans la relativité

d'échelle des dimensions de deux systèmes de nature différente : l'humain, biologique et anthropologique, et l'artefact, physique et logico-symbolique, des systèmes humain-machine aux systèmes socio-techniques.

La compréhension de cette hybridation synthétique nécessite un nouvel appareil conceptuel et un nouveau schéma de connaissances de l'intégration humain systèmes, capables de penser « l'humain machine » et ses nouvelles pratiques, de les modéliser et de les tester comme un tout structurel et fonctionnel intégré : *une épistémologie de l'extension du domaine de la vie et de la nature humaine augmentée.*

Partenaires :
— Christian Bastien, co-encadrant HDR, équipe PerSeUs, Université de Lorraine, Metz.

3.2.2 Projet de recherche destiné au support d'une thèse - AIRBUS

Novembre 2008 - Novembre 2011
Financement : **Airbus, 100%**.

Participants LORIA : Didier FASS et Dominique Méry

Rôle dans le projet : Auteur du projet avec Airbus et co-encadrant

Résumé : La conception des systèmes techniques fait appel aujourd'hui à des outils numériques de modélisation et de simulation, dont les principaux avantages sont d'éviter de développer des prototypes physiques coûteux et permettre de modifier rapidement un design. Ces outils sont utilisés, entre autres, dans le but de vérifier l'adéquation entre les opérateurs humains (en tant que composants d'un système dans lequel ils sont intégrés) et les systèmes techniques. Afin de modéliser cette inter-opération homme-système, ces outils numériques utilisent des modèles virtuels de l'humain, les mannequins numériques ; cela pose la question de la représentativité et de la validité des modèles, de leur niveau de confiance et de leurs fondements (théoriques).

L'objectif principal de la recherche proposée est de montrer que la modélisation humaine pour la conception des systèmes homme dans-la-boucle ou inter-opérant, nécessite une approche intégrative basée sur la physiologie, la question sous-jacente à la modélisation étant de savoir comment coupler deux systèmes de nature différente : un système biologique (humain) et un système artificiel ou technique. Dans le cadre d'une théorie prédictive de l'intégration homme-système, cela revient à une interrogation sur la nature de la relation entre l'homme et son environnement naturel et artificiel (technique).

Si on envisage l'interaction entre l'homme et un système comme une fonction (physiologique) de stabilité [6], qui participe à la bonne réalisation d'une fonction ou d'une tâche, alors cette fonction peut être envisagée comme une propriété de l'intégration dans des systèmes homme dans la boucle évolutifs et adaptatifs. Cette interaction ou inter-opération joue un rôle primordial et doit être prise en compte dans la conception des systèmes. Il s'agit donc de modéliser et valider en amont l'architecture du système socio-technique impliquant un ou plusieurs individus en interaction avec des systèmes techniques artefactuels.

Partenaires :
— Centre de recherche en automatique de Nancy, UMR CNRS 7039

3.2.3 Projet PAUSA « Partage d'autorité dans le système aéronautique »

Projet du pôle Aéronautique, espace et système embarqué (PAESE) - Aérospace Valley (Octobre 2006- Mars 2008)

Financement : direction générale de l'aviation civile - DGAC (ministère des transports), direction générale des entreprises - DGE (ministère des finances

Participants : Didier FASS (responsable INRIA LORIA), Vincent CHEVRIER, François CHARPILLET, Guillaume MULLER, Amine BOUZAMA (projet MAÏA)

Rôle dans le projet : Co-concepteur du projet avec Guy BOY (EURISCO SA) et Xavier CHALLANDON (Dassault Aviation). Responsable de la tâche 3 : *Partage d'autorité centré sur les facteurs humains et organisationnels.*

Résumé : Le projet PAUSA fédère un ensemble d'acteurs et de compétences en aéronautique, informatique, automatique et facteurs humains. Il a pour ambition d'apporter à l'industrie aéronautique française une perception d'ensemble de la performance et de la gestion du trafic aérien du futur, qui explorera le champ des possibles liés à l'interaction entre les différents acteurs, tant humains que technologiques, et éclairera les stratégies d'innovation et d'investissement en la matière. PAUSA est un projet relatif aux facteurs humains qui n'a pas de vocation technique. Il se concentre sur la définition et l'articulation cohérente des différents éléments et acteurs du système dans son ensemble pour les systèmes sol ou bord. Il pose le problème de la répartition des responsabilités entre les acteurs, ainsi que celui de la nature et des niveaux d'automatisation du système aéronautique en adéquation avec les rôles et les activités des opérateurs humains (contrôleurs et pilotes par exemple). La spécification et la certification des nouvelles technologies à concevoir doivent prendre en compte le facteur humain afin d'optimiser l'ensemble du système intégrant les différentes composantes hommes-machines sol et bord. La prise en compte du partage d'autorité aux niveaux local et global du système permettra d'optimiser l'utilisation de l'espace aérien, et même d'accroître sa capacité et sa sécurité. PAUSA a pour objectif de développer une approche théorique et pragmatique du partage d'autorité. Des modèles seront progressivement validés à partir de la mise en oeuvre expérimentale de différents scénarios de répartition de tâches permettant de couvrir les différents scénarios identifiés par les spécialistes du bord et du sol sur un horizon 2020.

Le nombre de paramètres à prendre en compte est important. La première phase du projet PAUSA consiste à :
— développer une taxonomie du domaine centrée sur le partage d'autorité ;
— développer des modèles de comportement en adéquation avec la problématique ;
— définir différents scénarios cibles qui seront mis en oeuvre dans les phases suivantes ;
— élaborer et proposer un ensemble de principes d'organisation technique et humaine ;
— appliquer l'approche à la problématique de la séparation et de l'anticollision (air et/ou sol) avec deux situations d'application : l'espace en route et les zones d'approche.

Partenaires :
— aéronautique : Airbus, DSNA/SDER, Dassault Aviation, Thales Avionics ;
— automatique, informatique et systèmes hommes-machines : CNRS/LAMIH, ONERA, Oktal ;
— sciences et ergonomie cognitives : EURISCO International, INRIA/LORIA.

3.2.4 Fibres fonctionnelles pour l'interaction homme-machines - Programme pluri-formation (PPF) Matériaux fibreux

Programme de recherche inter-secteurs de recherche de l'UHP Nancy1 en appui du Pôle de compétitivité fibres naturelles Grand est - Responsables : Pr A. MERLIN et P. STEINMETZ (2005-2008)

Financement : Ministére de la recherche et de l'enseignement supérieur.

Participant : Didier FASS (LORIA)

Rôle dans le projet : Membre du groupe de proposition scientifique du Pôle Fibres avec les Professeur Xavier DÉGLISE (LERMAB UHP Nancy1) et Jean-Marie CASTELLIN (directeur de l'ENSAIT Roubaix). Ce travail a donné lieu à une collaboration avec le Professeur Vladan KONCAR du GEMTEX / ENSAIT).
Thème développé : fibres fonctionnelles, tissus intelligents et interaction homme machine.

Thème 3 : *Modifications et propriétés conférées aux fibres fonctionnelles et matériaux*

Résumé :[thème 3.1] Une innovation importante pour le secteur traditionnel du textile par le développement d'un projet pluridisciplinaire «Art science technique management» intitulé *Sciences intgratives de l'interaction* a pour but la recherche et le développement de prototypes et de nouveaux services pour l'aide à l'activité humaine tout au long de la vie. Il s'agit de concevoir, organiser et produire des dispositifs : objets, vêtements et environnement intelligents et interactifs, visant à offrir à l'homme des capacités accrues en matière de perception, cognition et action. C'est possible grâce à une expertise en :
— Automation centrée sur l'homme et interface
— Design de l'interaction et des dispositifs (réalité augmentée)
— Physiologie intégrative pour la conception et le développement des systèmes d'interaction homme-environnement artificiel.

Dans le cadre de son projet et du thème "modifications et propriétés conférées aux fibres fonctionnelles", le projet "sciences intgratives de l'interaction" se propose de développer deux orientations de recherche autour des fibres fonctionnelles pour l'interaction homme-machine (IHM) :
— Étudier les fonctionnalités des matériaux et fibres fonctionnelles déjà identifiées pour l'IHM ;
— Spécifier des fonctionnalités dont on a besoin pour l'IHM en fonction de la psychophysiologie humaine et des principes d'organisation des systèmes artificiels d'interaction multimodale.

3.2.5 Projet E-Bird « Connaissance des flux économiques dans la Grande Région »

.

Janvier 2005 - Juin 2006

Financement : FEDER, Projet européen Interreg IIIC, Grande Région e-Bird (2005-2007)

Participants ICN Business School : Catherine MACADRÉ, leader du projet, et Didier FASS

Rôle dans le projet : Conception de questionnaires et traitements statistiques.

Résumé : Ce projet avait pour objectif d'une part, d'élaborer une méthodologie permettant d'identifier les flux économiques dans la Grande Région, et d'autre part, de conduire une analyse économique se fondant sur cette méthodologie. Il a été décidé de se concentrer sur le secteur du transport de marchandises par route, qui est apparu comme stratégique dans cette perspective. Environ 200 entreprises du secteur ont été sondées sur l'ensemble du territoire en vue de recueillir non seulement des données quantitatives (chiffre d'affaires, chiffre d'affaires à l'export, nombre de salariés...) mais aussi qualitatives : orientations stratégiques et de motivation à développer une activité commerciale sur le territoire de la Grande région.

Partenaires : Groupe ICN École de Management (Lorraine), HEC Ecole de gestion de l'université de Liège (Région wallonne), Info Institut (Rheinland-Pfalz), Institut universitaire international de Luxembourg (Luxembourg).

3.2.6 DRIVESAFE - Development of 3-D Eye tracking device for safer driving and more efficient Web Page production

Octobre 2004 - Décembre 2007

Financement : European 6FP, contract number COOP-CT- 2004-508280, Instrument : CRAFT

Participant LORIA INRIA, équipe Cortex : Didier FASS et Frédéric ALEXANDRE

Rôle dans le projet : Expert en neurosciences et design technologique.

Résumé : This research project aims at using an already existing Eye Tracking Device (ETD) that was developed by Kayser-Threde for scientific use on the MIR space station and on the International Space Station. For the DRIVESAFE project, this existing ETD was used as a starting point to improve and modify it in such a way that the new tool could be used for gaze measurement and man-machine interface optimization. A completely new hardware feature for DRIVESAFE is the introduction of a front-scene camera in order to observe the environment in front of the person in real-time. The increased amount of data required a new and more sophisticated computer system for data transfer and storage. The acquisition of eye image data and pupil detection was implemented based on the space device, whereas for gaze tracking within the front-scene a lot of completely new software modules and algorithms were developed. Additional effort was invested in optimization of the headband design for better handling and comfort. This DriveSafe project was in support of improved innovation in service companies, e.g. in the car and aerospace industry where there is a need to develop at a European level an understanding of driver's or pilot hypovigilance but also to use this ETD tool for better dashboard design in cars and cockpits. The ETD tool is liable also to be used in the marketing and communication industry where there is already a considerable activity in the impact measurement of Web pages on consumer behavior.

Partenaires :
— Manager du Projet : ONE TOO assisté de TECHNOFI
— Automotive : ONE TOO, SIEMENS Automotive
— Media et Interface Design : PLAN B MEDIA, MEDIASCORE
— Aéronautique : AIRBUS et EURISCO SA
— Interaction homme-machine et neurosciences : Cortex INRIA LORIA

3.2.7 Action spécifique du CNRS « Suppléance perceptive et interface » - RTP 39 Interactions médiatisées et réalité virtuelle, (Resp. J. Droulez) - Dept. STIC/CNRS, axe Interactions humaines et cognition

Juin 2002 - Décembre 2003

Financement : CNRS

Participants LORIA, équipe Cortex : Didier FASS, Hervé FREZZA-BUET, Nicolas ROUGIER

Rôle dans le projet : Responsable LORIA et organisateur de la 8^{ieme} journée de travail au LORIA

Résumé : L'objectif principal de l'action Suppléance perceptive et interface est de fonder une ergonomie théorique qui doit permettre d'expliquer comment l'appropriation et les modifications des dispositifs de médiation (interface, dispositif de couplage) contraignent et rendent possibles des activités cognitives (perceptives en particulier). Méthodologiquement, il s'agit d'analyser et de formaliser des phénomènes de constitution active de percepts nouveaux et ce, en fonction des propriétés manipulables des interfaces. Cette méthodologie générale se double d'une démarche comparative entre les effets des propriétés des interfaces saisies par des humains et les effets des propriétés des modalités de couplage d'artéfacts tels des robots. Ce projet impose l'interdisciplinarité, comme pratique de recherche, en mobilisant notamment sciences cognitives, ergonomie, ingénierie des interfaces, robotique, philosophie de la technique et anthropologie, à travers les huit laboratoires participants.

Partenaires :
— Costech/BIM (E.A. 2223/UMR 6600, Compiègne),
— ETIS (Upress-A8051, Cergy),
— Institut de sciences cognitives (UMR 5015, Lyon),
— Neurophysique et physiologie du système moteur (FRE 2361, Paris V),
— Laboratoire de psychologie expérimentale (UMR 8581, ParisV),
— Préhistoire et technique (UMR 7055, ParisX)
— Psy.Co (E.A. 1780, Rouen)

3.2.8 ACI Cognitique 45B, Ministère de la recherche

2001 - 2002
Financement : Projet de l'Action Concertée Incitative Cognitique - Action : *Affordances et conception d'interface humain-machine : une approche esthétique de l'interaction*

Participant : Didier FASS, Jean-Paul HATON

Rôle dans le projet : Co-auteur du projet et co-animateur avec Guy BOY (Eurisco)

Résumé : Ce projet avait pour objet d'étudier le rôle des affordances (capacité des objets à suggérer des actions) sur le processus d'interaction humain-machine et de concevoir un modèle théorique prédictif des dynamiques d'interaction et des affordances, intégrant les aspects fonctionnels, issus des recherches et méthodes des sciences cognitives, d'une part, des principes et des règles du design artistique et d'expertise de spécialistes d'art et de communication, appliqués au design des interfaces, d'autre part.

Partenaires :
— EURISCO International spécialisé dans l'ingénierie cognitive et l'aéronautique,
— Département communication et design graphique : atelier édition électronique de l'École nationale supérieure d'art de Nancy
— Équipe Cortex INRIA LORIA.

3.2.9 1996-1998 Projet *systèmes d'aide à l'action portables*

,
Financement : Communauté urbaine du Grand Nancy, Région Lorraine et Centre national d'études spatiales (CNES) sur convention entre l'université Henri Poincaré Nancy 1, le Pôle européen de santé, le Centre national d'études spatiales et l'Institut de médecine et physiologie spatiale (MEDES).

Participant : Didier FASS

Rôle dans le projet : Concepteur et porteur du projet

Résumé : La recherche et développement de l'application était envisagée avec le MEDES. La conception, l'expérimentation et la mise au point des prototypes faisait partie de mon travail de recherche de thèse d'université. L'application proposée, "Système d'aide à l'action portable", était destinée dans un premier temps à l'activité spatiale humaine extra-véhiculaire.

Objectifs :
— concevoir des "outils" d'aide à la perception et à l'action, de documentation, en tenant compte des paramètres neurophysiologiques et psychophysiologiques des sujets et des contextes dépendants ;
— concevoir une ergonomie et une sémantique neurocognitive adaptées, dans un souci de portabilité et d'efficacité des percepts sensori-moteurs transmis par l'interface de ces outils ;
— proposer une aide à l'action quand les capacités de perception et d'action sont modifiées ou altérées, soit du fait du contexte, soit du fait de l'individu.

La finalité de ce projet était de diminuer les heures d'entraînement et d'apprentissage des tâches à exécuter dans l'espace, et de permettre la réalisation, le contrôle et l'aide à l'action optimisés pour l'opérateur en situation. Ces outils étaient destinés à faciliter la réalisation du travail (des actions) en diminuant la charge cognitive et la charge physique des opérateurs, le

sujet pouvant d'avantage mobiliser ses capacités sur le but à atteindre.

Le projet comportait un volet valorisation aux télésciences (télérobotiques et télémédecine), à l'aide au handicap, à l'aide au personnes âgées et à l'art.

Partenaires :
— laboratoire de biologie et physisiologie du comportement - URA CNRS 1293,Nancy
— équipe RFIA -LORIA - UMR 7503,NAncy
— pôle européen de santé, Nancy
— Institut de médecine et physiologie spatiale - MEDES, Toulouse
— Centre national d'études spatiales (CNES).

A

Les cinq publications principales

Journal of Integrative Neuroscience, Vol. 5, No. 3 (2006) 355–372
© Imperial College Press
Imperial College Press
www.icpress.co.uk

Short Communication

RATIONALE FOR A MODEL OF HUMAN SYSTEMS INTEGRATION: THE NEED OF A THEORETICAL FRAMEWORK

DIDIER FASS

ICN — LORIA INRIA,
Artem Augmented Human Project,
Campus Scientifique — BP 239,
54506 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex, France
didier.fass@loria.fr

Received 15 May 2006
Accepted 11 August 2006

Human systems integration (HSI) involves augmented human design with the objectives of augmenting human capabilities and improving human performance using behavioral technologies. The fundamental matter of human systems integration and augmented human design is the organization and the nature of interactions that couple physiological systems, humans- and engineered systems, artifacts. By this definition, augmented human consists of interactive artefacts linked to physiological systems. This paper focuses on the rationale of a HSI model based on specific experiments (comparison of dynamical sensorimotor integration and motor performances in real and virtual environments) that confirm the hypothesis of functional interaction in the framework of Chauvet's mathematical theory of integrative physiology (MTIP). Epistemological constraints for HSI and the role of MTIP are briefly discussed in this context.

Keywords: Human systems integration; augmented human; functional organization; sensorimotor coupling; functional interaction; theoretical integrative physiology; virtual environment; safe design.

1. Introduction

Human systems integration is primarily a technical and managerial concept with specific emphasis on methods that can be utilized to link HSI to systems concepts and engineering [1]. Over the past decade, research programs have developed a wide range of tools, techniques, and technologies aimed at integrating human factors into engineering systems in order to achieve important cost and performance benefits that otherwise would not have been accomplished.

Nowadays, human systems integration is an umbrella term for several areas of "human factors" research [18] and engineering that include human performance,

technology design, and human-interactive systems interaction. This concerns the integration of human capabilities and performances into the design of complex human-machine systems to support safe, efficient operations.

Human systems integration involves augmented human design with the objectives of increasing human capabilities and improving human performance using behavioral technologies. By using wearable interactive systems made up of virtual environments technologies-like or wearable robotics, many applications are offered for technical gesture assistance, e.g., in aeronautics, human space activities or surgery. Gesture is a highly integrated neuro-cognitive behavior, based on multiple physiological functions dynamical organization [2, 4]. Assisting gestures and enhancing human skills and performances requires coupling sensorimotor functions and organs with technical systems by artificially generated multimodal interactions. Thus, augmented human design has to integrate human factors such as anatomy, neurophysiology, behavior- and assistive cognitive and interactive technologies in a safe and coherent way, i.e., human in-the-loop system design.

Current models for human-machine interaction or human-machine integration are based on symbolic or computational cognitive sciences and related disciplines. They even use experimental and clinical data; they are still based on logical, linguistic and computational interpretative conceptual frameworks of human nature where postulate or axiomatic replace predictive theory. This design process is problematic and goal-oriented and the main steps are: analysis and experience feedback, modeling, experimentation or simulation and validation [14]. This is *a posteriori* method based on the expertise of the engineers and their knowledge-based systems. It is by no means predictive and it cannot be applied in a general way.

It is essential for robust modeling and for the design of future rules in HIS engineering to enhance human capabilities and performance. Augmented human design needs an integrative theory that takes into consideration the specificity of the biological organization of living systems, according to the principles of physics, and a coherent way to organize and integrate structural and functional artificial elements. Furthermore, since engineered systems are grounded in physical principles and their mathematical representation, human in-the-loop systems need to be founded on some physiological principles of integration and their mathematical representation and formalism [9].

Consequently, there are two factors that limit HSI: The first is a misunderstanding of the autonomy of a living system. The second is the underestimation of the nature of interaction and integration as a biological process involved in the dynamics of knowledge as a physiological function of the living body. In contrast, system integration for augmented human design, human in-the-loop systems involves: (i) a shift from a metaphorical [21], and scenario-based design, grounded on *metaphysical* models and the rules of interaction and cognition, to a predictive science and engineering of interaction and integration; (ii) requires a new epistemological and theoretical approach to the nature of knowledge and cognition considered as an integrated biological, anatomical, and physiological process.

Therefore, improving cognition and sensorimotor loops with automation and interactive artefacts, first enhances human capabilities and performance, and secondly, it extends both the anatomy of the body and the physiology of the human behavior. Designing augmented humans by using virtual environment technologies, means integrating artificial and structural elements through artificial multimodal functional interactions. In conclusion, the question is how to couple and integrate in a behaviorally coherent way, a biological system with a physical and artefactual system by organizational design.

The aim of this paper is to present the rationale for a model of HSI (Sec. 3) based on MTIP (Sec. 2). This kind of model assumes the existence of functional interactions between the engineered and the physiological sensorimotor systems. This hypothesis in the framework of MTIP is experimentally analyzed and confirmed (Sec. 4). In Sec. 5, the proposed method is discussed in the framework of MTIP.

2. Mathematical Theory of Integrative Physiology

The mathematical theory of integrative physiology (MTIP) [5–8] examines the hierarchical organization of structures (i.e., anatomy), and functions (i.e., physiology) of a living system as well as its behavior. MTIP introduces the principles of a functional hierarchy based on structural organization within space scales, functional organization within time scales and structural units that are the anatomical elements in the physical space. This abstract description of a biological system is represented on Fig. 1 (top). It looks at the problem of structural discontinuity by introducing functional interaction ψ from structure-source s into structure-sink S, as a coupling between the physiological functions supported by these structures.

