



HAL
open science

Conception de systèmes mécatroniques pour l'interaction humaine

Cédric Anthierens

► **To cite this version:**

Cédric Anthierens. Conception de systèmes mécatroniques pour l'interaction humaine. Automatique / Robotique. Université de Toulon, 2020. <tel-02999696>

HAL Id: tel-02999696

<https://hal.science/tel-02999696v1>

Submitted on 11 Nov 2020

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.



HAL Authorization

Habilitation à Diriger les Recherches

Conception de systèmes mécatroniques pour l'interaction humaine

Soutenue le 8 juillet 2020 par
Cédric ANTHIERENS

Jury

Président : Eric BIDEAUX (PU -INSA de Lyon)

Rapporteurs :

— Christine PRELLE (PU - Université Technologique de Compiègne)

— Gérard POISSON (PU - Université d'Orléans)

— Stéphane VIOLLET (DR - Université d'Aix Marseille)

Directeur : Vincent HUGEL (PU - Université de Toulon)

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| 1 Synthèse de carrière | 9 |
| 1.1 Résumé de CV | 10 |
| 1.2 Activités de recherche | 11 |
| 1.2.1 Résumé de thèse | 11 |
| 1.2.2 Travaux de recherche en qualité ATER | 11 |
| 1.2.3 Travaux de recherche en qualité de Maître de conférences | 11 |
| 1.3 Publications | 13 |
| 1.3.1 Activités au sein du laboratoire COSMER | 16 |
| 1.3.2 Animation de recherche et rayonnement | 17 |
| 1.3.3 Valorisation de la recherche | 17 |
| 1.4 Activités pédagogiques | 18 |
| 1.4.1 Fonctions d'Encadrement | 18 |
| 1.4.2 Activités d'enseignement | 19 |
| 1.4.3 Présentation synthétique des enseignements | 20 |
| 1.4.4 Création de formation | 21 |
| 1.4.5 Bilan des activités pédagogiques | 23 |
| 2 Réalité Virtuelle | 27 |
| 2.1 De l'historique à la pratique | 28 |
| 2.2 Les interfaces de locomotion pédestre | 29 |
| 2.3 L'analyse de la marche | 32 |
| 2.4 Conception de l'interface de marche | 33 |
| 2.4.1 Synthèse de conception | 37 |
| 2.5 Consigne et commande de l'interface de marche | 38 |
| 2.5.1 Trajectoire de la pédale durant l'appui | 39 |
| 2.5.2 Synthèse de commande | 41 |
| 2.6 Expérimentation de l'interface de marche in situ | 43 |
| 2.7 L'apport de la conception mécatronique pour la réalité virtuelle | 45 |
| 2.8 Perspectives de l'activité | 46 |
| 2.9 Communications produites sur le domaine | 46 |
| 3 Domotique | 49 |
| 3.1 Introduction et problématique | 50 |
| 3.2 La perception visuelle | 51 |
| 3.3 Capteur de conditions visuelles | 54 |
| 3.3.1 Spécification du capteur | 54 |
| 3.3.2 Capteur de confort visuel flou | 56 |
| 3.3.3 Validation du capteur | 58 |
| 3.4 Conception de salle pour la régulation de confort visuel | 59 |
| 3.4.1 Modèle du store vénitien | 59 |
| 3.4.2 Contribution des stores sur les paramètres optiques de la pièce | 62 |
| 3.5 Pilotage hiérarchisé | 62 |
| 3.5.1 Consignes et contraintes | 63 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.5.2 | Commandes par niveau | 63 |
| 3.6 | Conclusion sur la gestion du confort visuel | 66 |
| 3.7 | Communications produites sur le domaine | 68 |
| 4 | Energétique du bâtiment | 69 |
| 4.1 | Introduction | 70 |
| 4.2 | Le système bâtiment | 70 |
| 4.2.1 | La notion de confort | 71 |
| 4.2.2 | L'architecture de contrôle | 71 |
| 4.3 | Modélisation et simulation du bâtiment | 73 |
| 4.3.1 | Méthodes de simulation | 73 |
| 4.3.2 | Modèle climatique | 74 |
| 4.3.3 | Spécifications du modèle de simulation | 74 |
| 4.3.4 | Modèles des équipements de confort | 75 |
| 4.3.5 | Modèle thermique de bâtiment et de la pièce | 77 |
| 4.3.6 | Modèle optique de la pièce | 80 |
| 4.3.7 | Résultats de simulation | 81 |
| 4.4 | Contrôle du bâtiment | 82 |
| 4.4.1 | Contrôle des actionneurs | 83 |
| 4.4.2 | Contrôle thermique du bâtiment | 85 |
| 4.4.3 | Contrôle au niveau de la pièce | 88 |
| 4.5 | Résultats de commande | 90 |
| 4.5.1 | Commande thermique du bâtiment | 90 |
| 4.5.2 | Contrôle du confort au sein des pièces | 90 |
| 4.6 | Conclusions sur la gestion énergétique sous contrainte de confort | 93 |
| 4.7 | Communications produites sur le domaine | 93 |
| 5 | La conception mécatronique de systèmes marins | 95 |
| 5.1 | Introduction | 96 |
| 5.2 | Assistant de guidage pour personne à déficience visuelle | 96 |
| 5.3 | Besoins pour le kayakiste et spécifications du GSN | 97 |
| 5.4 | Conception mécatronique | 98 |
| 5.5 | Algorithme de navigation | 99 |
| 5.6 | Essais de navigation en mer | 100 |
| 5.7 | Analyse des métriques de navigation | 101 |
| 5.8 | Gestion des ombilicaux de ROV | 104 |
| 5.9 | Modélisation mécanique de l'ombilical | 104 |
| 5.10 | L'enrouleur de câble | 106 |
| 5.11 | Communications produites sur les domaines | 108 |
| 6 | Perspectives de recherche | 109 |
| 6.1 | En attendant le futur | 110 |
| 6.2 | Futur à vue | 111 |
| 6.2.1 | Perspectives de recherche sur le GSN | 111 |
| 6.2.2 | Portabilité | 111 |
| 6.2.3 | Retour sensoriel | 111 |
| 6.2.4 | Algorithme de guidage | 112 |
| 6.3 | Perspectives de recherche sur la gestion de l'ombilical | 113 |
| 6.3.1 | Conception de l'USV | 113 |
| 6.3.2 | Enrouleur actif | 115 |
| 6.3.3 | Modèles de mission | 115 |
| 6.4 | Les robots amphibies | 115 |
| 6.5 | Conclusions sur ces perspectives | 116 |

Préambule

L'écriture de ce document a nécessité de synthétiser et structurer mon parcours dans le monde de la recherche qui n'a pas toujours été très linéaire (problème d'automaticien!). Avec un peu de recul, ces multiples expériences qui m'ont fait graviter autour de la robotique en passant par la mécanique et l'automatique, sont le fruit de passion et de choix de formation expliqués dans ce petit historique.

De formation en Génie