Unlike interaction in physics, at each level of organization, functional interactions are non-symmetric leading to directed graph, and non-local leading to non-local fields, and they increase the functional stability of a living system by coupling two hierarchical structural elements. According to G. Chauvet: "We have chosen a possible representation related to hierarchical structural constraints, and that involves specific biological concepts. We also made the important hypothesis that a biological system may be mathematically represented as a set of functional interactions of the type: $s \overset{\psi}{\rightarrow} S$. However, the main issue now is to determine whether there exists a cause of the existence of functional interactions, i.e., to the set of triplets $s \overset{\psi}{\rightarrow} S$? What is the origin of the existence (the identification) of s, S and ψ that together make a component $s \overset{\psi}{\rightarrow} S$ of the system? The answer to this issue is the existence of a mathematical principle, the PAAS, a principle that makes of a framework, the MTIP, a veritable theory... *The PAAS may be enounced as follows*: For any triplet $(s\psi S)$, denoted as $s \overset{\psi}{\rightarrow} S$, where s is the system-source, S the system-sink, and ψ the functional interaction, the area of stability of the system $s \overset{\psi}{\rightarrow} S$ is larger than the areas of stability of s and S considered separately. Some examples will be shown in the next section. In other words, the increase in complexity of the system

$s \overset{\psi}{\rightarrow} S$ corresponds to an increase in stability. MTIP consists in a representation (set of non-local interactions $s \overset{\psi}{\rightarrow} S$), an organizing principle (the PAAS), and a hypothesis (any biological system may be described as a set of functional interactions) that gives rise to two faces of the biological system, the (O-FBS) and the (D-FBS). The first one may be studied using the potential of organization, the second one using the S-Propagator formalism making an n-level field theory. Both are based on geometrical/topological parameters, and coupled via geometry/topology that may vary with time and space (state variables of the system) during development and mature phases. The structures are defined by the space scale κ, hence the structural hierarchy, the functions are defined by the time scale T, hence the functional hierarchy. Any model built in this theoretical framework will use the same representation, the same basic principle and hypothesis, and consequently will be comparable and able to be coupled with any other on".

What we propose in this paper is to couple the biological system with an engineered system. Clearly, this is a new theoretical paradigm for knowledge-based systems and augmented human design: "For the biological system, the PAAS represents a principle of organization in which it is difficult to doubt. Although the true challenge is to mathematically identify these functional interactions, practically, the theoretical framework using *observed* functional interactions allows rigorous integration of coupled processes, and thus useful to provide explanations for many phenomena". Thus, MTIP will be applied on different space-time levels of the body, i.e., the physiological system and the engineered system.

3. Rationale for a Model of HSI

Since artefactual systems are mathematically thought and based on the physical principles, HSI needs to be thought in mathematical terms. In addition, there are several constraints to make HSI safe and efficient. They address the virtual environment, sensorimotor integration and coherency.

3.1. *Constraint 1: Virtual environment is an artefactual knowledge-based environment*

As an environment, which is partially or totally based on computer, generated sensory inputs, a virtual environment is an artificial multimodal knowledge-based environment [11]. Virtual reality and augmented reality, which are the most well known technologies of virtual environments, are obviously the tools for the augmented human design and the development of human in-the-loop systems. Knowledge is gathered from interactions and dynamics of the individual-environment complex. It is an evolutionary, adaptive and integrative physiological process, which is fundamentally linked to the physiological functions with respect to emotions, memory, perception and action. Thus, designing an artefactual or a virtual environment, a sensorimotor knowledge-based environment, consists of making biological

individual and artefactual physical systems consistent. This requires a neurophysiological approach, both for knowledge modeling and human in-the-loop design.

3.2. *Constraint 2: Sensorimotor integration and motor control*

Humans use multimodal sensorimotor stimuli and synergies for interacting with their environment, either natural or artificial (e.g., vision, vestibular stimulus, proprioception, hearing, touch, taste, etc) [22]. When an individual is in a situation of immersive interaction, wearing a head-mounted display and looking at a three-dimensional computer-generated environment, his or her sensorial system is submitted to an unusual pattern of stimuli. This dynamical pattern may largely influence the balance, the posture control [17], the spatial cognition and the spatial motor control of the individual. Moreover, the coherence between artificial stimulation and natural perceptual input is essential for the perception of the space and the action within. Only when artificial interaction affords physiological processes is coherence achieved.

3.3. *Constraint 3: Coherence and HSI*

If this coherence is absent, perceptual and motor disturbances appear, as well as illusions, vection or vagal reflex. These illusions are solutions built by the brain in response to the inconsistency between outer sensorial stimuli and physiological processes. Therefore, the cognitive and sensorimotor abilities of the person may be disturbed, if the design of the virtual environment does not take into account the constraints imposed by human sensory and motor integrative physiology. The complexity of physiological phenomena arises from the fact that, unlike ordinary physiological systems, the functioning of a biological system depends on the coordinated action of each of the constitutive elements [9]. This is why the design of a VE, as an augmented biotic system, calls for an integrative approach.

Integrative design strictly assumes that each function is a part of a continuum of integrated hierarchical levels of structural organization and functional organization as described above within MTIP. Thus, the geometrical organization of the virtual environment structure, the physical structure of interfaces and the generated patterns of artificial stimulations, condition the dynamics of hierarchical and functional integration. Functional interactions, which are products or signals emanating from a structural unit acting at a distance on another structural unit, are the fundamental elements of this dynamics.

Consequently, the proposed model inside Chauvet's MTIP assumes the existence of functional interactions between the artificial and the physiological sensorimotor systems. This hypothesis has been tested through experiments described in the following section. This model in the framework of MTIP is formally described in Fig. 1 (bottom) that is the 3D representation of the integrated augmented human design. The human (Ω) is represented as the combination of the hierarchical structural (z)

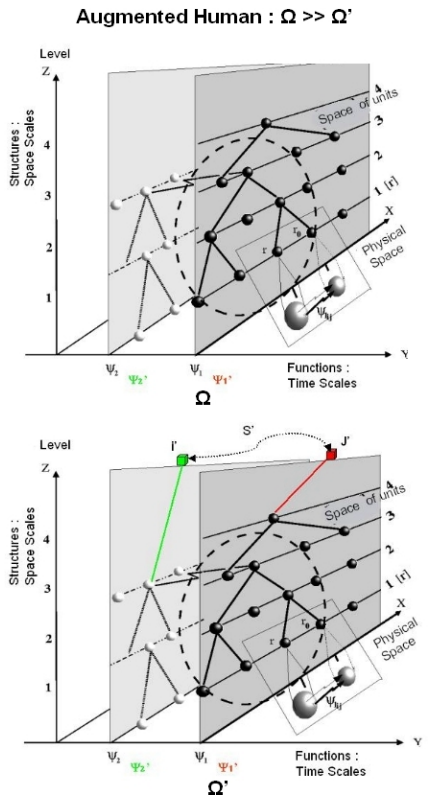


Fig. 1. The augmented human design model: (Top) Ω-3D representation of a biological system based on Chauvet's MTIP, (bottom) Ω'-3D representation of an augmented human, extending the biological system on the left to an artificial sensorimotor loop.

and functional (y) organizations. The x axis corresponds to the ordinary physical or Cartesian space. Each physiological function ψ is represented in the $x\psi y$ plane by a set of structural units hierarchically organized according space scales. Two organizational levels are shown: ψ_1 and ψ_2. The different time scales are on the y axis, while space scales, which characterize the structure of the system, are on the z axis. The role of space and time clearly appears. Ψ_{1ij} is the non-local and non-symmetric functional interaction.

Units at the upper levels of the physiological system represent the whole or a part of sensorial and motor organs. Augmented human (Ω') design consists in creating an artificially extended sensorimotor loop by coupling two artefactual structural units I' and J'. Their integration into the physiological system is achieved by the

functional interactions (i.e., sensorimotor) they generate. From sensors outputs to effectors inputs, the synchronized computerized process S' controls and adapts the integration of the functional interactions artificially created into the dynamics of the global and coherent system.

4. Experiment: Materials and Methods

The gesture-based method for virtual environment design and human systems integration assessment is a behavioral tool inspired by Chauvet's theoretical framework, i.e., (i) an integrated marker for the dynamical approach of augmented human design, and the search for interaction primitives and the validation of organization principles; and (ii) an integrated marker for a dynamical organization of VE integrative design.

4.1. *Assessment method and material*

Traditional assessment method: There are different traditional assessment methods to investigate user's behavior interacting with virtual environments [23]. Psychological methods investigate cognitive strategies. Qualitative method uses questionnaire and semantic scales for assessing subjective feelings. Psychophysics experiment on perceptual thresholds and reaction time according to stimuli. Classical physiological methods explore correlated variations of basic physiological parameters such as blood pressure, heart and respiratory frequencies or EEG signal changing. Applied ergonomics [24] investigates hardware and software usability in terms of participant performance. From a human-centered design point of view, cognitive function analysis [25] analyzes human-machine interaction in terms of functions, assuming that a function includes both knowledge about an activity and the way this activity is processed. If they are locally pertinent, these analytical methods do not allow the assessment of the whole human-VE integration and its design.

Sensorimotor maïeutics: The following method was developed for expert system engineering (knowledge-based system) and to explore the knowledge nature, as a behavioral property of coupling, generated in the dynamics of the individual-environment interaction, either natural or artificial. We use gesture as a sensorimotor maïeutics.

Graphical gesture method: As stated in the introduction, the goals of this research are to search for the technical and sensorimotor primitives of augmented human design for gesture assistance by a wearable virtual environment, using virtual reality and augmented reality technologies, for human space activities, aeronautical maintenance and surgery. We have chosen as behavioral assessment adapts to a virtual environment a neurophysiological method used in motor control research to study the role of the body in human spatial orientation [26], and the representation of the peri-personnal space in humans [27]. This investigation is performed by analyzing the upper limb movement in the three-dimensional space. This movement consisted

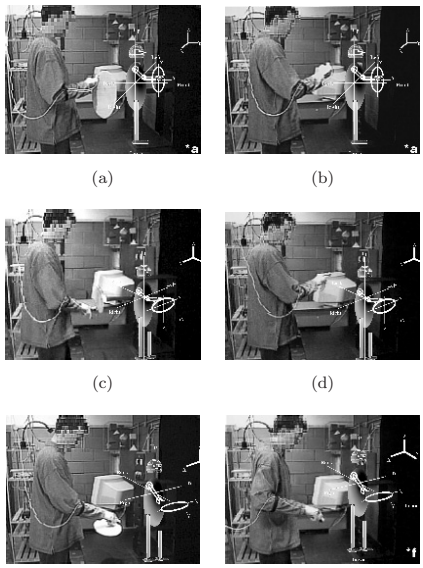


Fig. 2. Learning and control situation of drawing ellipses, with model: (a) vertical sagital (SV), (b) transversal frontal (TF), (c) transversal horizontal (TH), and memorized, (d) SV, (e) TF and (f) TH.

of the production of ellipses drawings executed in the three anatomical references planes: sagittal, frontal and horizontal. In comparative studies about the mental representation of space and the influence of visual information, Ghafouri showed that the motor expression of the anatomical reference planes was anisotropic [28].

By selecting this experimental paradigm, the movement was considered as the expression of a cognitive process *per se*: the integrated expression of the sensorimotor three-dimensional space. According to this paradigm, our experiment consisted in drawing ellipses with an eccentricity of 0.87 (major axis 40 cm, minor axis 20 cm), in the free 3-D space with or without wearing a virtual environment. Ellipses drawn without VE are the control experiments (Fig. 2). It consists of two main situations: open and closed eyes, touch or guided by a real wooden ellipse, and memorized without a model.

To highlight structural and dynamical primitives of human systems integration and VE design for assisting gestures (Fig. 2), the *a priori* main classes of VE elements of organization were defined as follows:

— Virtual reality
— Augmented reality (see-through)

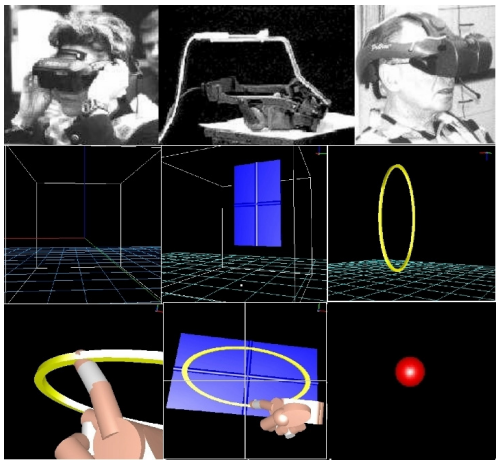


Fig. 3. Examples of different structural and functional primitives for VE design.

— Type of head mounted display (HMD): Immersive or not, low or high visual accuracy, narrow or large field of view, light or heavy, well balance or not
— Visual structure of space: Allocentric or egocentric
— Background color
— Model of ellipse and its plane of movement
— Movement visual feedback: Anthropomorphic (hand) or abstract (ball), dynamical quality of feed back (remanence, persistence)
— Sensorimotor coupling: Visuo-proprio-kinesthetics or visuo-haptic
— Spatial orientation of gesture: Vertical sagittal, transversal frontal and transversal horizontal.

To highlight the dynamic principles of organization for assisting gestures, we set up a protocol according to a complex and incremental VE design, allowing intuitive learning of both task and use of VE. Ten volunteers (7 men and 3 women, 25 to 35 years old) were asked to performed graphical gestures in the three anatomical planes of reference for each step of the design complexity (Fig. 3). The first step of the protocol consisted of drawing ellipses wearing a turned off HMD to study the influence of HMD design and the intrusiveness on sensorimotor integration and motor control. The last step of the virtual reality artifact combined allocentric and egocentric prototypic structural elements of artificial visual space, model of ellipses and their planes of movement, and a visual feedback of movement.

Material: Material brought into play for our experiments is traditional hardware and software elements of a wearable VE: head mounted display I-Glasses® immersive or see through, a Kayser Threde Proview® HMD a Frastrack Pohlemus®

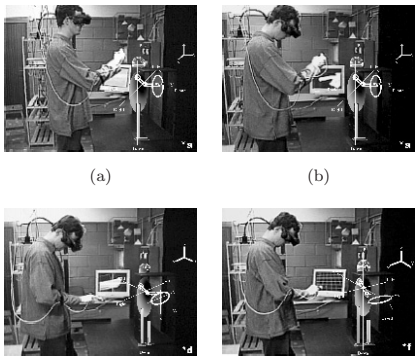


Fig. 4. Graphical gesture of ellipse drawing in the 3D space is performed and analyzed in different configurations, more or less complex, of immersive virtual environment assisted drawing ellipses: (a) SV ellipses and neutral and colored background, (b) SV ellipses and anthropomorphic visual feedback of movement (artificial hand), (c) TF and model of ellipse insert in its plan of movement without visual feedback of movement, (d) TH ellipses and abstract representation visual feedback of movement (ball).

electromagnetic motion tracking system, a workstation and a specific software for managing and generating the visual virtual environment in real time. This software allows us to register data from the sensors.

4.2. *Graphical gesture analysis and results*

Data analysis: For gesture analysis, we calculated 16 variables from raw data (*xyz* coordinates) produced and registered from the sensor worn on the tip of the index finger of the working hand for 15 seconds at 120 hz of drawing ellipses (Annex 1). Four categories of variables characterize the graphical gestures: kinematics (A, B, C, D), position (F, G, H, I), orientation (J, K, L, M) and shape (E, N, O, P).

Statistical analysis: As each experimental step is described by a large number of parameters, we use multidimensional statistical analysis, (principal component analysis, PCA) coupled with a hierarchical classification. These descriptive analyses are calculated with the Decisia SPAD 4.0® software from the mean values of the 10 subject's 16 computerized variables for each experimental situation (see Annexes 2 and 3). PCA highlights the differences and similarities between each experimental situation and consequently for each element of VE design and HIS (Fig. 5). The position of variables on the principal plane is interpreted in terms of correlation (Fig. 4). The property of hierarchical classification is to gather experimental situations in a limited number of homogeneous classes (Fig. 6).

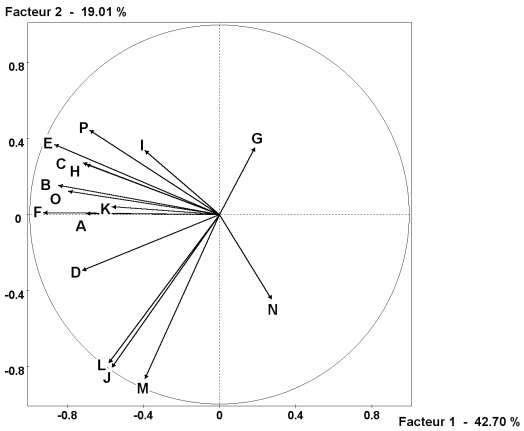


Fig. 5. Variables correlation circle: the first principal (F1) component is correlated in a negative manner with the position, kinematics and shape variables; especially with the global position F, the average velocity B and the mean area E. The second principal component (F2) is correlated in a negative manner with the variables of orientation M, J and K. Whereas K orientation variation in relation to the sagittal plane is fairly correlated with F1. Thereof, more the statistical individual will be placed downward and on the left on the F1-F2 plane more their global orientation and orientation in relation to the both frontal and horizontal planes will be important.

Thus, we are able to show differential effects for each element of the incremental design of VE, and to assess the global design and dynamics of the human systems integration. These experimental results will ground VE design modeling according to the hierarchical organization of theoretical integrative physiology.

Results: The multidimensional statistical analysis confirms the existence of structural and dynamical primitives of human systems integration and VE design, for assisting gestures the *a priori* main classes of VE organizational elements. Their organizational and functional properties, the way to couple real and artificial sensorimotor functions, have a significant influence on the human in-the-loop system behavior. By enhancing and interacting with the sensorimotor loops, they are able to modify (disturbing or improving) the motor control, the gesture, and as a consequence, the global quality of human behavior. According to these experimental results, the interactions generated by the artefacts may be identified as functional interactions.

5. Discussion

Having made the choice of the theoretical framework MTIP, and taking into consideration the constraints related to any model of HIS, experimental results in a virtual environment have confirmed our hypothesis of the existence of functional

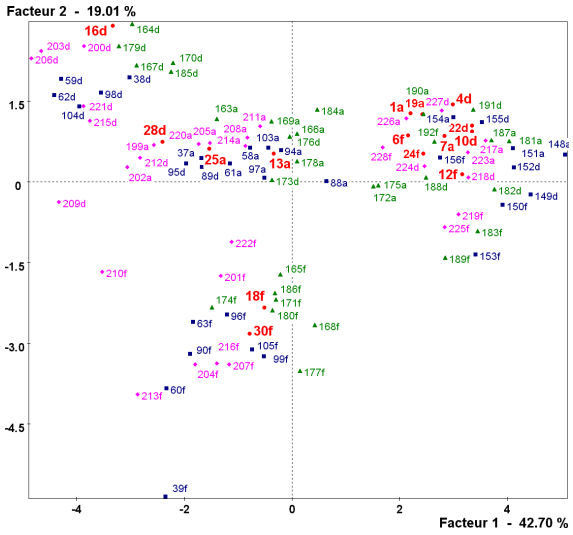


Fig. 6. Principal component analysis, F1-F2 factorial plans: outcome analysis of the virtual environment elements organization is done by observing statistical individuals position on the F1-F2 plan (representing 67.71% of the total inertia).

Axis 1 (42.70%) shows two sets of experimental status. The first set contains control status head free, touched ellipse, opened or closed eyes, visual guidance, and the virtual reality assisted gesture with visual feedback, ball or hand, and referential frames of action: plane of movement or ellipse model. The second set contains individuals without the ellipse model, head free, opened or closed eyes and memorized, HMD off, no gesture feedback and no allocentric or egocentric referential frames. These positions of individuals on the axis 1 reveal the importance of visuo-haptic interactions for gesture in real or virtual environment. Inside that set, there are differences between real touched ellipses situations and "virtually touched". The visuo-haptic class contains two sub-classes (visuo-tactile and visuo-proprioceptive).

Axis 2 (19.01%) shows difference functions of the orientation plane of movement. The distortion of the gesture spatial orientation is greater without visuo-haptique inputs, even with spatial frames of reference and models of action (ellipse model and plan of movement). These positions of individuals on the axis 2 reveal the importance of the gesture spatial orientation. Without visuo-haptique elements, situation of sagittal plane drawing ellipses are nearest to the gravity center of the factorial plane. Frontal and horizontal orientations influence motor behavior with contrary effect. The gesture distortion is greater in the horizontal plane. It also shows significant influence of HMD configurations and of gesture feedback representation. There are functional semiotic differences between ball and virtual hand with enhanced functional differences in absence of visuo-haptic elements. There are four noticeable statuses: 88A, 172a and 175a, without gesture feedback, induce similar behavior to situations with visuo-haptic interactions; 39f, drawing ellipses in the horizontal plane wearing HMD off immersive I-Glasses, induce the greatest distortion in motor control.

R.	Ind.	Id.	R.	Ind.	Id.	R.	Ind.	Id.	R.	Ind.	Id.
1	0.01	**1a**	27	0.08	**188d**	53	0.09	**178a**	80	1.46	**39f**
2	0.01	**190a**	28	0.33	**224d**	55	0.09	**205a**	81	0.65	**210f**
3	0.11	**19a**	29	0.1	**182d**	56	0.34	**199a**	82	0.35	**213f**
4	0.05	**226a**	30	0.04	**218d**	57	0.06	**37a**	83	0.2	**174f**
5	0.04	**7a**	31	0.05	**219f**	58	0.03	**61a**	84	0.12	**90f**
6	0.25	**154a**	32	0.04	**150f**	59	0.13	**25a**	85	0.08	**63f**
7	0.03	**6f**	33	0.37	**182f**	60	0.04	**103a**	86	16.72	**60f**
8	0.1	**228f**	34	0.13	**225f**	61	0.61	**58a**	87	0.05	**179d**
9	0.01	**192f**	35	0.06	**189f**	62	0.3	**220a**	88	0.16	**200d**
10	0.02	**24f**	36	34.1	**153f**	63	12.83	**202a**	89	0.1	**185d**
11	0.38	**156f**	37	0.1	**88a**	64	0.17	**96f**	90	0.05	**170d**
12	0.1	**227d**	38	0.04	**172a**	65	0.62	**177f**	91	0.26	**167d**
13	0.05	**10d**	39	1.34	**175a**	66	0.11	**207f**	92	0.06	**16d**
14	0.05	**4d**	40	0.02	**211a**	67	0.08	**216f**	93	1.43	**164d**
15	0.01	**191d**	41	2.2	**208a**	68	1.32	**204f**	94	1.15	**209d**
16	0.02	**22d**	42	0.18	**176d**	69	0.38	**222f**	95	0.13	**38d**
17	3.53	**155d**	43	0.33	**94a**	70	0.17	**201f**	96	0.04	**104d**
18	0.07	**12f**	44	0.51	**95d**	71	0.05	**180f**	97	0.02	**59d**
19	0.17	**223a**	45	0.19	**173d**	72	0.09	**171f**	98	0.5	**62d**
20	0.03	**187a**	46	5.56	**89d**	73	0.05	**165f**	99	0.1	**212d**
21	0.1	**151a**	47	0.11	**184a**	74	0.29	**186f**	100	0.31	**28d**
22	0.03	**217a**	48	0.09	**166a**	75	0.08	**168f**	101	0.14	**221d**
23	0.46	**181a**	49	0.05	**169a**	76	0.19	**18f**	102	0.05	**215d**
24	0.05	**152d**	50	0.84	**163a**	77	0.09	**99f**	103	0.79	**98d**
25	0.05	**148a**	51	0.22	**13a**	78	0.03	**30f**	104	0.1	**206d**
26	0.71	**149d**	52	0.15	**97a**	79	2.46	**105f**	105	-----	**203d**

Fig. 7. Hierarchical ascending classification (15.85194, MIN = 0.01%/Max = 34.10%). The dendrogram presents seven classes in coherence with PCA results. It presents specifically in decreasing importance: real or artificial tactilo-kinesthesic interaction (movement feedback); spatial orientation of gesture in all experimental situations; HMD configurations and the gesture feedback representations (ball or hand).

interactions between artificial and physiological systems in an engineered system. They are in favor of the influence of the structural and functional systems design and its role on human systems integration, and, above all, on the expression of the behavior.

The experiment consisted in an incremental protocol of assisted drawing of ellipses in the 3D space. The organization of structural and functional elements in the virtual environment for assisted gesture, and the neurophysiological effects analyzed by gestures were tested. Experimental results are in favor of the existence of basic classes of organizational elements for human in-the-loop system engineering. These results are consistent with those found in literature and show the relative importance of each category. The first class is gesture visual or visuo-haptic feedback [20,15]. The second class is the spatial orientation of the gesture, as demonstrated by Ghafouri [28], and shown to be influenced by gravity [14]. The third class is the HMD design, shape (size, weight, etc) and configuration (immersive or not, field of view, optical quality, etc) [19]. The other classes, reference frame, model of action

and semiotic representation of gesture feedback, have more local influence on the gesture performance. However, if we are able to define classes of organization and to show their main influence on human systems integration, the global approach is insufficient to elicit basic artefactual elements of functional interaction. This determination will be pursued in future research.

We have suggested the existence of a hierarchical and dynamical organization according to the Chauvet's MITP principles, and its influence on human system stability and human performance. Moreover, the stability of the human in-the-loop systems is increased, the property that enhances gesture performance. This is consistent with the Principle of Auto Associative stability (PAAS). A consequence of this approach is the possible classification of artefactual elements according to their physiological function, i.e., in terms of geometrical elements (HMD shape; allocentric frames of reference; ellipse model; plane of movement; and in terms of topological elements (spatial orientation of gesture, HMD configuration (immersive or not), gesture feedback).

By designing a virtual environment, a human in-the-loop system consists in organizing the linkage of multimodal biological structures, sensorimotor elements at the hierarchical level of the living body with the artificial interactive elements of the system, devices and patterns of stimulation. There exists a "transport" of functional interaction in the augmented space of both physiological and artefactual units, and thus a *function* may be viewed as the final result of a set of functional interactions that are hierarchically and functionally organized between the artificial and biological systems. Finally, the "augmented physiological function" may be identified with the global behavior of the hierarchical system in the dynamics of the human-artefactual environment complex [12]. Because of the common framework, two important consequences of this approach may now be developed: (i) a better understanding of integrated physiological functions, even artificially augmented; (ii) the ability of using a common modeling tool (PhysioMatica^{TM} in this issue) for the simulation and evaluation of human systems integration and augmented human design.

6. Conclusion

Using virtual environments, we have experimentally shown that engineered systems are coupled with the human sensorimotor system through functional interactions. As MTIP is built in terms of functional interactions, it was appropriate to place this research in this framework. Theoretical integrative physiology claims to develop experimental techniques to organize and to assess the behavioral coherence of the virtual environment design for augmented human performance. As gesture is a high level integrated sensorimotor and cognitive physiological function, it appears to be a primary expression of this global behavior and a behavioral tool for HSI and augmented human design.

Acknowledgments

We thank Pr G.A. Chauvet for helpful comments on my research. *Supported by CUGN, Région Lorraine, INRIA Lorraine.*

Annexes

Annex 1. Calculated variables.

Index	Variables
A	Number of ellipse
B	Average velocity (cm/s)
C	Covariation Vt/Rt
D	Amplitude (cm)
E	Mean area (cm^2)
F	Global position
G	Position/x axis (cm)
H	Position/y axis (cm)
I	Position/z axis (cm)
J	Global orientation
K	Orientation/sagittal plane (d°)
L	Orientation/frontal plane (d°)
M	Orientation/horizontal plane (d°)
N	Eccentricity
O	Major axis variation
P	Minor axis variation

Annex 2. Training and control experimental status indexation (for values of the index see Figs. 6 and 7).

Control	Situation	Index	Gesture Orientation
Opened Eyes	Touched ellipse	1a	VS
		4d	TF
		6f	TH
	Visual guidance	7a	VS
		10d	TF
		12f	TH
	Memorized	13a	VS
		16d	TF
		18f	TH
Closed Eyes	Touched ellipse	19a	VS
		22d	TF
		24f	TH
	Memorized	25a	SV
		28d	FT
		30f	HT

Annex 3. Assisted graphical gesture experimental status (for values of the index see Figs. 6 and 7).

Virtual Environment		Index			
	Visual Environment	I/O Immers	I/O N Immers	Proview 60	Gesture Orientation
HMD off	no	37a	163a	199a	VS
	no	38d	164d	200d	TF
	no	39f	165f	201f	TH
No gesture feedback	Allocentric frames	58a	166a	202a	VS
	‖	59d	167d	203d	TF
	‖	60f	168f	204f	TH
	Egocentric frame	61a	169a	205a	VS
	‖	62d	170d	206d	TF
	‖	63f	171f	207f	TH
	Ellipse + Allo frames	88a	172a	208a	VS
	‖	89d	173d	209d	TF
	‖	90f	174f	210f	TH
	Ellipse + Allo + Ego	94a	175a	211a	VS
	‖	95d	176d	212d	TF
	‖	96f	177f	213f	TH
Gesture feedback					
Ball	Simple	97a	178a	214a	VS
	‖	98d	179d	215d	TF
	‖	99f	180f	216f	TH
	Ellipse + all references	148a	181a	217a	VS
	‖	149d	182d	218d	TF
	‖	150f	183f	219f	TH
Hand	Simple	103a	184a	220a	VS
	‖	104d	185d	221d	TF
	‖	105f	186f	222f	TH
	Ellipse + all references	151a	187a	223a	VS
	‖	152d	188d	224d	TF
	‖	153f	189f	225f	TH
	‖				
Vision and touch	Ellipse and hand	154a	190a	226a	VS
	‖	155d	191d	227d	TF
	‖	156f	192f	228f	TH

References

[1] Booher HR (ed.), *Handbook of Human Systems Integration*, Wiley, Hoboken, 2003.
[2]
[3] Kelso JA, Fink PW, DeLaplain CR, Carson RG, Haptic information stabilizes and destabilizes coordination dynamics, *Proc Biol Sci* **268**(1472):1207–1213, 2001.
[4] Soechting J, Flander M, Moving in the three dimensional space: Fames of reference, vectors and coordinates systems, *Ann Rev Neurosci* **15**:167–191, 1992.

[5] Chauvet GA, Hierarchical functional organization of formal biological systems: A dynamical approach. I. An increase of complexity by self-association increases the domain of stability of a biological system, *Philos T Roy Soc B* **339**:425–444, 1993a.

[6] Chauvet GA, Hierarchical functional organization of formal biological systems: A dynamical approach. II. The concept of non-symmetry leads to a criterion of evolution deduced from an optimum principle of the (O-FBS) sub-system, *Philos T Roy Soc B* **339**:445–461, 1993a.

[7] Chauvet GA, Hierarchical functional organization of formal biological systems: A dynamical approach. III. The concept of non-locality leads to a field theory describing the dynamics at each level of organization of the (D-FBS) sub-system, *Philos T Roy Soc B* **339**:463–481, 1993c.

[8] Chauvet GA, Theoretical systems in biology: Hierarchical and functional integration, Vol. III, *Organisation and Regulation*. Oxford, Pergamon, 1996.

[9] Chauvet GA, On the mathematical integration of the nervous tissue based on the S-Propagator formalism: I. Theory, *J Integr Neurosci* **1**(1):31–68, 2002.

[10] Chauvet GA, The use of representation and formalism in a theoretical approach to integrative neuroscience, *J Integr Neurosci* **4**(3):291–312, 2005.

[11] Fass D, Base de connaisances multimodales et esthétique de la connaisance, aide à l'action et réalité virutelle: Théorie et experiences, PhD thesis, Université Henri Poincaré, Nancy1, 2002.

[12] Fass D, Éléments d'organisation du complexe Individu — Environnement artefactuel: Évaluation d'un système de réalité virtuelle d'aide à l'action. *RIHM — Revue d'Interface Homme-Machine* **3**(2):75–94, 2002b.

[13] Fass D, Graphical gesture analysis: Behavioral tool for virtual environment design, Measuring behavior 2005, *5th International Conference on Methods and Techniques in Behavioral Research*, 30 August to 2 September 2005, Noldus Information Technology, Wageningen, The Netherlands, pp. 233–236, 2005a.

[14] Fass D, Virtual environment a behavioral and countermeasure tool for assisted gesture in weightlessness: Experiments during parabolic flight, of the 9th European Symposium on Life Sciences Research in Space and the 26th Annual International Gravitational Physiology Meeting, Cologne, *Joint Life Conference "Life in Space for Life on Earth"*, Cologne, Germany, 26 June–1 July, pp. 173, 2005b.

[15] Hatwell Y, Streri A, Gentaz E, Toucher pour connaître: Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle, PUF, Paris, 2000.

[16] Hooey BH, Foyle DC, Andre AD, A human-centred methodology for the design, evaluation, and integration of cockpit displays, NATO RTO SCI and SET Symposium on Enhanced and Synthetic Vision Systems, September, 10–12, Ottawa, Canada, 2002.

[17] Malnoy F, Fass D, Lestienne F, Vection and postural activity: Application to virtual environment design, *La lettre de l'IA* **134–136**:121–124, 1998.

[18] Nasa Human Systems Integration Division, http://humanfactors.arc.nasa.gov/index.php, 2006.

[19] Nichols S, Physical ergonomics of virtual environnement use, *Appl Ergon* **30**:79–90, 1999.

[20] Poupyrev I, Wesghorst S, Billinghurst M, Ichikawa T, Egocentric object manipulation in virtual environments: Empirical evaluation of interaction techniques, *EUROGRAPHICS'* **17**:3, 1998.

[21] Stanney K, Realizing the full potential of virtual reality: Human factors issues that could stand in the way, in *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pp. 28–34, Research triangle park, North Carolina, March 11–15 1995. IEEE Computer Society Press.

[22] Sporns O, Edelman G, Bernstein's dynamic view of the brain: The current problems of modern neurophysiology, *Motor Control* **2**:283–305, 1998.

[23] Barfield W, Furness TA, *Virtual Environments and Advanced Interface Design*, Oxford University Press, New York and Oxford, 1995.

[24] Wilson JR, Virtual environments applications and applied ergonomics, *Appl Ergon* **30**:3–9, 1999.

[25] Boy G, *Cognitive Function Analysis*, Ablex Publishing Corporation, Stanford, 1998.

[26] Gurfinkel VS, Lestienne F, Levik YUS, Popov KE, Lefort, L, Egocentric references and human spatial orientation in microgravity: II body-centred coordinates in the task of drawing ellipses with prescribed orientation, *Exp Brain Res* **95**:343–348, 1993.

[27] Ghafouri M, Lestienne F, Drawing in space: Orientation and figural aspect of movement, *Fourth International Symposium on 3-D Analysis of Human Movement*, Granoble, France, July, 1996.

[28] Ghafouri M, Représentation sensori-motrices du geste graphique dans l'espace tridimensionnel, PhD thesis, Université Henri Poincaré, Nancy, 1997.

[29] Khun TS, *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, 1962.

IEEE SysCon 2009 —3rd Annual IEEE International Systems Conference, 2009
Vancouver, Canada, March 23–26, 2009

Rationale for human modelling in human in the loop systems design

Didier FASS
LORIA INRIA UMR7503
ICN Business School
Nancy, FRANCE
didier.fass@loria.fr

Romain LIEBER
Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN)
University of Nancy, CNRS UMR 7039
Nancy, FRANCE
romain.lieber@cran.uhp-nancy.fr

Airbus France
Engineering
Toulouse, FRANCE
romain.lieber@airbus.com

***Abstract*—Human modelling in human-in-the-loop systems (HITLS) design can be a complex and dynamic endeavour. Thereby it needs a theoretical framework for grounding methods and models on verified principals and an integrative approach that takes into consideration the specificity of biological organization of living systems, according to the principles of physics, and a coherent way to organize and integrate structural and functional artificial elements. This paper focuses on the rationale of human modelling for HITLS design, in the context of a conceptual framework based on Chauvet's mathematical theory of integrative physiology (MTIP).**

Keywords- Modelling, Design, System of systems, Human-in-the-loop systems; Human System integration; Mathematical theory of integrative physiology.

I. INTRODUCTION

Human-in-the-loop systems (HITLS) [1] are a special kind of systems of systems (SoS). They are composed of two main categories of systems. These two kinds of systems differ from their nature: their fundamental organization, complexity and behavior. The first category, the traditional one, includes *technical* or *artifactual* systems that could be engineered. The second category includes *biological* systems: the human that could not be engineered. Thus, integrating human and complex technical systems in design [2] is to couple and integrate in a behaviourally coherent way, a biological system (the human) with a technical and artifactual system. HITLS engineering needs to model human body and its behavior to test and validate human reliability and human systems integration (HSI) by simulation using virtual environments, especially for safety critical systems.

Designers need reliable methods and models that can help them to test and modify HITLS architecture. Those methods and models are mainly numerical and intend to be predictive. The major benefit is to avoid late changes into the design life cycle that have cost and time impacts [3]. Thus, they need to take into account, at the earlier stage of the design, factors that influence system reliability, and develop the rationale of the modelling. Human is one of the major factors that influence this reliability [4]. As a biological system, we need to tackle human complexity and organization into the modelling, in order to certify a level of confidence. Current human modelling, due to a lack of theory, cannot provide designers with confident indicators. Such human modelling needs both a new epistemological approach (integrative) that takes into account the specificity of the biological organization of living systems and practical principles to organize and integrate structural and functional artificial elements of different nature. This paper focuses on the rationale of human modelling for HITLS design, in the context of a conceptual framework based on mathematical theory of integrative physiology.

II. VIRTUAL HUMAN MODELLING

Human modelling is mainly used for situations in which human acts with other humans and/or artifacts; in ergonomic activities: man-machine integration design and analysis (model of human activity in problem solving situation, adequacy of the task and human characteristics), in multi-agent simulations, and recently in systems engineering process.

Recent projects develop human model in the guise of virtual human model called digital or numerical manikin. Those projects mainly involve automotive, military, and medical industries. The aim is to develop either semi-autonomous or embodied digital manikin (virtual human model).

9781-4244-3463-3/09/$25.00 ©2009 IEEE

Current approaches found their modelling and simulation on anthropometrical and biomechanical data [5] for static (or aesthetic aspect) and dynamic modelling (motions capture and analysis); optimization algorithm [6] or motion database, for gesture and motion prediction; symbolic and computational approach, to model human cognition as a queuing network of information processing servers [7].

Furthermore, virtual human cognitive modelling integrates theories and methods of mathematical psychology, computational cognitive modelling and experimental psychology.

We propose to base human modelling and HSI for HITLS design on a scientific and theoretical framework: mathematical theory of integrative physiology (MTIP). Within this paradigm, human modelling involves taking into account human fundamental characteristics, such as anatomy (structure, dimensions, masses), and physiology (function, motion, gesture). It is to integrate into the same model data and knowledge of different nature and several domains.

III. MATHEMATICAL THEORY OF INTEGRATIVE PHYSIOLOGY

The mathematical theory of integrative physiology, developed by Gilbert Chauvet [8] [9] [10], examines the hierarchical organization of structures (i.e., anatomy) and functions (i.e., physiology) of a living system as well as its behavior. MTIP introduces the principles of a functional hierarchy based on structural organization within space scales, functional organization within time scales and structural units that are the anatomical elements in the physical space. This abstract description of a biological system is represented on *figure* 1. It copes with the problem of structural discontinuity by introducing functional interaction ψ from structure-source s into structure-sink S, as a coupling between the physiological functions supported by these structures.

Unlike interactions in physics, at each level of organization functional interactions are non-symmetrical, leading to directed graph, non local, leading to non local fields, and increase the functional stability of a living system by coupling two hierarchical structural elements. As said G. Chauvet : "we have chosen a possible representation related to hierarchical structural constraints, and which involves specific biological concepts. We also made the important hypothesis that a biological system may be mathematically represented as a set of functional interactions of the type: $\overset{\psi}{s \to S}$. However, the main issue now is to determine whether there exists a cause to the existence of functional interactions, i.e. to the set of triplets $\overset{\psi}{s \to S}$? What is the origin of the existence (the identification) of s, S and ψ that together make a component $\overset{\psi}{s \to S}$ of the system? The answer to this issue is the existence of a mathematical principle, the stabilizing auto-association principle or PAAS, a principle that makes of a framework, the MTIP, a veritable theory. *The PAAS may be enounced as follows*: For any triplet ($s\,\psi S$), denoted as $\overset{\psi}{s \to S}$, where s is the system-source, S the system-sink, and ψ the functional interaction, the area of stability of the system $\overset{\psi}{s \to S}$ is larger than the areas of stability of s and S considered separately. In other words, the increase in complexity of the system $\overset{\psi}{s \to S}$ corresponds to an increase in stability. MTIP consists in a representation (set of non-local interactions $\overset{\psi}{s \to S}$), an organizing principle (the PAAS), and a hypothesis (any biological system may be described as a set of functional interactions) that gives rise to two faces of the biological system, the (O-FBS) and the (D-FBS). The first one may be studied using the potential of organization, the second one using the S-Propagator formalism, that describes the dynamics in the structural organization, making an n-level field theory. Both are based on geometrical/topological parameters, and coupled via geometry/topology that may vary with time and space (state variables of the system) during development and adult phases. The structures are defined by the space scale κ; hence the structural hierarchy, the functions are defined by the time scale T, hence the functional hierarchy. Any model built in this theoretical framework will use the same representation, the same basic principle and hypothesis, and consequently will be comparable and able to be coupled with any other on" [10].

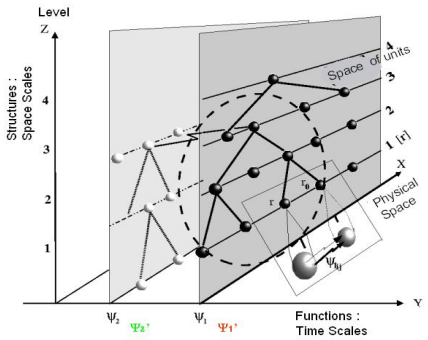


Figure 1: *Ω - 3D representation of a biological system based on the Chauvet's MTIP [11]*

What we propose in this paper is to couple the biological system with an engineered system. This is a new theoretical paradigm for knowledge-based systems and augmented human design: "For the biological system, the PAAS represents a principle of organization in which it is difficult to doubt. Although the true challenge is to mathematically identify these functional interactions, practically, the theoretical framework using *observed*

functional interactions allows rigorous integration of coupled processes, and thus useful to provide explanations for many phenomena." [10].

Thus MTIP will be applied on different space-time levels of the body -the physiological system- and the engineered system. It defines a theoretical framework of integrative physiological design for human systems integration, for augmented human and thus for modelling human-in-the-loop systems design.

The human (Ω) [figure 1] is represented as the combination of the hierarchical structural (z) and functional (y) organizations. The (x) axis corresponds to the ordinary physical space. Each physiological function ψ is represented in the xψy plane by a set of structural units hierarchically organised according to space scales. Two organizational levels are shown: ψ_1 and ψ_2. The different time scales are on the (y) axis, while space scales, which characterize the structure of the system, are on the (z) axis. The role of space and time clearly appears. Ψ_{1ij} is the non-local and non-symmetrical functional interaction.

Units at the upper levels of the physiological system represent the whole or a part of sensorial and motor organs. HSI (Ω') [figure 2] consists in creating an artificially extended sensorimotor loop by coupling two artifactual structural units I' and J' [11].

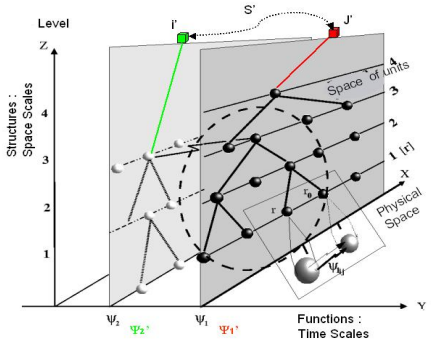


Figure 2*: Ω' - representation of a human in the loop system coupling the biological system with an artifactual system on the left to an artificial sensorimotor loop [11].*

Their integration into the physiological system is achieved by the functional interactions they generate. From sensors outputs to effectors inputs, the synchronized computerized process S' controls and adapts the integration of the functional interactions artificially created into the dynamic of the global and coherent system.

It is a new theoretical paradigm for human systems integration modelling.

IV. RATIONALE FOR HUMAN MODELLING AND HITLS DESIGN

Since technical systems are mathematically thought and based on physical principles, HITLS needs to be thought in mathematical terms. There are several necessities to make HIS reliable.

A. Necessity 1 – Designing a HITLS is to couple an artifactual system to a biological system

Human modelling, as a scientific way to consider human characteristics and his coupling with his environment, needs an epistemological approach that enables to question the representativeness and validity of models and related concepts. Thus, a new conceptual framework that questions the nature of the interaction between human and environment (social or technical) as an integrated biological, anatomical, and physiological process, has to be developed.

If physical and mathematical theories permit to describe the matter, it should be the same concerning living systems - human. It seems necessary that a rational explanation could make us understanding harmonious complexity and effective working of a living organism, and its integration in its living or working environment, toward the considerable mechanisms which constitute it.

Thereof, we suggest general principles, methods and related tools to design HITLS and anticipate their reliability by simulation.

B. Necessity 2 – HITLS design is a global and integrative model based method

Model based system engineering (MBSE) is an important part of systems engineering. It uses computer aided design tools that enable to drive system simulations and validate technical studies or design decisions. MBSE is developed to design technical systems or systems of systems. It is a necessary but not sufficient way for HITLS design.

Contrary to current approaches that are data or goal oriented, human modelling needs a predictive approach. Those modelling process are not integrated, and therefore, not sufficient to model human. Such models should be used to create models of individuals rather than using aggregated summaries of isolated functional or anthropometric variables that are more difficult for designers to use. Human and technical models are developed independently. There are no scientific principles to organize and assess the functional coherence of the HSI for HITLS performance and reliability.

Designing an artefact consists in organizing a coherent relation between structures and functions in a culture and a context of usage [design=structure/function]. Modelling human consists in taking into account anatomical and physiological elements in the same model [human modelling = functions (physiology) / structures (anatomy)].

The underlying question of human modelling in HITLS design is to know how to organize and integrate a hierarchy of structural elements and their functions [12].

C. *Necessity 3 – Modelling human and HSI is to organize hierarchically structures and functions and their functional interactions*

MTIP principles seem to be the best way to deal with HITLS scientific and industrial issues.

By integrating structures and functions of both human and technical elements, integrative physiological organization intends to model the basis of human behavior and its functional interactions with artefacts and environment. The HITLS global function is the response to environment stimulations and the result of an integrated process (perception, decision, action). Each function is dynamically generated by a specific organization of structures and functional interactions. Thus, human modelling in HITLS comes down to design structural architecture and functional interactions. It is to design the coherent and relevant structural and functional organization and parameters that lead to the behavioral expression.

The behavioral modelling intends to model human and the properties of the human system interaction, based on the idea that the global system organization constrains the human behavior and vice versa.

V. CONCLUSION AND PERSPECTIVES

"Integrative theoretical physiology based behavior modelling" seems to be a better way to ensure the reliability of HITLS and manage human modelling than traditional computational and symbolic approach. Fass assessed the pertinence of human systems integration modelling based on the MTIP principles by using virtual environments for gesture assistance in weightlessness and hypergravity experiments [11] [13].

In fact, MTIP introduces a paradigm shift from interface system design to interaction and integration system of systems design. Thereof designing an artefact system consists of making biological individual and artifactual physical system consistent and coherent.

These scientific paradigm and method find a lot of applications for safety critical systems design and engineering, notably for the mitigation of human risks in aeronautic or nuclear power plant monitoring or augmented human design. It's also an interesting area for enhancing and improving human dimension in recent engineering systems interoperability issues.

REFERENCES

[1] Bittner, AC, Jr.. Requirements testing and evaluation: Human-in-the-loop systems. Ergonomics in Design, October 1993, pp29-32.

[2] Booher, H.R. Handbook of Human Systems Integration. Wiley, Hoboken. 2003.

[3] Green, Rush F., and Charland, Julie. Human modeling in the Product Lifecycle Management of the Boeing 787 Dreamliner. SAE International. 2006.

[4] Axelsson, J. Towards an improved understanding of humans as the Components that Implement Systems Engineering. Volvo Car Corporation, Dept. 94100 PV 32. 2002.

[5] Reynolds, Herbert M., and Hubbard, Robert P. Anatomical frames of reference and biomechanics. The Human Factors Society, 22(2), p. 171-176. 1980.

[6] Horn, E.N. Optimization-based dynamic human motion prediction (MS Thesis), Universty of Iowa, College of engineering, 2005.

[7] Liu, Y., Feyen, R., and Tsimhoni, O. "Queueing Network-Model Human Processor (QN-MHP): A computational architecture for multitask performance in human-machine systems," ACM Transactions on Computer-Human Interaction, vol. 13, no. 1, 2006, pp. 37-70.

[8] Chauvet, G. A. Hierarhical functional organization of formal biological systems: a dynamical approach. I. to III. Philosophical Transaction of the Royal Society London B, 339, 1993, 425-481.

[9] Chauvet, G. A. Theoretical systems in biology: hierarchical and functional integration. Volume III. Organisation and Regulation. Oxford, Pergamon,1996.

[10] Chauvet, G. A. A new paradigm for theory in Integrative Biology: the principle of auto-associative Stabilization. Biochemical networks and the Selection of Neuronal Groups. Journal of Integrative Neuroscience, 5, 3, 2006, 381-416.

[11] D. Fass. Rationale for a model of human systems integration: The need of a theoretical framework. Journal of Integrative Neurosciences 5(3), 2006, pp 333-354.

[12] D. Fass. Integrative physiological design: A theoretical and Experimental Approach of Human Systems Integration. Engin. Psychol. And Cog. Ergonomics, HCII 2007, in D.Harris (Ed.) LNAI 4562, 2007, pp. 52-61.

[13] D. Fass, Virtual environment a behavioral and countermeasure tool for assisted gesture in weightlessness : experiments during parabolic flights *Journal of Gravitational Physiology*, Volume 12, Number 1; July 2005, pp. P19-P20, (ref 20060054310, in *Scientific and Technical Aerospace Reports* (*STAR*), NASA, vol 44, 26, p 125.)

12

Augmented Human Engineering: A Theoretical and Experimental Approach to Human Systems Integration

Didier Fass
ICN Business School and MOSEL – LORIA,
Lorraine University, Nancy,
France

1. Introduction

This chapter focuses on one of the main issues for augmented human engineering: integrating the *biological user's needs* in its methodology for designing human-artefact systems integration requirements and specifications. To take into account biological, anatomical and physiological requirements we need a validated theoretical framework. We explain how to ground augmented human engineering on the Chauvet mathematical theory of integrative physiology as a fundamental framework for human system integration and augmented human design. We propose to validate and assess augmented human domain engineering models and prototypes by experimental neurophysiology.

We present a synthesis of our fundamental and applied research on augmented human engineering, human system integration and human *in-the-loop* system design and engineering for enhancing human performance - especially for technical gestures, in safety critical systems operations such as surgery, astronauts' extra-vehicular activities and aeronautics. For fifteen years, our goal was to research and to understand fundamental theoretical and experimental scientific principles grounding human system integration, and to develop and validate rules and methodologies for augmented human engineering and reliability.

2. Concepts

2.1 Human being

A human being, by its biological nature – bearing in mind its socio-cultural dimensions, cannot be reduced to properties of mathematical or physical automaton. Thus, connecting up humans and artefacts is not only a question of technical interaction and interface; it is also a question of integration.

2.2 Human systems integration

As a technical and managerial concept (Haskins 2010), human systems integration (HIS) is an umbrella term for several areas of "human factors" research and systems engineering that include human performance, technology design, and human-interactive systems interaction

(Nasa 2011). Defining a system more broadly than hardware and software refer to human centred design (Ehrhart & Sage 2003). That issue requires thinking human as an element of the system and translating it qualitatively throughout design, development and testing process (Booher, 2003).

These are concerned with the integration of human capabilities and performances, from individual to social level into the design of complex human-machine systems supporting safe, efficient operations; there is also the question of reliability.

Human systems integration involves augmented human design with the objectives of increasing human capabilities and improving human performance[1] (Engelbart 1962) using behavioural technologies at the level of human-machine system and human machine symbiosis (Licklider 1960). By using wearable interactive systems, made up of virtual reality and augmented reality technologies or wearable robotics, many applications offer technical gesture assistance e.g. in aeronautics, human space activities or surgery.

2.3 Technical gesture assistance

Gesture is highly integrated neurocognitive behaviour, based on the dynamical organization of multiple physiological functions (Kelso, 2008)(de Sperati, 1997). Assisting gestures and enhancing human skill and performances requires coupling sensorimotor functions and organs with technical systems through artificially generated multimodal interactions. Thus, augmented human design has to integrate human factors - anatomy, neurophysiology, behaviour - and assistive cognitive and interactive technologies in a safe and coherent way for extending and enhancing the ecological domain of life and behaviour.

The goal of this type of human *in-the-loop* system design is to create entities that can achieve goals and actions (predetermined) beyond natural human behavioural, physical and intellectual abilities and skills – force, perception, action, awareness, decision…

2.4 Integrative design

Augmenting cognition and sensorimotor loops with automation and interactive artefacts enhances human capabilities and performance. It is extending both the anatomy of the body and the physiology of human behaviour. Designing augmented human beings by using virtual environment technologies requires integrating both artificial and structural elements and their structural interactions with the anatomy, and artificial multimodal functional interactions with the physiological functions (Fass, 2006). That needs a fitting organizational design (Nissen & Burton 2010).

Therefore, the scientific and pragmatic questions are: how to best couple and integrate in a coherent way, a biological system with physical and artifactual systems? How to integrate in a coherent way human and interactive artefact –more or less immersive and invasive, in a behaviourally coherent way by design? How augmented human engineering can anticipate and validate a technical and organizational design and its dynamics? How modelling and assessing such a design efficiency? How grounding HIS and augmenting human design on a validated theory? How assessing experimentally and measuring both performance and efficiency?

[1] Sensorimotor and cognitive

3. Augmented human domain engineering

Human-artefact systems are a special kind of *systems of systems*. They are made up of two main categories of systems. These two kinds of systems differ in their nature: their fundamental organization, complexity and behaviour. The first category, the traditional one, includes *technical* or *artifactual* systems that could be engineered. The second category includes *biological* systems: the human that could not be engineered. Thus, integrating human and complex technical systems in design is to couple and integrate in a behaviourally coherent way, a biological system (the human) with a technical and artifactual system. Augmented human engineering needs to model the human body and its behaviour to test and validate augmented human reliability and human systems integration (HSI).

3.1 Domain engineering

According to system engineering, taking into account user needs in the world of activities and tasks, designing system requirements is to find the system design, its three dimensional organizational dimensions of requirements - structural, geometrical and dynamical - and its three view plans of system design specifications –structure or architecture, behaviour – performance and efficiency, and evolution –adaptation, resilience capability…(Fig.1).

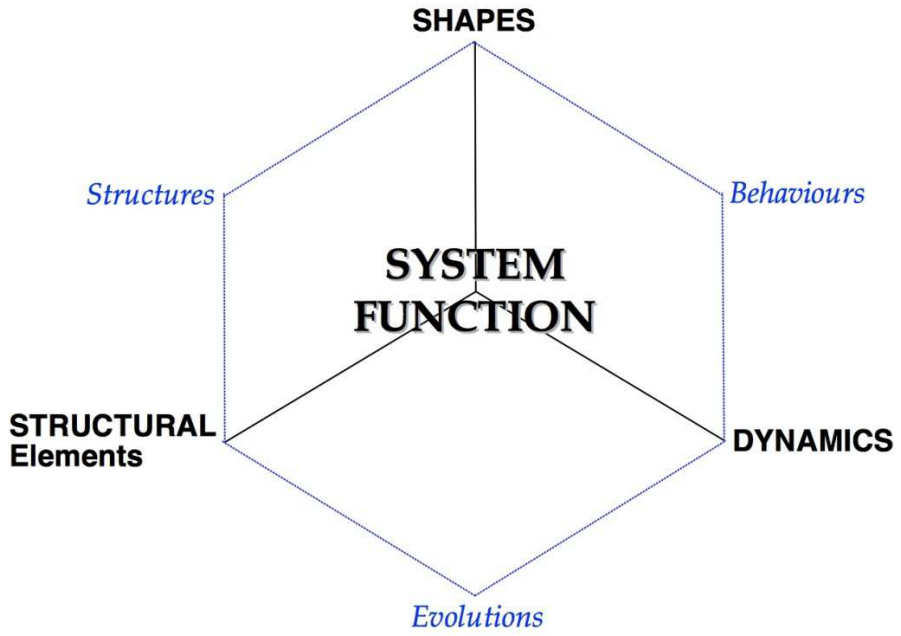


Fig. 1. Our overall system design general conceptual framework: System function results from the integrative organization of different structural elements, shapes and dynamics according there space and time scales relativity and specific qualitative and quantitative measurement units.

Thus, system engineering requires both expert skills and validated formal modelling methodologies. To some extent, the main difficulty is to build a system model from a collection of informal and sometimes imprecise, redundant and unstructured descriptions to the domain of expertise. A formal model could be relevant to highlight a hidden structure according to an intended function and its dynamics, or to apply operations or transformation on the system itself.

From domain engineering to requirements, our approach is situated inside Dines Bjoemer's framework (Bjoemer's 2006a, 2006b and 2009) based on the triptych: D, S -> R, where D is the domain of the problem and where requirements R are satisfied by the relation ->, which intends to mean *entailment*; so, S is a kind of model of our system built or expressed from D. If that triptych is able to express, in a synthetic manner, a situation related to the problem domain, a system model and the requirements, it remains at a global level and can thus be applied in different problem spaces and instances.

The domain provides a way to express properties and facts of the environment of the system under construction. The system model S is intended to summarize actions and properties of the system and it is a link between the requirements and the final resulting system. The relation -> is conceptualized as a deduction-based relation which can be defined in a formal logical system, and which helps to derive requirements from domain and model. This relation is sometimes called entailment and is used to ground the global framework. When one considers an application, one should define the application domain from the analysis and this may integrate elements of the world. The triptych helps for defining a global framework and offers the possibility to use tools that are useful for assessing the consistent relation between D, S and R; because we aim to use proof techniques for ensuring the soundness of the relation.

3.2 Human system integration

The major benefits of using augmented human modelling in design include reducing the need for physical development; reducing design costs by enabling the design team to more rapidly prototype and test a design; avoiding costly design 'fixes' later in the program by considering *human factors* requirements early in the design process; and improving customer communications at every step of product development by using compelling models and simulations. Thus, designing an artefact consists of organizing a coherent relation between structural elements and functions in a culture and context of usage. Modelling human beings consists of taking into account anatomical and physiological elements in the same model. It is to design functions by organizing a hierarchy of structural elements and their functions. Such models should be used to create models of individuals rather than using aggregated summaries of isolated functional or anthropometric variables that are more difficult for designers to use. Therefore augmented human modelling in design requires an integrative approach according to the three necessities we defined for human systems integration (Fass 2007).

3.3 Human system integration domain

Since technical systems are mathematically grounded and based on physical principles, HITLS needs to be considered in mathematical terms. There are several necessities to make HIS and augmented human reliable (Fass & e: Lieber 2009).

- Necessity 1 – Designing a HITLS is to couple two systems from different domains organized and grounded on different principles theory and framework: biological, physical, numerical.
- Necessity 2 – HITLS design is a global and integrative model based method ground on Chauvet's Mathematical Theory of Integrative Physiology and domain system engineering.
- Necessity 3 – Modelling augmented human and HSI is to organize the required hierarchically structural elements, shapes and their interactional dynamics according an architectural principles, behavioural needs of performance and efficiency and evolutionary needs.

Consequently, designing augmented human following human system integration is to organize hierarchically and dynamically human and artefact coupling. This requires a new domain engineering approach for requirements and specification based on biological user's needs and functions.

3.4 Augmented human engineering

Dealing with augmented human engineering is being able to situate and limit its domain for specifying the whole system – biological and artifactual integrated system- in accordance with the high-level and global requirements:

- ***D:*** The ecology of the augmented human: scientific validated principles of augmented human needs and functions***;***
- ***R:*** Augmented human teleonomy, augmented human economy and ethics**;**
- ***S:*** Biological, technical and organizational specifications of the human-artefact system – performance, efficiency, reliability, security, safety, stability**.**

4. Augmented human's needs

Who would even think about separating a living goldfish from its water and its fishbowl?

4.1 Epistemological needs

Converging technologies for improving human performances (Rocco & Brainbridge 2002), *augmented human*, need a *new epistemological and theoretical* approach to the nature of knowledge and cognition considered as an integrated biological, anatomical, and physiological process, based on a hierarchical structural and functional organization (Fass 2007). Current models for human-machine interaction or human-machine integration are based on symbolic or computational cognitive sciences and related disciplines. Even though they use experimental and clinical data, they are yet based on logical, linguistic and computational interpretative conceptual frameworks of human nature, where postulate or axiomatic replace predictive theory. It is essential for the robust modelling and the design of future rules of engineering for HIS, to enhance human capabilities and performance. *Augmented human* design needs an integrative theory that takes into account the specificity of the biological organization of living systems, according to the principles of physics, and a coherent way to organize and integrate structural and functional artificial elements (structural elements and functional interactions). Consequently, virtual environments design for *augmented human* involves a shift from a metaphorical, and scenario based design,

grounded on *metaphysical* models and rules of interaction and cognition, to a predictive science and engineering of interaction and integration. We propose to ground HSI and *augmented human* design on an integrative theory of the human being and its principles.

4.2 Chauvet's mathematical theory of mathematical physiolgy (MTIP) needs

The mathematical theory of integrative physiology, developed by Gilbert Chauvet (Chauvet 1993a; Chauvet 1993b; Chauvet 1993c) examines the hierarchical organization of structures (i.e., anatomy) and functions (i.e., physiology) of a living system as well as its behaviour. MTIP introduces the principles of a functional hierarchy based on structural organization within spaces limits, functional organization within time limits and structural units that are the anatomical elements in the physical space. This abstract description of a biological system is represented in (fig. 2). MTIP copes with the problem of structural discontinuity by introducing functional interaction, for physiological function coupling, and structural interaction Ψ from structure-source s into structure-sink S, as a coupling between the physiological functions supported by these structures.

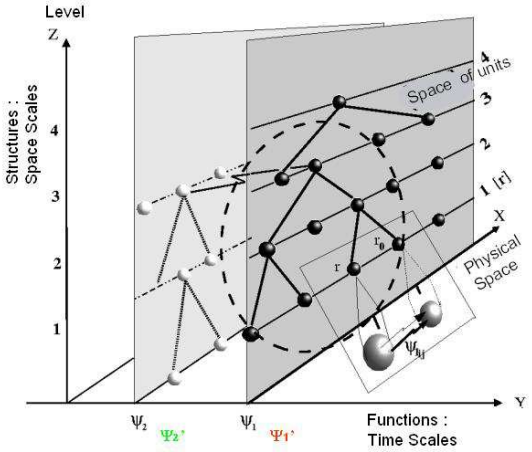


Fig. 2. Ω - 3D representation of a biological system based on the Chauvet's MTIP.

Chauvet had chosen a possible representation related to hierarchical structural constraints, and which involves specific biological concepts. MTIP consists in a representation: set of non-local interactions, an organizing principle: stabilizing auto-association principle (PAAS), and a hypothesis: any biological system may be described as a set of functional interactions that gives rise to two faces of the biological system, the potential of organization (O-FBS) and the dynamics in the structural organization, making an n-level field theory (D-FBS). Both are based on geometrical/topological parameters, and coupled via geometry/topology that may vary with time and space (state variables of the system) during development and adult phases. The structures are defined by the space scale Z, hence the structural hierarchy, the functions are defined by the time scale Y, hence the functional hierarchy.

MTIP shows three relevant concepts for grounding human system integration:

- Functional interaction: The first important hypothesis of the MTIP is that a biological system may be mathematically represented as a set of functional interactions of the type $s \overset{\psi}{\rightarrow} S$. Unlike interactions in physics, who are local and symmetric at each level of organization, biological or functional interactions are non-symmetrical, leading to directed graph, non local, leading to non local fields, and increase the functional stability of a living system by coupling two hierarchical structural elements. However, the main issue now is to determine whether there exists a cause to the existence of functional interactions, i.e. to the set of triplets' $s \overset{\psi}{\rightarrow} S$? What is the origin of the existence (the identification) of s, S and ψ that together make a component $s \overset{\psi}{\rightarrow} S$ of the system?
- PAAS: is a mathematical principle that makes of a framework, the MTIP, a veritable theory. The PAAS may be stated as follows: For any triple (s ψ S), denoted as $s \overset{\psi}{\rightarrow} S$, where s is the system-source, S the system-sink, and ψ the functional interaction, the area of stability of the system $s \overset{\psi}{\rightarrow} S$ is larger than the areas of stability of s and S considered separately. In other words, increasing in complexity the system $s \overset{\psi}{\rightarrow} S$, corresponds to increase in stability.
- Potential of functional organization: describes the ability of the system to combine functional interaction in a coherent way, in such a dynamic state of a maximum of stability and reorganization.

Therefore augmented human engineering needs designing artificial functional interactions – short sensorimotor artificial functions, which generate a maximum of stability for human-artefact systems in operational conditions. Thereby MTIP provide for us an abstract framework for designing human-artefact system and designing organizations for dynamic fit (Nissen & Burton 2011). These are the reasons why MTIP is a relevant candidate theory for grounding augmented human design.

5. Rational for a model of *augmented human*

As claims by Fass (Fass2006), since artifactual systems are mathematically founded and based on physical principles, HSI needs to be thought of in mathematical terms. In addition, there are several main requirements categories to make HIS and augmented human design safe and efficient. They address the technology - virtual environment-, sensorimotor integration and coherency.

Requirement 1: Virtual environment is an artifactual knowledge based environment

As an environment, which is partially or totally based on computer-generated sensory inputs, a virtual environment is an artificial multimodal knowledge-based environment. Virtual reality and augmented reality, which are the most well known technologies of virtual environments, are obviously the tools for the augmented human design and the development of human in-the-loop systems. Knowledge is gathered from interactions and dynamics of the individual-environment complex. It is an evolutionary, adaptive and integrative physiological process, which is fundamentally linked to the physiological functions with respect to emotions, memory, perception and action. Thus, designing an artifactual or a virtual environment, a sensorimotor knowledge based environment, consists

of making biological individual and artifactual physical system consistent. This requires a neurophysiological approach, both for knowledge modelling and human in-the-loop design.

Requirement 2: Sensorimotor integration and motor control ground behaviour and skills

Humans use multimodal sensorimotor stimuli and synergies for interacting with their environment, either natural or artificial (vision, vestibular stimulus, proprioception, hearing, touch, taste…) (Sporn & Edelman 1998). When an individual is in a situation of immersive interaction, wearing head-mounted display and looking at a three-dimensional computer-generated environment, his or her sensorial system is submitted to an unusual pattern of stimuli. This dynamical pattern may largely influence the balance, the posture control (Malnoy & al. 1998), the spatial cognition and the spatial motor control of the individual. Moreover, the coherence between artificial stimulation and natural perceptual input is essential for the perception of the space and the action within. Only when artificial interaction affords physiological processes is coherence achieved.

Requirement 3: Coherence and HIS insure the human-artefact system performance, efficiency and domain of stability

If this coherence is absent, perceptual and motor disturbances appear, as well as illusions, vection or vagal reflex. These illusions are solutions built by the brain in response to the inconsistency between outer sensorial stimuli and physiological processes. Therefore, the cognitive and sensorimotor abilities of the person may be disturbed if the design of the artificial environment does not take into account the constraints imposed by human sensory and motor integrative physiology. The complexity of physiological phenomena arises from the fact that, unlike ordinary physiological systems, the functioning of a biological system depends on the coordinated action of each of the constitutive elements (Chauvet 2002). This is why the designing of a artificial environment as an augmented biotic system, calls for an integrative approach.

Integrative design strictly assumes that each function is a part of a continuum of integrated hierarchical levels of structural organization and functional organization as described above within MTIP. Thus, the geometrical organization of the virtual environment structure, the physical structure of interfaces and the generated patterns of artificial stimulations, condition the dynamics of hierarchical and functional integration. Functional interactions, which are products or signals emanating from a structural unit acting at a distance on another structural unit, are the fundamental elements of this dynamic.

As a consequence, the proposed model inside Chauvet's MTIP assumes the existence of functional interactions between the artificial and the physiological sensorimotor systems. This hypothesis has been tested through experiments described in the following section. This model in the framework of MTIP is formally described in figure 3, that is the 3D representation of the integrated augmented human design. The human (Ω) (fig.2.) is represented as the combination of the hierarchical structural (z) and functional (Y) organizations. X-Axis corresponds to the ordinary physical or Cartesian space. Each physiological function ψ is represented in the $x\psi y$ plane by a set of structural units hierarchically organized according space scales. Two organizational levels are shown: ψ_1 and ψ_2. The different time scales are on the y-axis, while space scales, which characterize the structure of the system, are on the z-axis. The role of space and time clearly appears. Ψ_{1ij} is the non-local and non-symmetric functional interaction.

Units at the upper levels of the physiological system represent the whole or a part of sensorial and motor organs. Augmented human (Ω') (fig.3.) design consists of creating an artificially extended sensorimotor loop by coupling two artifactual structural units *I'* and *J'*. Their integration into the physiological system is achieved by the functional interactions (i.e. sensorimotor) they generate. From sensors' outputs to effectors' inputs, the synchronized designed artificial system or process *S'* controls and adapts the integration of the functional interactions artificially created into the dynamics of the global and coherent system.

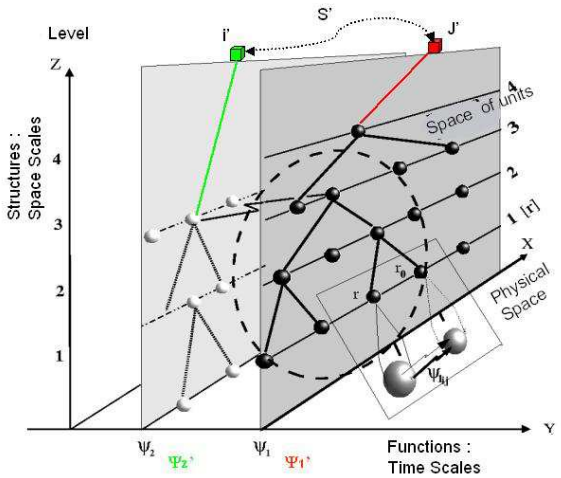


Fig. 3. Ω' – a representation of *augmented human*: artifactual loop coupling the biological system with an artifactual system to an artificial sensorimotor loop (Fass 2007).

This is our theoretical paradigm for augmented human modelling.

According MTIP we highlight three grounding principles for augmented human engineering and human-artefact system design[2]:

- Principle 1: functional interaction is an affordance, a sensorimotor and emotional coupling function depending on geometrical structure of the artifactual design, its architecture;
- Principal 2: the hierarchical structural and functional organization of the human-artefact system must allow behavioural performance and effectiveness inside the boundaries of an operation domain of stability.
- Principle 3: the degree of organization of a human-artefact design, its degree of functional complexity, must be compliant with the evolution of the human-artefact system situated in its operational environment, context, and domain of stability (safety, security and reliability).

[2] These theoretical principles of human system integration are consistent with the ten organizational HSI principles define by Harold Booher (Booher 2003) or the three HSI design principles defined by Hobbs et al. (Hobbs et al. 2008).

6. Experiments

The goals of this research are to search for the technical and sensorimotor primitives of augmented human design for gesture assistance by a wearable virtual environment, using virtual reality and augmented reality technologies, for human space activities, aeronautical maintenance and surgery. We have chosen as behavioural assessment adapts to a virtual environment, a neurophysiological method used in motor control researches to study the role of the body in human spatial orientation (Gurfinkel et al. 1993), and the representation of the peri-personnal space in humans (Ghafouri & Lestienne 2006).

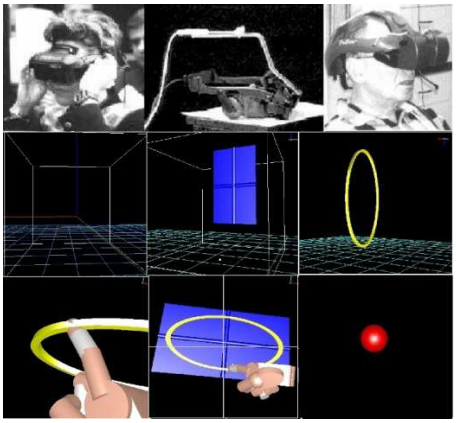


Fig. 4. Examples of different structural and functional primitives for virtual environment design.

6.1 Paradigm

The following method was developed for expert system engineering (knowledge based system) and to explore the knowledge nature as a behavioural property of coupling generated in the dynamics of the individual-environment interaction, either natural or artificial. We use gestures as a sensorimotor maieutic.

The gesture based method for virtual environment design and human system integration assessment is a behavioural tool inspired by Chauvet's theoretical framework, i.e.:

i. an integrated marker for the dynamical approach of augmented human design, and the search for interaction primitives and validation of organization principles; and
ii. an integrated marker for a dynamical organization of virtual environment integrative design.

By designing a artificial environment, a human *in-the-loop* system consists of organizing the linkage of multimodal biological structures, sensorimotor elements at the hierarchical level of the living body, with the artificial interactive elements of the system, devices and patterns of stimulation. There exists a "transport" of functional interaction in the augmented space of both physiological and artifactual units, and thus a *function* may be viewed as the final result of a set of functional interactions that are hierarchically and functionally organized between the artificial and biological systems.

6.2 Material and method

To find the main classes of virtual environments and highlight the dynamical principles of hierarchical organization of human systems integration and virtual environment design for assisting gesture, we set up a protocol according to a complex and incremental design (fig.4.). The experiments were performed in laboratory and a prototype was tested during a French National Space Centre (CNES) parabolic flight campaign.

Devices: Head mounted display I-Glasses® immersive or see-trough, Frastrack Pohlemus® electromagnetic motion tracking system, workstation with a specific software design for managing and generating the visual virtual environment in real-time.

Protocol: Our protocol is based on graphical gesture analysis, more specifically of the drawing of ellipses within 3D-spaces. It's inspired by neurophysiology of movement [20]. By selecting this experimental paradigm, the movement was considered as the expression of a cognitive process *per se*: the integrated expression of the sensorimotor three-dimensional space.

In laboratory, ellipses drawn without virtual environment are the control experiment. It consists of two main situations: open and closed eyes, touch or guided by a real wooden ellipse, and memorized without a model. To highlight the dynamical principles of organization for assisting gestures, we set up a protocol according to a complex and incremental VE design, allowing intuitive learning of both task and use of virtual environment. Ten volunteers (7 men and 3 women, 25 to 35 years old) were asked to performed graphical gestures (drawing of ellipses: eccentricity 0.87 – major axis 40cm and minor axis 20cm) in the three anatomical planes of reference for each step of incremental design (Fig. 5).

The first step of the protocol consisted of drawing ellipses wearing a turned off HMD to study the influence of HMD design and intrusiveness on sensorimotor integration and motor control. The last step of the virtual reality artefact combined allocentric and egocentric prototypic structural elements of artificial visual space, model of ellipses and their planes of movement, and a visual feedback of movement.

Parabolic Flights – hypergravity and weightlessness: to test our prototype (Fig. 6, 7 and 8), three right-handed trained volunteers were asked to draw ellipses (major axis 30 cm and minor axis 15cm) in two orientations of the three anatomical reference planes: vertical sagittal (VS) and transversal horizontal (TH). These drawing of ellipses were performed continuously and recorded during both the 1.8g ascents and the 0g parabola itself, feet in foot-strap (F) or in free-floating (FF), in two main situations: free gesture and assisted gesture wearing a visual virtual environment. Visual virtual environment was generated in immersion (RV) or in augmented reality (RA).

Data analysis: sixteen gesture-related variables are calculated from data produced during the parabola and recorded from the sensor worn on the tip of the index finger of the working hand: kinematics (Number of ellipses), Average velocity, Covariation Vt/Rt, Amplitude), position (Global position, Position / x axis, Position / y axis, Position / z axis), orientation (Global orientation, Orientation / sagittal plane, Orientation / frontal plane, Orientation / horizontal plane) and shape (Mean area, Eccentricity, Major axis variation, Minor axis variation) – indexes in Annex 1.

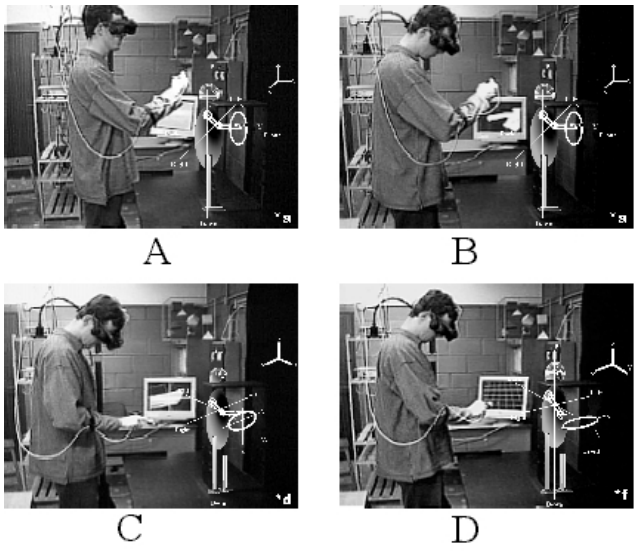


Fig. 5. Graphical gesture of ellipse drawing in the 3D space is performed and analysed in different configurations, more or less complex, of immersive virtual environment assisted drawing ellipses: A- SV ellipses and neutral and coloured background, B- SV ellipses and anthropomorphic visual feedback of movement (artificial hand), C- TF and model of ellipse insert in its plan of movement without visual feedback of movement, D- TH ellipses and abstract representation visual feedback of movement (ball).

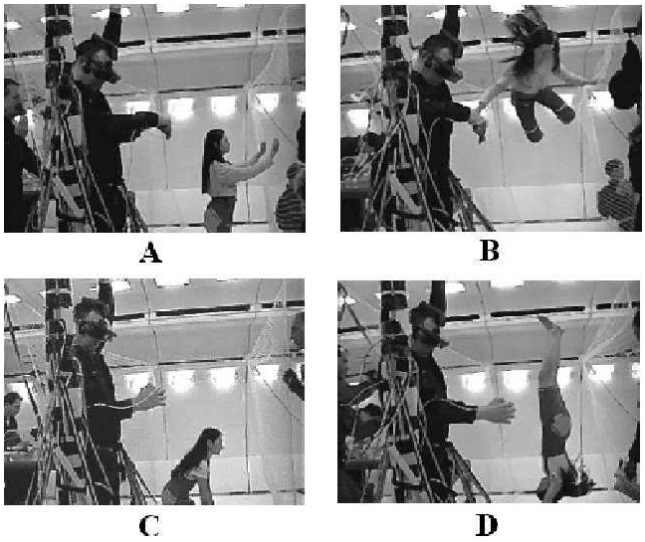


Fig. 6. Drawing of SV (A,B) and HT (C, B) ellipses with gesture assistance in hypergravity (1,8g – A, C) and microgravity (0g – B,D)

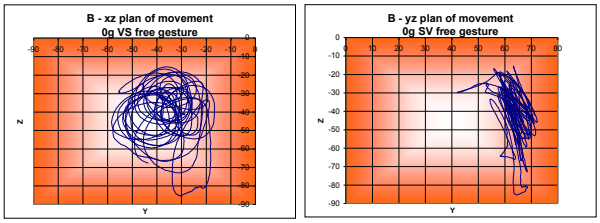


Fig. 7. Weightlessness (0g), example of ellipse drawing in vertical sagital orientation without assistance. We observe a total lost of shape and orientation accuracy.

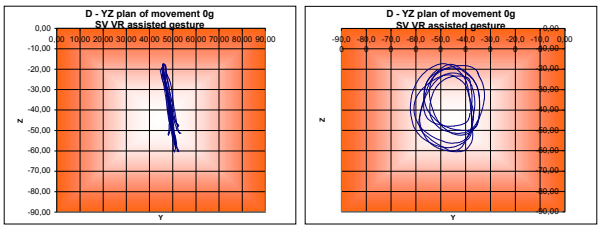


Fig. 8. Weightlessness (0g), example of ellipse drawing in vertical sagital orientation with assistance in vertical sagittal orientation. Even if the shape is not precise, orientation of movement is very accurate and stable (tacking into account the magnetic field distorsion) despite that loss of the gravitational referential and vestibular perturbations. Artificial visuomotor functional interaction coupling by virtual environment enhance stability according the Chauvet's MTIP theory and its principles of auto-associative stabilization.

Statistical analysis: We use a method of multidimensional statistical analysis. Principal component analysis and hierarchical classification are calculated with SPAD 4.0® to show the differential effects of hypergravity and microgravity on graphical gestures for each subject wearing or not the system. A second goal of this exploratory statistics is to assess the design of our prototype and the dynamics of the human virtual environment integration in weightlessness and on earth.

*Results***:** The variable correlation circle (Fig. 9.) shows the first principal (F1) component is correlated in a negative manner with the position, kinematics and shape variables; especially with the global position F, the average velocity B and the mean area E. The second principal component (F2) is correlated in a negative manner with the variables of orientation M, J and K. Whereas K orientation variation in relation to the sagittal plane is fairly correlated with F1. Thereof, the more the average person is placed downward and on the left on the F1-F2 plane, the more their global orientation and orientation in relation to both the frontal and horizontal planes will be important (Annex 1).

Principal component analysis F1-F2 factorial plans (Fig. 10.): Axis 1 (42.70%) shows two sets of experimental status. The first set contains control status head free, touched ellipse, opened or closed eyes, visual guidance, and the virtual reality assisted gesture with visual feedback, ball or hand, and referential frames of action: plane of movement or ellipse model. The second set contains individuals without ellipse model; head free, opened or closed eyes and memorized, HMD off, no gesture feedback and no allocentric or egocentric referential frames. These positions of individuals on the axis 1 reveal the importance of visuo-haptic

interactions for gesture in real or virtual environment. Inside that set, they are differences between real touched ellipses situations and " virtually touched". The visuo-haptic class contains two sub-classes (visuo-tactile and visuo-proprioceptive).

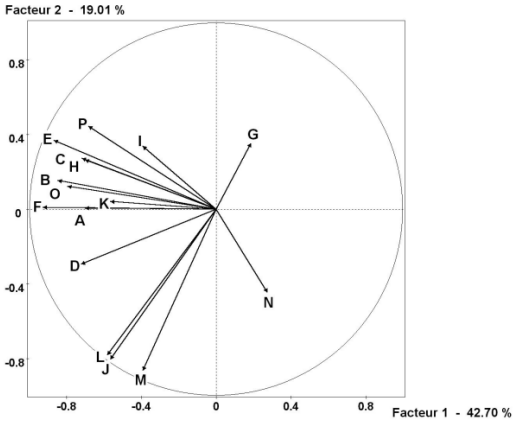


Fig. 9. Variables correlation circle.

Axis 2 (19.01%) shows difference functions of the orientation plane of movement. The distortion of the gesture spatial orientation is greater without visuo-haptic inputs, even with spatial frames of reference and models of action (ellipse model and plan of movement). These positions of individuals on the axis 2 reveal the importance of the gesture spatial orientation. Without visuo-haptic elements, situation of sagittal plane drawing ellipses are nearest to the gravity center of the factorial plane. Frontal and horizontal orientations influence motor behavior with contrary effect. The gesture distortion is greater in the horizontal plane. It also shows significant influence of HMD configurations and of gesture feedback representation. There are functional semiotic differences between ball and virtual hand with enhanced functional differences in absence of visuo-haptic elements. There are four noticeable statuses: 88A, 172a and 175a, without gesture feedback, induce similar behavior to situations with visuo-haptic interactions; 39f, drawing ellipses in the horizontal plane wearing HMD off immersive I-Glasses, induce the greatest distortion in motor control.

The multidimensional statistical analysis (Fig. 9 and 10) confirms the existence of structural and dynamical primitives of human system integration and virtual environment design, for assisting gestures the *a priori* main classes of virtual environment organizational elements. Their organizational and functional properties - the way to couple real and artificial sensori-motor functions - have a significant influence on the human *in-the-loop* system behavior. By enhancing and interacting with the sensorimotor loops, they are able to modify (disturbing or improving) the motor control, the gesture and, as a consequence, the global quality of human behavior. According to these experimental results, the interactions generated by the artefacts may be identified as functional interactions.

Thus we are able to show differential effects for each element of the incremental design of VE, and to assess the global design and dynamics of the human system integration. These experimental results will ground VE design modelling according to the hierarchical organization of theoretical integrative physiology.

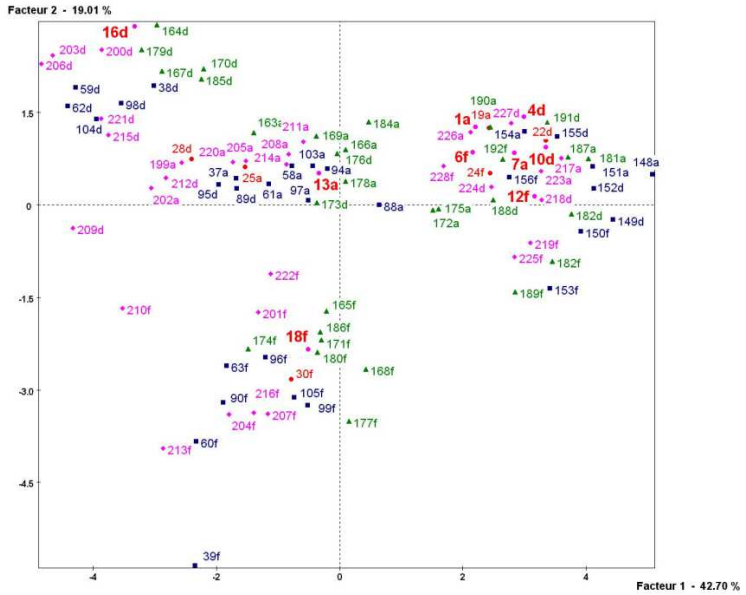


Fig. 10. Principal component analysis, F1-F2 factorial plans: outcome analysis of the virtual environment elements organization is done by observing statistical individuals (indexes Annex 2 and 3) position on the F1-F2 plan (representing 67.71% of the total inertia).

7. Conclusion and perspective

Designing a human-artefact system consists of organizing the linkage of multimodal biological structures, sensorimotor elements at the hierarchical level of the living body, with the artificial interactive elements of the system, devices and patterns of stimulation. There exists a "transport" of functional interaction in the augmented space of both physiological and artifactual units, and thus a *function* may be viewed as the final result of a set of functional interactions that are hierarchically and functionally organized between the artificial and biological system elements.

*Structures or Architecture***:** spatial organization of the structural elements, natural and artificial, coupled by non-local and non-symmetric functional interactions according to PAAS. It is specifying the function(s) of the integrated system. Different organizations specify different architecture and their specific functions:

Behaviour: temporal organisation of the patterns of artificial functional interactions condition and specify the dynamics fit of augmented sensorimotor loops. It is determining augmented human behaviour.

Evolution: the spatiotemporal organization of the structural elements and the functional interactions they produce and processes specify functional stability of human-artefact system according to the *potential of functional organization* principle during the *life of augmented human.*

Contingent on ecology and economy, architecture, behaviour and evolution as specified, define and limit the *life domain of augmented human.*

MTIP is thus applicable to different space and time level of integration in the physical space of the body and the natural or artificial behavioural environment; from molecular level to socio-technical level; from drug design to wearable robotics, and to life and safety critical systems design.

Future work should address questions related to the development of formal models (Cansell & Méry 2008; Méry & Singh 2010) related to augmented human engineering. New questions arise when dealing with deontic or ethical questions that might be handled by an augmented human together with classical formal modelling languages based on deontic or modal languages.

Industrial scientific and pragmatic challenges rely on designing intelligent and interactive artifactual systems relating machines and human beings. This relationship must be aware of its human nature and its body: it is anatomy and physiology. The man-machine interface becomes an integrated continuation of the body between perception-action and sensory and motion organs. By integrating human body and behaviours, the automaton is embodied but this embodiment grounds on the user's body; it enhances capabilities and performances. Efficiency and reliability depend on respecting these fundamental necessities.

8. Acknowledgment

Our special thanks to Professor Dominique MÉRY head of MOSEL LORIA, University of Lorraine.

9. Annexes

9.1 Annex 1: Calculated variables

Index	Variables
A	Number of ellipse
B	Average velocity (cm/s)
C	Covariation Vt/Rt
D	Amplitude (cm)
E	Mean area (cm^2)
F	Global position
G	Position / x axis (cm)
H	Position / y axis (cm)
I	Position / z axis (cm)
J	Global orientation
K	Orientation / sagittal plane(d°)
L	Orientation / frontal plane(d°)
M	Orientation / horizontal plane(d°)
N	Eccentricity
O	Major axis variation
P	Minor axis variation

Table 1.

9.2 Annex 2: Training and control experimental status indexation

Control	INDEX		
	Situation		Gesture Orientation
Opened Eyes	touched ellipse	**1a**	VS
		4d	TF
		6f	TH
	visual guidance	**7a**	VS
		10d	TF
		12f	TH
	memorised	**13a**	VS
		16d	TF
		18f	TH
Closed Eyes	touched ellipse	**19a**	VS
		22d	TF
		24f	TH
	memorised	**25a**	SV
		28d	FT
		30f	HT

Table 2.

9.3 Annex 3: Assisted graphical gesture experimental status

Virtual Environment		INDEX			
	Visual environment	**I/O Immers**	**I/O N Immers.**	**Proview 60**	**Gesture orientation**
HMD off	no	**37a**	**163a**	**199a**	VS
	no	**38d**	**164d**	**200d**	TF
	no	**39f**	**165f**	**201f**	TH
No gesture feedback					
	Allocentric frames	**58a**	**166a**	**202a**	VS
	"	**59d**	**167d**	**203d**	TF
	"	**60f**	**168f**	**204f**	TH
	Egocentric frame	**61a**	**169a**	**205a**	VS
	"	**62d**	**170d**	**206d**	TF
	"	**63f**	**171f**	**207f**	TH
	Ellipse + Allo frames	**88a**	**172a**	**208a**	VS
	"	**89d**	**173d**	**209d**	TF
	"	**90f**	**174f**	**210f**	TH

	Ellipse + Allo+ Ego	**94a**	**175a**	**211a**	VS
	"	**95d**	**176d**	**212d**	TF
	"	**96f**	**177f**	**213f**	TH
Gesture Feedback					
Ball	simple	**97a**	**178a**	**214a**	VS
	"	**98d**	**179d**	**215d**	TF
	"	**99f**	**180f**	**216f**	TH
	Ellipse + all references	**148a**	**181a**	**217a**	VS
	"	**149d**	**182d**	**218d**	TF
	"	**150f**	**183f**	**219f**	TH
Hand	simple	**103a**	**184a**	**220a**	VS
	"	**104d**	**185d**	**221d**	TF
	"	**105f**	**186f**	**222f**	TH
	Ellipse + all references	**151a**	**187a**	**223a**	VS
	"	**152d**	**188d**	**224d**	TF
	"	**153f**	**189f**	**225f**	TH
	"				
Vision and touch	Ellipse and hand	**154a**	**190a**	**226a**	VS
	"	**155d**	**191d**	**227d**	TF
	"	156f	192f	228f	TH

Table 3.

10. References

Bjorner, D. (2006a), Software Engineering 1 Abstraction and Modelling. *Theoretical Computer Science*, An EATCS Series. Springer. ISBN: 978-3-540-21149-5.

Bjorner, D. (2006b), Software Engineering 2 Specification of Systems and Languages. *Theoretical Computer Science*, An EATCS Series. Springer, 2006. ISBN: 978-3-540-21150-1.

Bjorner, D. (2009), Domain Engineering Technology Management, Research and Engineering. COE Research Monograph Series, Vol. 4, JAIST.

Booher, H.R. (2003), Introduction: Human Systems Integration, In: *Handbook of human systems integration*, Booher H.R., pp. 1-30, Wiley, ISBN: O-471-02053-2.

Cansell, D. and Méry, D. 2008. The Event-B Modelling Method: Concepts and Case Studies, in "Logics of specifi- cation languages", D. BJØRNER, M. C. HENSON (editors), Monographs in Theoretical Computer Science, Springer, p. 47-152.

Chauvet, G. A. (1993) Hierarchical functional organization of formal biological systems: a dynamical approach. I. An increase of complexity by self-association increases the domain of stability of a biological system. *Phil Trans Roy Soc London B*, Vol. 339 (March 1993), pp. 425-444, ISSN: 1471-2970.

Chauvet, G. A. (1993), Hierarchical functional organization of formal biological systems: a dynamical approach. II. The concept of non-symmetry leads to a criterion of evolution deduced from an optimum principle of the (O-FBS) sub-system. *Phil Trans Roy Soc London B*, Vol. 339 (March 1993), pp. 445-461, ISSN: 1471-2970.

Chauvet, G. A. (1993),"Hierarchical functional organization of formal biological systems: a dynamical approach. III. The concept of non-locality leads to a field theory describing the dynamics at each level of organization of the (D-FBS) sub-system." *Phil Trans Roy Soc London B*, Vol. 339 (March 1993), pp. 463-481, ISSN: 1471-2970.

Chauvet, G.A. (2002), On the mathematical integration of the nervous tissue based on the S-Propagator formalism: I Theory, *J.Integr.Neurosci.*, Vol. 1, No. 1, 31-68, ISSN: 0219-6352.

Delattre P. (1985), *Système, structure, fonction, évolution : essai d'analyse épistémologique (2ème édition)*, Maloine, ISBN: 2.224-01055-9, Paris, France.

de'Sperati, C. and Viviani, P. (1997) The relationship between curvature and velocity in two-dimensional smooth pursuit eye movements. *Journal of Neurosciences*, Vol. 17, No. 10 (May 1997), pp. 3932-3945, ISSN: 0270-6474.

Ehrhart L.S. and Sage A.P. (2003), User-centrerd systems engineering framework, In: *Handbook of human systems integration*, Booher H.R., pp. 295-373, Wiley, ISBN: O-471-02053-2.

Engelbart, D.C. (1960), Augmenting human intellect: a conceptual framework, AFOSR-3233 Summary Report, Stanford Research Institute, Menlo Park, California 94025, USA, October 1962, http://www.dougengelbart.org/.

Fass, D. (2006). Rationale for a model of human systems integration: The need of a theoretical framework. Journal of Integrative Neuroscience, Vol. 5, No. 3 (September 2006), pp. 333-354, ISSN: 0219-6352.

Fass, D. (2007), Integrative Physiological Design: A Theoretical and Experimental Approach of Human Systems Integration, In Harris D.: *Engin. Psychol. and Cog. Ergonomics, HCII 2007, LNCS, LNAI 4562* (July 2007), pp. 52–61. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISSN: 0302-9743.

Fass, D. 2005, Virtual Environment a Behavioral and Countermeasure Tool for Assisted Gesture in Weightlessness: Experiments during Parabolic Flight, *Journal of Gravitational Physiology*, Vol. 12, No. 1; July 2005, pp.19-20, ISSN: 1077-9248

Fass, D. and Lieber, R. (2009), Rationale for human modelling in human in the loop systems design, Proceedings of *3rd Annual IEEE International Systems Conference, SysCon*, ISBN: 978-1-4244-3462-6, Vancouver, Canada, Mars 2009.

Ghafouri M, Lestienne FG. (2006), Contribution of reference frames for movement planning in peripersonal space representation. *Experimental Brain Research*, Vol. 169, No. 1 (February 2006), pp. 24-36, ISSN: 0014-4819.

Gurfinkel, VS., Lestienne, F., Levik, YU.S., Popov K.E. et Lefort, L. (1993), Egocentric references and human spatial orientation in microgravity : II body-centered coordinates in the task of drawing ellipses with prescribed orientation. *Experimental Brain Research*, Vol. 95 (August 1993), pp. 343-348, ISSN: 0014-4819.

Haskins C. (Ed.), January 2010, *Systems Engineering Handbook: a guide for processes and activities*, International Council on Systems Engineering (INCOSE).

Hobbs A. N., Adelstein B. D., O'Hara J. , & Null C.H. (2008), Three principles of human-system integration, *Proceedings of the 8th Australian Aviation Psychology Symposium*, Sydney, Australia, April 8-11, 2008

Licklider, J. C. R., Man-Computer Symbiosis, *IRE Transactions on Human Factors in Electronics*, Vol. HFE-1 (March 1960), pp. 4-11, ISSN: 0096-249X.

Kelso, JA. (2008). An Essay on Understanding the Mind: The A.S. Iberall Lecture, *Ecological Psychology*, Vol. 20, No. 2 (April 2008), pp. 180-208, ISSN: 1040-7413.

Malnoy F., Fass. D. and Lestienne F. (1998), Vection and postural activity: application to virtual environment design, *La lettre de l'IA*, Vol. 134-136, 121-124.

Méry, D. and Singh N.K. (2010), Trustable Formal Specification for Software Certification, T. Margaria and B. Steffen (Eds.): ISoLA 2010, Part II, LNCS 6416, pp. 312–326, ISSN: 0302-9743.

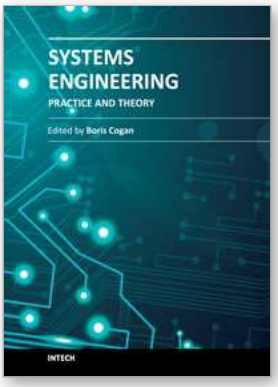
Nasa - Human System Integration Division, What is human system integration?, September 2011, http://humansystems.arc.nasa.gov

Nissen M.E. and Burton R.M. (2011), Designing organizations for dynamic fit: system stability, manoeuvrability, and opportunity loss, *IEEETransactions on Systems, Man and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, Vol. 41, No. 3, pp. 418-433, ISSN: 1083-4427.

Roco, M.C. and Brainbridge, W.S. (2002), Converging technologies for improving human performance. National Science Foundation, June 2002. www.wtec.org/ConvergingTechnologies/Report/NBIC_report.pdf.

Sporns, O. and Edelman G., (1998), Bernstein's dynamic view of the brain: the current problems of modern neurophysiology (1945), *Motor Control*, Vol. 2 (October 1998), pp. 283-305, ISSN: 1087-1640.

Viviani P, Burkhard PR, Chiuvé SC, Corradi-Dell'Acqua C, Vindras P. 2009. Velocity control in Parkinson's disease: a quantitative analysis of isochrony in scribbling movements, Exp Brain Res. , Vol. 194, No. 2 (April 2009), pp. 259-83. Epub 2009 Jan 20. Erratum in: Exp Brain Res. 2009 Apr; 194(2):285.



Systems Engineering - Practice and Theory
Edited by Prof. Boris Cogan

ISBN 978-953-51-0322-6
Hard cover, 354 pages
Publisher InTech
Published online 16, March, 2012
Published in print edition March, 2012

The book "Systems Engineering: Practice and Theory" is a collection of articles written by developers and researches from all around the globe. Mostly they present methodologies for separate Systems Engineering processes; others consider issues of adjacent knowledge areas and sub-areas that significantly contribute to systems development, operation, and maintenance. Case studies include aircraft, spacecrafts, and space systems development, post-analysis of data collected during operation of large systems etc. Important issues related to "bottlenecks" of Systems Engineering, such as complexity, reliability, and safety of different kinds of systems, creation, operation and maintenance of services, system-human communication, and management tasks done during system projects are addressed in the collection. This book is for people who are interested in the modern state of the Systems Engineering knowledge area and for systems engineers involved in different activities of the area. Some articles may be a valuable source for university lecturers and students; most of case studies can be directly used in Systems Engineering courses as illustrative materials.

How to reference
In order to correctly reference this scholarly work, feel free to copy and paste the following:

Didier Fass (2012). Augmented Human Engineering: A Theoretical and Experimental Approach to Human Systems Integration, Systems Engineering - Practice and Theory, Prof. Boris Cogan (Ed.), ISBN: 978-953-51-0322-6, InTech, Available from: http://www.intechopen.com/books/systems-engineering-practice-and-theory/agmented-human-engineering-a-theoretical-and-experimental-approach-to-human-system-integration

INTECH
open science | open minds

InTech Europe
University Campus STeP Ri
Slavka Krautzeka 83/A
51000 Rijeka, Croatia
Phone: +385 (51) 770 447
Fax: +385 (51) 686 166
www.intechopen.com

InTech China
Unit 405, Office Block, Hotel Equatorial Shanghai
No.65, Yan An Road (West), Shanghai, 200040, China
中国上海市延安西路65号上海国际贵都大饭店办公楼405单元
Phone: +86-21-62489820
Fax: +86-21-62489821

Putting in Perspective Human-Machine System Theory and Modeling: From Theoretical Biology to Artifacts Integrative Design and Organization

"Artem Augmented Human Project"

Didier Fass

ICN Business School, Mosel Loria UMR CNRS 7503, Université de Lorraine
Didier.fass@loria.fr

Abstract. Thinking about human systems integration is thinking human, system and human-system for designing and organizing system of systems from human-machine level to socio-technological level. For critical human in-the-loop systems there is a strong need of reliability and consistency from modeling, development and life cycle systems. A main epistemic issue rises: does it exist a conceptual framework, both theoretical and experimental, that ensures reliability and consistency of human system integration design and organization? According to the Italian Renaissance painting perspective principles invention, our paper puts in perspective human systems integrations from theoretical biology to systems sciences, and it presents an isomorphic framework for modeling human systems integration especially adapted at the human machine level, for medicine, defense and aerospace.

Keywords: human systems integration, human-machine, theoretical biology, systems theory, isomorphic framework, perspective, modeling.

1 Introduction

"*The field of Human Factors and its many descendants - Cognitive Engineering, Human-Computer Interaction, Cognitive Ergonomics, Human-Systems Integration, ...—has made numerous, wonderful advances in the many decades since the enterprise began. But the discipline still serves many to rescue rather than to create. It is time for a change."* Don Norman [1]

Reliable design and correctness by construction systems are two main issues for human systems integration and organization from human-machine systems to socio-technical systems especially for safety and life critical systems. With current interactive systems, from smartphone, airplane cockpit devices and bedside monitor in intensive care, to teleoperation systems, boundaries between human and artifact are fading. Within converging technologies (nano-bio-info-cogno or NBIC) [2] [3] that dynamics develops.

That disappearance of boundaries between a biological and social human and its interactive physical and information processing artifacts challenges engineering methodologies and ergonomics of systems design.

V.G. Duffy (Ed.): DHM/HCII 2013, Part I, LNCS 8025, pp. 316–325, 2013.
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

Current and future technical developments for enhancing human skills and capabilities or medical care and implantable devices challenge new scientific and technical knowledge and development methods. Understanding that synthetic hybridization requires an original conceptual and knowledge framework, that allows to think and model "*enhanced or augmented human"* as an integrated dynamic, structural and functional whole [4].

1.1 Human System Integration (HIS)

Originally as technical and managerial concept [5], human systems integration (HIS) was defined in the middle of the eighties by the US defense department. It is used in acquisition programs requirements definition of total system design and organization. It aims to maximize the overall system performance while ensuring a safe, efficient, and enhanced interaction between the user and the technical system [6]. Defining a system more broadly than hardware and software refer to human centered design [7] in contrast with automation and machine centered design [8].

That methodology [9] is concerned with the integration of human capabilities and performances, from individual to social level [10] into the design of complex human-machine systems supporting safe, efficient operations; there is also the question of reliability. That issue requires thinking human as an element of the system and translating it qualitatively throughout design, development and testing process [11].

Human systems integration also involves augmented human design with the objectives of enhancing human capabilities and improving human performance [12] using interactive technologies at the level of human-machine system and human machine symbiosis [13].

Today HIS refers to systems that require human interactions -human in-the-loop systems, but new automated technologies are emerging more and more integrated on the human body from wearable to implementable. The human automated machine is closer. The concept of human system integration must be revised!

1.2 Scientific and Technical Context

Human machine is currently both a techno-scientific research and development topic and a philosophical and anthropologic theme of discussion. From one side, reductionism postulates reducing the human organism to an intelligent machine and its physical (mechanical) and computational properties. On another side, some one claims for a metaphysical and transcendental humanistic ideal inherited from Italian Renaissance and Vitruvius.

Between Human, with a capital H, as a philosophical ideal and human as an abstract category of a biological system, there is life, multidimensional reality and death. Therefore, how understanding and conceiving human and human-artifact or machine nature and their scientific principles theoretically?

That question highlights some scientific and technological interdisciplinary questions:

- What does human systems integration really mean from systems sciences or general systems theory to theoretical biology and integrative physiology applied to human systems engineering?
- What is a good epistemic framework for human-machines modeling? Which system and theory of knowledge is relevant? Which ethical reasoning? Which logics?
- What is the validated scientific grounding for safety critical automation design and human systems integration?
- What is a good and reliable model of automation and integrated human machine "physiology" and behavior?
- Which are the formal and experimental method for ensuring modeling, validation and certification of human-machine system design and organization?

1.3 Epistemology and Modeling

Epistemology and modeling are causally linked. The epistemic framework structures model. They are related to knowing and representing knowledge, not only for understanding the natural or artificial world, but also for designing and organizing technologies. According its internal – logic, and external – experimental, validity that framework ensure consistency and practical validity of the model. Different epistemic frameworks might provide different models of the same object or system with a wide range of robustness and predictability. The most general is the grounding epistemic framework; the most predictable and robust is the model. It is not a metaphysical contingency but a realistic and naturalistic necessity.

It is a main issue for safety and sustainability of automation design and human system integration.

2 Historical Perspective

The way we think and conceptualize the world and the relation between its elements within its related level of organization influences our capabilities of representation, modeling, designing and organizing artifacts from human-machine to socio-technical systems.

HIS safety and predictive modeling and design need a new insight and an adapted conceptual framework.

We need a shift from an analytical and reductionist framework, based on mechanism and linear causality in witch human machine design is reduced to interactions design as an informational and computational processing to a systemic and organismic conceptual framework based on theoretical biology and general system theory.

2.1 The HSI Founding Experiment: "La tavoletta di Brunelleschi"

The general problem of human systems integration is not recent. In 1415 for helping other people being aware of the artificial perspective principles of representation as he was, Filippo Brunelleschi, a self-taught architect and certainly the central perspective inventor, made-up a special device, "la tavoletta", (Fig. 1.). The Tavoletta is the combination by two technical parts: a painted tablet and a looking-glass. The tablet is painted on its intrados with the Duomo Baptistery realistic representation according perspective principles of drawing (central point of view, skylines and converging lines). Holding the tablet and the mirror, the user was looking on the virtual reflected image trough the tablet opening trying to superimpose the virtual image on the real monument. Brunelleschi's Tavoletta is the ancestor of virtual reality and augmented reality.

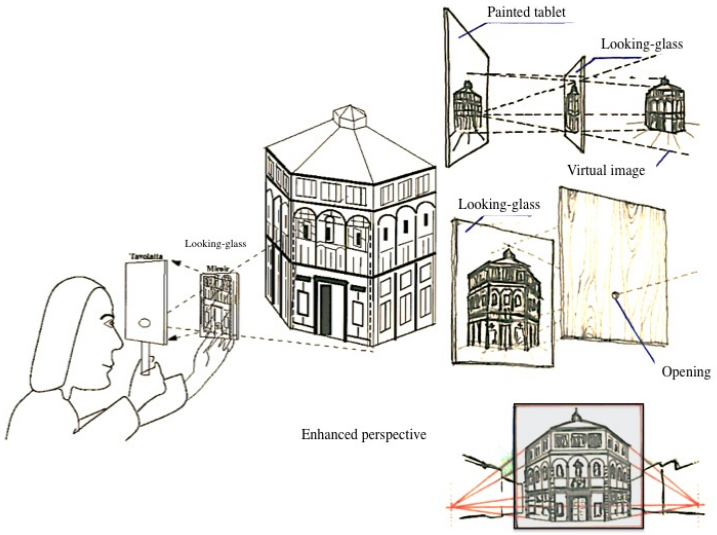


Fig. 1. Performed in the early Italian Renaissance (1415) in Florence, Filippo Brunelleschi's Tavoletta experience is the founding experiment for human systems integration and augmented reality. It demonstrated the geometrical framework of perspective conceptualization and representation.

It summarizes the modern aims of human system integration design and organization. The success of that experience depends on:

1. Designer skills for conceiving relevant abstraction of a part of reality and developing an artificial representation using artifice;

2. Formal and experimental representational medium;
3. Device shaping in relation to the required function, its design;
4. The acknowledgement of usage context or operating context;
5. Physical ergonomics of the device, its ability to induce and facilitate its handling situation (without injury);
6. The ability of the device to stimulate cognitive, imaginative and action capabilities of an operator (affordance [14])… who must understand and operate the device to realize the experience;
7. Skills and training of the user.

2.2 Cybernetics and Human Machine Systems

Cybernetics, defined by Wiener [15] as "the science of control and communication in the animal and the machine", had and has a great influence on automation design and human-machine systems concepts and development. It deals with information theory, automatic control theory, algorithm theory, regulation, stability, and homeostasis. Cybernetics is about regulation and control of a mechanical system behavior [16] and human-machine problem have been viewed as an exchange of information between the operator and the controlled object. It is concerned with the processing by a decision-making algorithm of input information into control signals, a command [17], this independently of the nature of the machine (biological, mechanical, electronic...) [18]. In that context, every good regulator of system must be a model of that system or must be isomorphic with the system being regulated [19]. Despite this theorem, cybernetics remains behaviorist and computational, i.e., postulating that information processing and computing are fundamental basis of decision-making function or knowledge the same as cognitive. But human as biological system, is not a computational or state machine [20].

2.3 Theoretical Biology and General Systems Theory

Designing and developing human machines systems using interactive and artificial technologies requires integrating artificial elements and structural design usually by artificial or artifactual functional interactions and its dynamics.

In this scientific framework, the question becomes: how to integrate the technical and human needs and requirements, biological peculiarities, into specifications of a technological system (physical and informational) design able to be used by a human (biological system) or integrated or coupled to the human body? Requiring that design and organization might ensure stability and consistency of the overall system (integrated human machine system) function and behavior in space and time?

Behind this in mind, it is necessary to develop theoretical principles of human systems integration, based on a continuous approach between biology and anthropology [15] [16] [17], taking into account the isomorphic and proven principles of general systems theory [18], and of theoretical biology and integrative physiology theory [19].

Human nature cannot be reduced to a metaphoric "model" of any kind of machine or computation even it is heuristic. Engineered artifacts have their own technical and physical requirement. The question of nature of human-machine systems is an issue of integrative design and organization.

3 Human System Integration and Modeling

"Experience without theory is blind, but theory without experience is mere intellectual play." Emmanuel Kant. According that kant's sentence we have developed a

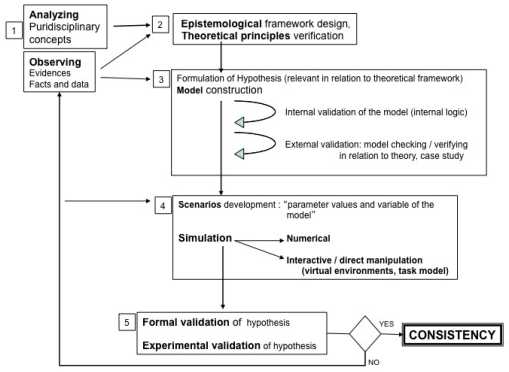


Fig. 2. Our approach associates formal and experimental methods for validating human-machine model consistency. It is first to state an multidisciplinary epistemological framework after analyzing existing multidisciplinary concepts and validate their relevance using model checking and realistic case study; secondly to validate the relevance of this epistemological framework and its ability to generate a safe and integrated modeling method, validating overhang the intrinsic quality of formal models and extrinsic validity by simulation and experimentally by comparison to reality by expert analysis and expert feedback.

HIS needs the production of a new body of knowledge and a general and reliable framework for designing, i.e., theoretical principles proven and validated description or modeling of human machine system. The purpose of the production of this new epistemological apparatus is to provide a scientific and technical framework for predictive integrative and safe modeling of human-machine systems. The challenge is to prefigure or provide a tool for designing and organizing an hybrid system from which nature is to be defined.

4 A Theoretical Framework

"*The ultimate model of a cat is of course another cat, whether it be born of still another cat or synthetized in laboratory"* Arturo Rosenblueth, Norbert Wiener and Julian Bigelow, January 1943.

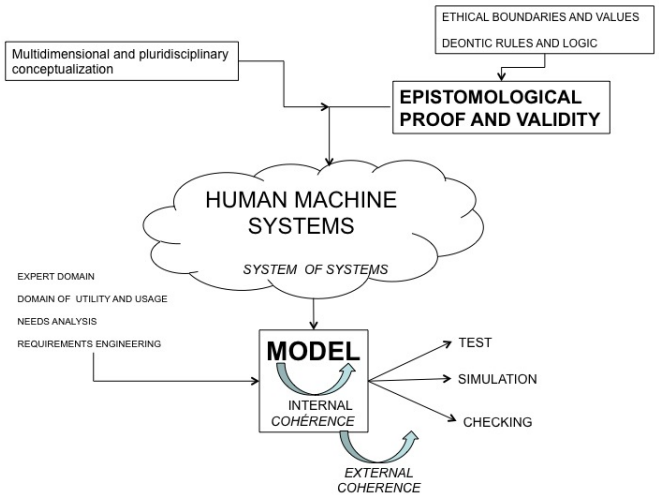


Fig. 3. Challenging human-machine system design and organization is modeling an heterogeneous system of systems (different by nature). That requires a proven and validate epistemic framework fitted to hybrid system, challenging the question of human machine system nature and ensuring human systems integration reliability.

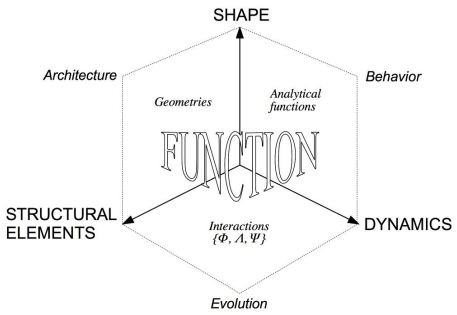


Fig. 4. Our isomorphic epistemic framework for human-machine systems integrative design and organization

4.1 Classical Epistemic Framework

From General systems theory and Cybernetics, some previous works in systems sciences and modeling have demonstrated the relation between system theory, modeling and epistemology. Some attempt to define invariant category conceptual element of general system have done, i.e., Pierre Delattre have done an epistemic analysis showing tree main categories of systems invariance: structure, function and evolution [26].

Previously, according system engineering and classical system epistemology, we have proposed to ground our modeling method of human-machine system on the concepts of structure, function and dynamics. We have defined the relation of three pair of invariant as Architecture{structure, function}; Behavior{Function, Evoution} and Evolution{Structure, Dynamics}. We have considered these three relation as three plane of an Euclidian space [27], were each invariant was a structuring axis for a system model. Nevertheless that epistemic framework of invariants was a mistake because structure and architecture are equal and function, as an issue of purpose and teleology, is not realy existing *per se*, it is related to a structural shape (a Gestalt) and the dynamic of the system. By consequences we are suggestion a new epistemic framework for modeling human-machine systems.

4.2 Our Isomorphic Epistemic Framework

For modeling human-machine systems, we have grounded our new epistemic framework on isomorphism. We have found new general categories of system elements that allow the same representation framework for integrating two systems different by nature. Our isomorphic epistemic framework is composed by three main isomorphic categories of interlocked elements: structural element, shape and dynamic.

As previously we were able to define three pair of isomorphic relation: Architecture{structural elements, shape}, Behavior{shape, dynamics} and Evolution{structural elements, dynamics}. Thus architecture is describable by a set of possible geometries, from Euclidian to no-Euclidian and other, behavior is describable by a set of functional analysis and algorithm, and evolution is describable by a set of modal interactions where each interaction might be compose on three modal parameters: physical, logical and physiological or behavioral dimensions according to Chauvet's theoretical integrative physiology [25]. It has been experimentally validated [3].

5 Conclusion and Perspective

Just like the drawing of perspective, where the correctness construction is formally ensure by structuring lines and point of view principles, human-machine system modeling must be ensure by an isomorphic framework of epistemic principal proven and validated experimentally and formally. It will be a necessary condition to the future development of human-machines systems. But it is not sufficient, future development needs also intuition, how-know, expertise and ethics.

References

1. Roco, M.C., Bainbridge, W.S.: Converging technologies for improving human performance-nanotechnology, biotechnology, information technology and cognitive science. Technical report, National ScienceFoundation (2002), http://www.wtec.org/ConvergingTechnologies/Report/NBIC_report.pdf
2. Nordmann, A.: Converging technologies - Shaping the future of european societies. Technical report, European Communities (2004)
3. Fass, D.: Augmented human engineering: a theoretical and experimental approach to human system integration. In: Cogan, B. (ed.) System Engineering – Practice and Theory, Intech, pp. 257–276. Open Access Publisher, Rijeka (2012)
4. Norman, D.: Why Human Systems Integration Fails (And Why the University Is the Problem), invited talk for the 30th anniversary of the Human-Systems Integration Board of the National Research Council. The National Academies, Washington, DC (December 2, 2010), http://www.jnd.org/dn.mss/why_human_systems_in.html
5. Haskins, C. (ed.): Systems Engineering Handbook: a guide for processes and activities. International Council on Systems Engineering (INCOSE) (2010)
6. Defense Acquisition Guidebook. Department of Defense (2012), https://dag.dau.mil
7. Ehrahart, L.E., Sage, A.P.: Handbook of human systems integration, chapter User-centrerd systems engineering framework. Series in Systems Engineering and Management, pp. 295–373. Wiley (2003)
8. Amalberti, R.: Les facteurs humains à l'aube de l'an 2000, pp. 5–12. Phoebus (1998)
9. Pew, R.W., Mavor, A.S. (ed.) Human-System Integration in the System Development Process: A New Look. The National Academies Press, committee on human-system design support for changing technology, commit- tee on human factors, national research council, national research council edition (2007), http://www.nap.edu/openbook.php?recordid=11893
10. Rousse, W.B., Boff, K.R.: Organizational Simulation. Wiley Series in Systems Engineering and Management (2005)
11. Booher, H.: Handbook of human systems integration, Introduction: Human Systems Integration. Series in Systems Engineering and Management, pp. 1–30. Wiley (2003)
12. Engelbart, D.C.: Augmenting human intellect: a conceptual framework, AFOSR-3233 Summary Report, Stanford Research Institute, Menlo Park, California 94025, USA (October 1962), http://www.dougengelbart.org/
13. Licklider, J.C.R.: Man-Computer Symbiosis. IRE Transactions on Human Factors in Electronics HFE-1, 4–11 (1960) ISSN: 0096-249X
14. Gibson, J.J.: The theory of affordance. In: Shaw, R.E., Bransford, J. (eds.) Perceiving, Acting and Knowing, pp. 67–82. Lauwrence Erlbaum Associates, Hillsdale (1997)
15. Wiener, N.: Cybernetics. John Wiley & Sons, New York (1948)
16. Parin, V.V., Bayevskiy, R.M.: Introduction to medical cybernetics, Translation of "Vvedeniye v meditsinskuyu kibernetiku."Izdatel'stvo "Meditsina," Moscow, 1966. NASA Technical Translation F-459, Washington, D. C. (1967)
17. Rosenblueth, A., Wiener, N., Bigelow, J.: Behavior, Purpose and Teleology. Philosophy of Science 10(1), 18–24 (1943)
18. Ashby, R.: An introduction to cybernetics. Chapman & Hall, London (1957)
19. Conant, R., Ashby, R.: Every good regulator of a system must be a model of that system, Int. J. Int. J. Systems Sci. 1(2), 89–97 (1970)

20. Kováč, L.: Inforamtion and knowledge in biology : time for reappraisal (2). Plant Signalling & Behavior 2, 65–73 (2007)
21. Lorenz, K.: L'envers du miroir: Une histoire naturelle de la connaissance (Behind the Mirror: A Search for a Natural History of Human Knowledge). Flammarion, Champs Sciences (1973)
22. Lyon, P.: The biogenic approach to cognition. Cognitive Processing 7(1), 11–29 (2006)
23. Edelman, G.M.: Second nature. Brain science and human knowledge. Yale University Press, New Haven and London (2006)
24. von Bertalanffy, K.L.: General System theory: Foundations, Development, Applications. George Braziller, New York (1968) (revised edition 1976)
25. Chauvet, G.: Hierarchical functional organization of formal biological systems: a dynamical approach. I, II and III. Phil. Trans. Roy. Soc. London B 3, 1471–2970 (1993) ISSN: 1471-2970
26. Delattre, P.: Système, structure, fonction, évolution - Essai d'analyse systémique, Maloine (1985)
27. Lieber, R., Fass, D.: Human Systems Integration Design: Which Generalized Rationale? In: Kurosu, M. (ed.) HCD 2011. LNCS, vol. 6776, pp. 101–109. Springer, Heidelberg (2011)

Human machine epistemology survey

Rémi Nazin[1 2] * and Didier Fass[3 2]

[1] PErSEUs (EA 7312) - Université de Lorraine
[2] LORIA - MOSEL remi.nazin@loria.fr, didier.fass@loria.fr
[3] ICN Business School Nancy

Abstract. Pluridisciplinar convergence is a major problem that had emerged with Human-Artefact Systems and so-called "Augmented Humanity" as academical fields and even more as technical fields. Problems come mainly from the juxtaposition of two very different types of system, a biological one and an artificial one. Thus, conceiving and designing the multiple couplings between them has become a major difficulty. Some came with reductionnist solutions to answer these problems but since we know that a biological system and a technical system are different, this approach is limited from its beginning.
Using a specifically designed questionnaire and statistical analysis we determined how specialists (medical practitioners, ergonomists and engineers) in the domain conceive themselves what is a Human-Artifact System and how they relate to existent traditions and showed that some of them relate to the integrativist views.

1 Introduction

1.1 The integrative way of looking at things

Designing Human-Artefact Systems within the current technological context impose to adress safety and reliability issues at the same time[4].

Some theoretical apparatus are currently in use to support the design of Human-Artefact Systems but either they are "incomplete[5]" of they adopt some form of reductionnism. This situation tends to lead researchers and engineers to build their own composite theories on demand thus being exposed to underlying contradiction which represents a critical safety issue.

Therefore, a unified but comprehensive way of conceiving what is a Human-Artefact System is necessary. This way is that of integration as as intellectual approach which explains the functionning of a given system by those of its components and their organization. As the philosopher once said this could be regarded as a *"new name for some old ways of thinking"*[6] but the important word

* Supported for a PhD by the Direction Générale de l'Armement (french equivalent of DARPA).

[4] Particularly in the medical domain.

[5] They can answer only a fraction of the problems.

[6] William James as a subtitle for his *Pragmatism*.

in the definition is **system**. What we mean by **system** is linked to the general system theory (GST)[1] and designate a complex of objects whose interactions give new properties to the whole.

Apart from its systemical dimension, the integrative way of looking at Human-Artefact Systems requires to be a truly trandisciplinary paradigm. That means that it should allow us to understand the systems from their physical to their social and logical dimensions via their biological or artificial dimension, without getting out of our framework.

1.2 The generic system

In his article([8]), Fass builded a new definition of a generic and isomorphic framework for describing systems. This system is defined by its dimensions of requirement (shape, dynamics and elements) and of specification (architecture, evolution and behaviour). The interesting point about specifications is their ability to characterize the functional identity of the modeled system including its behaviours and evolutions. It should be noted that this definition of a system is perfectly coherent with the theory of Bertalanffy ([1]) and share with it the fact that the system has no $\tau\acute{\epsilon}\lambda o\varsigma$[7] but is equifinal[8].

For more considerations upon the epistemological implications of this redefinition the reader can consult the Master thesis of the main author[9].

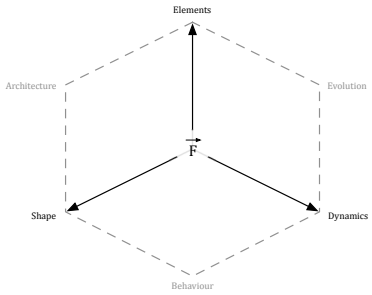


Fig. 1. The generic system and its dimensions.

Plain lines represents requirements, dotted lines represents specifications. We can see that specifications are produced by the intersection of requirements and that the function is obtained from the global behaviour of the system.

[7] $\tau\acute{\epsilon}\lambda o\varsigma$ is the ancient greek for "completion" and is commonly used to describe the target state of a system as a metaphysical attribute.

[8] An equifinal system tend to a characterstical state from several initial states and various routes.

[9] [11]

1.3 The link between theory and practice

In order to demonstrate that there is some space available for our framework in the scientifical panorama, we had to adress a difficult problem. Medical practitioners, engineers and ergonomists have indeed little or no knowledge in epistemology because it is not part of their technical education. Being uneducated in a discipline does not mean having no idea about it, it does rather mean having ideas which are not necessarily organized in a consistant way.

There is an obvious link between theory and practice in the sense that some theoretical ideas that are not directly from one's field of expertise[10] can impact his practice. These theoretical ideas are entangled in a more or less coherent way into an underlying theoretical background. This background is not spontaneously created but is built during the education, experience and scientific general culture.

It is therefore impossible to ask our population to which tradition they find themselves the most affiliated. This situation imposes us then to probe their underlying theoretical background as a scientific ideology.

We first established a list of the main traditions used to conceive Human Artefact Systems. This list is constituted by behaviorism, cognitivism, connexionnism and cybernetics. For comparison, we added a brand new "tradition" called *integrativism* which reflects our point of vue upon the nature of Human Machine Systems.

It should be duly noted that, although the structure is inherited from our definition of a generic system, the content of the list is not arbitrary but comes from our bibliographical researchs.

We then listed the respective theoretical positions upon the major items of the domain if possible[11].

From the bibliography, we could build a table to compare what we call *canonical traditions*. A canonical tradition reflects the core principles of a scientific movement about a given subject, the actual positions taken by an individidual may not be exactly the same as the canonical tradition which he is related because of the existence of different currents inside a given tradition. This is why we focus on the core principles which are the one that allows to distinguish some groups inside our population.

2 Hypothesis

The survey was designed to test the following hypothesis in a qualitative manner.

(h0) The population is divisible into different coherent groups in terms of their sets of answers.
(h1) If (h0) is verified, at least one coherent group can be related to a canonical tradition.

[10] e.g. "consciousness is alike of a computer program" for a medical doctor.
[11] Meaning there is a position.

Table 1. Canonical traditions on the nature of human-machine systems (part 1)

		Behaviourism	Cognitivism	Connexionism
Individual				
	Body	Sensory organs + Effector organs + Nervous system [?]	Biological computer + Sensory Organs [?]	Neural network + Body [?]
	Mind	Subvocal language + Memory [?]	Centralized symbolic information processing + Memory [?]	Emergent patterns in the network [?]
Architecture		Mechanistic [?]	Centralized modules [?]	Network
	Constitution	Conditioning [?]	/	Reinforcement
	Element	Spatial sub-unit	Module [?]	Connex part of the network [?]
Behaviour		Articulated response to stimulus[?]	Problem solving	Computation
	Cognition	Articulated response to stimulus [?]	Rule based symbols manipulation	Adequate pattern activation [?]
	Perception	Stimulus recognition [?]	Information acquisition [?]	Information acquisition
	Action	Articulated response to stimulus [?]	Information treatment result	Computational result
Evolution		Mechanistic processes [?]	Algorithmic sequences	Activation sequences
	Interaction	Action and reaction in the environment [?]	Data treatment	Input/Output
	Memory	Faculty of the mind [?]	Faculty of the mind	Patterns of activation
Function		None [?]	Related to a module [?]	/
Communication		Inter-individual [?]	Information Theory	Physico-chemical signal
Environnment		Stimulus source [?]	Source of information and problems	Source of information and problems

Table 2. Canonical traditions on the nature of human-machine systems (part 2)

		Cybernetics	Integrativism
Individual			
	Body	Feedback regulated systems [**?**]	Self-associated metastable systems [5]
	Mind	Decentralized information processing + Memory	Consciousness (In a Jamesian way)[6]
Architecture		Feedback loops network [**?**]	Biological
	Constitution	/	Stabilizating Self Association [2]
	Element	Feedback loop [**?**]	Fonctionnal sub-unit
Behaviour		Return to equilibrium [**?**]	
	Cognition	/	Categorization by thalamo-cortical reentry [7]
	Perception	Environmental disturbance [**?**]	Integration of sensitive data[9]
	Action	Recherche d'quilibre [**?**] [**?**]	Domain of stability and viability
Evolution		Return to equilibrium [**?**]	Sub-system interactions
	Interaction		Transductive coupling [4][3]
	Memory	/	Recategorization [6]
Function		Regulation [**?**][**?**]	Resulting from the activity of the system
Communication		Information Theory [**?**] [**?**]	Functional interaction [5]
Environnment		Source of perturbations	Hypersystem

(h2) If (h1) is verified, there is no necessary link between the field of expertise and the membership to a coherent group.
(h3) If (h2) is verified, there is a coherent group related to integrativism.

3 Materials used

- The Inria enquiry plateform runs LimeSurvey 2.05+[12].
- Statistical treatments of the answers were made with R 3.0.2[13] on OS X 10.9.
- Correlation graphs were made with Gephi 0.8.2[14] on OS X 10.9.

4 Method

From our hypothesis, we see that the purpose of the study was to show the existence of some sets of scientifical beliefs which are not directly provided by a domain of expertise and that these sets are shared by people form very different domains. To do this, a qualitative analysis must be conducted.

4.1 Survey

To examine our hypotheses, we selected some items in our grid of canonical traditions and we transformed them into affirmative propositions. To eliminate every potential bias, we randomized the initial order of the propositions. What we wanted to measure was the degree of agreement of our subjects upon a series of these propositions. For reasons of convenience, we choose to limit the length of the questionnaire to 25, keeping the completing-time under 20 minutes. For measuring the agreement, we used the typical format of a five item Lickert scale ([10])[15].

We completed the questionnaire with some demographic items such as sex, age and professional occupation[16]. These questions allowed us to refine our results and to test (h4). Using the LimeSurvey plateform, we guaranteed the anonimity of our subjects by not registering their ip adress and not using cookies. The transcription of the questionnaire is available in figure 5.3.

The questionnaire was available to all public trough the dedicated Inria plateform[17] during a 15 days period. The plateform uses a encrypted connection and

[12] https://www.limesurvey.org
[13] http://www.R-project.org
[14] https://gephi.github.io
[15] Strong disagreement, simple disagreement, without idea, agreement, strong agreement.
[16] This item has been used as an open question in regard of the means of transmission of the questionnaire. We wanted to touch a maximal variety of subjects and the use of predetermined categories could have exluded a part of our general population.
[17] https://sondages.inria.fr

thus reinforce the anonimity of our subjects. In addition to the common traffic of the plateform, we broadcasted the questionnaire through selected diffusion lists and communities :

- [tousloria] features all the people of the Lorrain research laboratory in informatics and applications.
- [ergoihm] features a great variety of ergonomicians and specialists in HCI.
- [info-ic] feature the community of researchers in knowledge engineering.
- La Socit de ranimation de Langue Franaise.

5 Statistical Analysis

5.1 Principal Component Analysis

Principal Component Analysis (PCA) is a factorial analysis method. Its main strength is its ability to describe an individual-variables matrix without any statistical hypothesis. As a factorial analysis method, it is not impacted by the size of the population either.

We applied this method to our groups of population by testing the θ_0 hypothesis that the absence of principal component significantly distinguishable in a population is a sign of the existence of some groups inside it. This hypothesis is opposed to θ_1 that the existence of a significant principal component in a group allows to define a group of answers greatly influenced by some determined variables and by then that the group is homogenous.

5.2 Hierarchical clustering and classification

This method allows to divide a group into several more homogenous groups in regard of the variation of the eigenvalue. It produces a hierarchical tree of clusters which can be analyzed by other methods described below.

5.3 Graphs of correlation

As all our variables corresponding to answers are of the same type, it is possible to apply a χ^2 test[18] for each couple of them. We can thus build a correlation matrix and a correlation graph. The correlation graph represents the network of reciprocal influences of the answers in a given group. Each node represents an answer and each edge represents a correlation between two nodes[19].

This tool is interesting because it is more easily readable than a matrix and has graph properties such as connectivity. The more connected is the correlation graph, the more consistent is the group of answers. Then a graph with no connectivity at all represent the case of random answering and a graph fully connectivity represent the case of a group who has answered all the questions with the same item.

[18] With a p-value of 5%

[19] The qualitative dimension of the correlation is not of interest here in so far as we want to represent the absolute influence of each variable on the others.

1. What is our age ?
2. What is your sex ?
3. What is your profession ?

4. A machine may be compared to an organ.
5. Perceptual information treatment is the main function of the brain.
6. Behaviour is solely a reaction to exterior stimulus.
7. It is possible to predict the behaviour of an individual regardless of its body.
8. Reasoning could be considered as the result of a logical calculus.
9. It is possible to study an individual disregarding its interactions with the environnment.
10. A living cell may be compared to a machine.
11. Mind est reducible to symbol manipulation.
12. A model which describes the augmented human must necessary be of biological inspiration.
13. An organ can be compared to a machine.
14. Behaviour cans be described as a problem resolution situation.
15. Environnement can be viewed solely as a stimuli source.
16. It is possible to understand the behaviour of an individual regardless of its nervous system.
17. Brain can be described as a computer.
18. We can describe the fonctionnement of an organism by a group of functions.
19. Augmented human is limited to enhance its natural functions.
20. Perception is a passive acquisition of information.
21. Capacity enhancement is the begining of a robotization of humanity.
22. Restoring a damaged biological function is enhancement.
23. Logic can account for the whole mind.
24. Sensorial information is tranformed during perception.
25. Information from the environnment can be regarded as a stimulus.
26. It is possible de reduce the beahviour of a neuron to that of a logical operator.
27. Enhanced humanity is linked to new functions.
28. Capacity enhancement impose deep modifications in the subject.

Fig. 2. Questionnaire used in this research

6 Results

6.1 Description of the population

After closing of the questionnaire, we had 150 complete sets of answers divisible in three categories (medical practitioners : 36 , ergonomists : 59 , others : 55). This division of the population doesn't impact the study in so far as it is used in the very end of it in order to obtain the final results displayed in figure 4.

Concerning our medical population, its size is of 36 which allowed us to consider our goals as achieved and validate the population since the size of the general population is sufficient. The "other" category means to represent the non expert part of the population and its number is explained by the large opening of the survey via the plateform.

In the global population, we find two men for a woman and the majority of the subjects has an age between 18 and 55 years with a spike between 25 and 30 years. In the light of socio-demographic researches concerning the scientific population in France, this enables us to qualitatively validate the representativity of general population.

6.2 Results

i. Statistical analysis (see figure 4) show that 25% of the subjects can not be attached to a canonical tradition. This is explained by the fact that these subjects do not provided sufficiently structurated sets of answers or have provided idiosyncrasical structured sets of answers. This result was fully expected because of the nature of our population, the reader has to remember here that the participants were asked to quantify their accordance with a set of propositions which are not from thier field of expertise. This is coherent with the fact that some of them have no structurated approach about our domain. The counterpart of this is the fact that 75% of our population can be attached to a canonical tradition.

ii. Clustering (see figure **??**) shows that (h0) is verified in so far as, when dividing the general population, the level of structurality tends to increase significatively.

iii. Figure 4 shows that seven different groups can be found inside our general population. Thus we can validate (h1). It is interesting to note that there is no dominant tradition.

iv. Appart for two canonical traditions (behaviourism and mechanistic integrativism), the three categories are represented in each tradition. Moreover, medical practitioners are absent from behaviourism and mechanistic integrativism which are two traditions which are deconnected from biological considerations. No professional category has the exclusivity of a tradition or is secluded in one of them. We can then validate (h2).

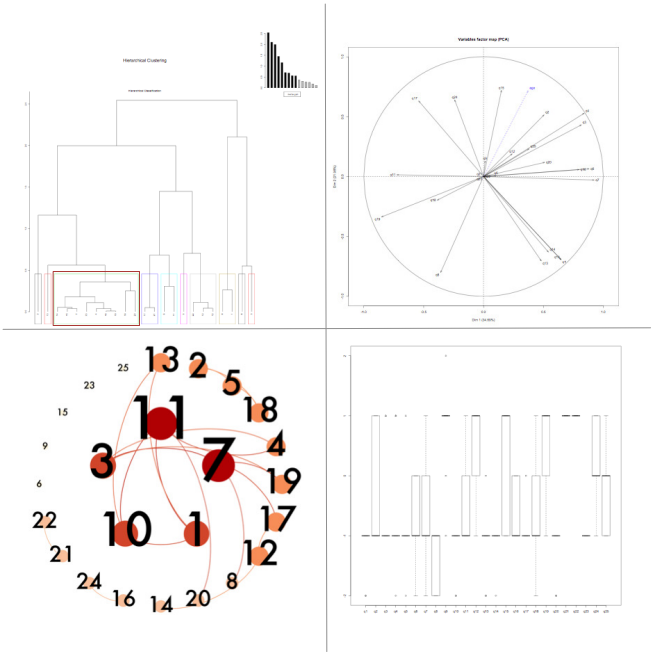


Fig. 3. Examples of results for a coherent set of answers.

Hierarchical Clustering : The upper left part of the figure shows the result of a hierarchical clustering in one of our sets of answers. Hierarchical clustering is based on the euclidean distance between indviduals considered as a vector with their answers as coordinates. The highlightened group is the group used for this example.

Principal Component Analysis : The upper right part of the figure shows the PCA results. PCA allows to describe a set of observed variables with a number of new variables called principal components by projecting them in a factorial plan. Two points which are not in the immediate proximity with the circle are not considered because of the projection. The more variables are near the circle, the more there is a principal component which can explain the distribution of the answers and the more coherent is the group.

Correlation Graph : The lower left part of the figure shows the correlation graph. This graph is builded upon the correlation matrix of all the answers. This graph allows us to determine in a set of answers which one are the most influential in the sense that modifying one of them is susceptible to modify the entire set. The five more influential answers are displayed in the inner circle.

Boxplots :The lower right part of the figure shows the boxplots for a set of answers. As we are in the case of a coherent set, we can see that for some answers there is a consensus. In complement to the correlation graph, these boxplots allow us to qualitatively determine what are the most important answers for the considered group.

v. We have related some subjects with integrativism by the way of our grid of canonical traditions. Medical practice contains already an integrative dimension in its modes of thinking thus permitting us to validate (h3) because integrativist tradition is not that of only medical practitioners.

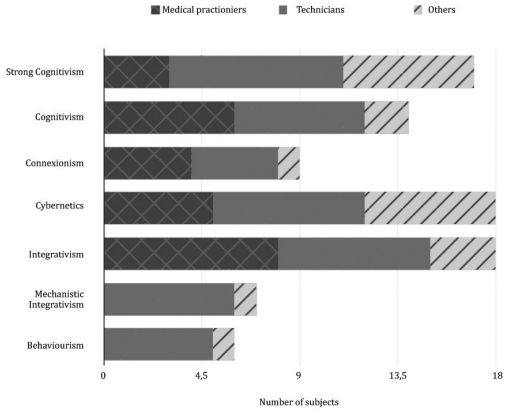


Fig. 4. Canonical traditions repartition

This figure displays the final results of the survey. It gives us a qualitative insight of the clustering of the general population. Subjects non related to a canonical tradition (25% of the answers) are not represented here because they do not form a coherent group. Is is interesting to note that the "others" category is never a majority of a tradition which leads us to conclude that there is not some tradition related to non expertise of the subject. It is also important to not that there are no medical practitioners in the mechanistic integrativism and in the behaviourism which are two traditions who doesn't have a biological dimension.

7 Conclusions

There is not a unique way to conceive what is a Human Machine System, even inside a given domain of speciality. This also means that, when designing Human Machine Systems, important choices must be made concerning which conceptual framework are used because they can't be interchanged and are not necessary intercompatible.

A grounding framework is meaningful and influences the professional practice of the subject without being a part of it. It is based upon the nature of the objects of the subject's practice. We call that set of ideas *ad hoc conceptual considerations*.

Ad hoc conceptual considerations are an important part of science and engineering because they participate to the practice from a more or less conscious position and are then important to consider in so far as their possible lack of consistancy can potentially lead to serious safety issues.

Although the usual traditions are present inside the catalog of *ad hoc conceptual considerations*, a significant part of the population is relatable to the integrativist tendancy which is not already structured around a theory. As we have shown in [11], integrativism is presently more a way to look at things than a structurated scientifical doctrine. It is nonetheless a good starting point to build a comprehensive and coherent paradigm in human related sciences and engineering taken as a whole field of expertise with its own methodologies and values.

References

1. Bertalanffy, L. V. : General System Theory: Foundations, Development, Applications. George Braziller, Inc (1969)
2. Chauvet G.A. : Hierarchical functional organization of formal biological systems: a dynamical approach. I. The increase of complexity by self-association increases the domain of stability of a biological system. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences 1290: 425–444 (1993)
3. Chauvet G.A. : Hierarchical functional organization of formal biological systems: a dynamical approach. II. The concept of non-symmetry leads to a criterion of evolution deduced from an optimum principle of the (O-FBS) sub-system. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences 1290: 445–461 (1993)
4. Chauvet G.A. : Hierarchical functional organization of formal biological systems: a dynamical approach. III. The concept of non-locality leads to a field theory describing the dynamics at each level of organization of the (D-FBS) sub-system. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences 1290: 463–481 (1993)
5. Chauvet G. : Comprendre l'organisation du vivant et son évolution vers la conscience. Vuibert (2006)
6. Edelman G.M. : Bright air, brilliant fire: on the matter of the mind. BasicBooks (1992)
7. Edelman G.M. : Wider than the sky: the phenomenal gift of consciousness. Yale University Press (2004)
8. Fass, D. : Augmented Human Engineering: A Theoretical and Experimental Approach to Human Systems Integration. Systems Engineering-Practice and Theory, 257–276 (2012)
9. Gibson J.J. : The Ecological Approach to Visual Perception. Boston: Houghton Mifflin (1979)
10. Likert, R. : A Technique for the Measurement of Attitudes. Archives of Psychology 140: 1-55 (1932)
11. Nazin, R. : Quels fondements épistmologiques pour l'humain machine ? Université de Lorraine, Master Thesis in Cognitive Science (2014)

B

Projet de collaboration LORIA NASA

NASA-LORIA Collaboration Document 1/26/15; 12:28 PM
Brian Gore (NASA) and Didier FASS (LORIA)

LORIA--NASA – Draft 1

"Human-Machine" (HM) is a concept integrating cyber-physical systems and biological systems. As a scientific challenge, HM is about the conception of a theoretical framework dedicated to human-machine interaction and integration, its modeling, from epistemology to formal to empirical (experimental) methods. As a practical challenge, HM is about the correct design for enhancement and reliable engineering of human systems integration, from human-machine interaction to sociotechnical system, their behavior and performance.

International collaboration among the National Aeronautics and Space Administration (NASA), the European Space Agency (ESA), the French Aerospace Lab (ONERA) Salon de Provence Research Center, the Defense Advanced Research Project Agency (DARPA), and the Loraine Laboratory of Research in Computer Science and it Application (LORIA) will provide opportunities to explore the complex unions of cyber and physical systems. This will be accomplished through the conduct of collaborative research to identify primary variables that drive human variability (we also may able to study the concepts of STABILITY and VIABILITY) and develop technologies and countermeasures (and enhancements) that will allow humans to travel safely and productively in the aerospace environment. Specifically, our intent is to determine how to *predict* when the human should be brought into or removed from the active control loop in the system operations (according a system engineering principle: system of systems or Human Systems Integration) in following research areas:

1) identify and improve the risk profile associated with cognitive (and sensori-motor) performance changes of astronauts in space (hypothetico-deductive capabilities of human in flight operations and how to measure an operator's ability to reason and its variability), which leads into development of various training paradigms that are suited to the astronaut's sensorimotor and cognitive performance profile

2) examine/discuss directions for designing and training "human systems integration",

3) develop a new approach to bioengineering that focuses on biological incompatibilities, (to be define)

4) research the (sensorimotor, cognitive and emotional…) cognitive capabilities of individual operators, and the team (sensorimotor, cognitive and emotional…) cognitive performance,

5) augment the respective HCI portfolios by researching whether life/living systems can be mechanized (this must be the key point to discuss. For Loria the main problem is not the mechanization of living systems but the "biologization" of artifacts (training, procedure and technical systems…) , and thereby reducing

inherent variability brought to system performance by the human operator (thereby reducing the risk profile of inadequate HCI), Hierarchically ? : 1- sensorimotor, 2- emotional, 3- cognitive

6) augment robotic operations (UAV) research thereby reducing the risk of inadequate design of human and automation/robotic integration (HARI), and

7) augment the understanding of human robotic interaction and teaming through interaction and wearable monitoring systems to predict which astronaut is most healthy for conducting docking task (e.g. LORIA has discussed to develop algorithms for the DLR / Russian Space Agency).

8) examine/discuss directions for procedure and task scheduling over short duration and longer duration missions

9) increase educational opportunities through LORIA and the Professors Didier Fass and Dominique Mery.

It is expected that the collaboration will involve NASA (Brian Gore), ONERA (Laurent Chaudron; French Aerospace Lab, clearance ok) and Laura Andre-Boyet (ESA - to be confirmed) as they have been involved in the discussions and have expressed interest in the collaboration (through a number of discussions and emails). The collaboration is anticipated to commence with a co-organized session at the 2015 HCII, authors will be asked to discuss the relevance of the "human machine" concepts from human factors and ergonomic engineering to integrative bioengineering as it could be applied to aerospace, transport, and health. Some limited funds from LORIA are available for NASA per diem in France (Gore) and LORIA per diem in USA (Fass).
Opportunities for student-exchange are also being pursued.

National Aeronautics and
Space Administration

Ames Research Center
Moffett Field, CA 94035-1000

April 30, 2015

Prof Didier Fass
Associate Professor
ICN Business School and LORIA INRIA
Nancy University, France

SUBJECT: Invitation of Dr. Didier Fass

Dear Professor Fass,

The Human Systems Integration Division of the National Aeronautics and Space Administration (NASA), through its Man-machine Integration Design and Analysis Laboratory (MIDAS), would like to extend an invitation for you to come visit to the MIDAS laboratory, and to engage in other scientific discussions when you are in the United States in the month of July/August, 2015.

We are eager to engage our engineers and system designers in discussions about the institute at LORIA (Lorraine Research Laboratory in Computer Science and its Applications) and how Human Systems Integration issues are considered in the development of complex human-automation system designs. We anticipate these discussions will elaborate on the issues that need to be considered when developing complex systems for operations in extreme environments at the 1st LORIA-NASA Workshop on Safety Critical Human-System Integration Designs in the Aerospace, Defense, and Medical Operational Domains being held in LORIA in June 2015. Further, we anticipate that these meetings will allow NASA and LORIA to explore collaborative research opportunities for concepts and technologies that allow humans to travel safely and productively in the aerospace environment. It is anticipated that this site visit will lead to greater collaboration that in turn will advance the state-of-the art of computer-based design methods.

Sincerely,

Alonso Vera,

Alonso Vera, Ph.D.
Chief, Human Systems Integration Division
NASA Ames Research Center
650 604 6294

Résumé

Les travaux décrits dans ce document ont pour thème l'homme augmenté. Les enjeux en sont d'une part la recherche d'une épistémologie de l'humain machine et d'autre part le développement d'un cadre de description ou de modélisation des systèmes humain machine pour son ingénierie de conception. Appliquée à la conception des systèmes homme machine, l'épistémologie cognitiviste réduit classiquement l'humain (par analogie) à des propriétés physiques, logiques ou algorithmiques et les interactions humain machine à un problème de calcul et de design ergonomique d'interface. L'épistémologie intégrativiste, dans laquelle se situe mes travaux de recherche, est pour sa part inspirée par l'éthologie, la biologie et la physiologie intégrative théorique. Elle définit le concept d'humain machine comme l'ensemble résultant de l'organisation hiérarchique structurale et des couplages dynamiques de deux catégories de systèmes de nature différente : l'humain en tant que système biologique et anthropologique, et la machine en tant système technique physique, logique ou cyber-physique. Les principaux résultats de mes recherches concernent la maïeutique et la modélisation de l'expertise cognitive et sensori-motrice pour la réalisation de base de connaissances d'aide au diagnostic et d'aide aux gestes techniques, la conception d'environnements virtuels (de réalité virtuelle et de réalité augmenté) d'aide à l'action et leur évaluation par des marqueurs comportementaux liés au geste lui-même ainsi que les concepts et les principes généraux d'une théorie intégrative appliquée à la modélisation des systèmes humain machine médicaux, aérospatiaux et de défense.

C'est la conception sûre et la construction correcte des systèmes d'assistance et d'aide à l'activité humaine, de l'aide au diagnostic à l'aide à l'action, qui est au cœur de mes travaux et mon projet de recherche pluridisciplinaire a pour but la validation des principes théoriques et des méthodes de co-modélisation intégrative de l'humain machine nécessaires à la bio-ingénierie de conception de systèmes artificiels bio-compatibles, bio-intégrables et éthiques pour l'homme augmenté.

Mots-clés: homme augmenté, humain machine, intégration humain système, épistémologie, modélisation, systèmes sécurité-critiques, correctness by construction, bio-ingénierie

Abstract

The studies described in this document adress the topic of the so-called "augmented human". Its main issues are exploring human machine epistemology and developing a framework in order to describe or model human machine systems functionning for the purpose of its engineering design. Classical cognitive epistemology as applied to human-machine systems design draw analogies between human and a set of physical or logical properties or algorithms, with the view to reduce human-machine interactions to a computational outcome and to an ergonomic interface design issue. Integrativist epistemology, and my scientific approach takes place there, should be deduced from ethology, biology and theoretical integrative physiology. My main outcome of my research concern maieutic approach for cognitive and sensori-motor experise modeling in developing knowledge based system to help in diagnosis and technical gesture, to design virtual environment in order to support action and their assement method using on behavioral markers and gesture analysis itself, as well as theoretical concepts and principles of an intégrative theory applied to medical, aerospace and defense human machine modeling. The human machine concept has to be defined as a whole and as a result of the combination of both the hierarchical structural organization and the dynamical coupling of two classes of systems, which are of different nature : human as a biological and anthropological system, and a machine as a technical, physical, logical or cyber-physical system.

Safe design and correctness by construction of assistance or aid systems for human activity, from diagnostic aid to action aid, are therefore at the heart of my work. The aim of my interdisciplinariy research project is validating both human machine theoretical principles and integrative co-modeling methods required for bio-compatible, bio-integrable and ethical artificial systems bio-engineering design for "augmented human".

Keywords: augmented human, human machine, human system integration, epistemology, modeling, safety-critical systems, correctness by construction, bio-engineering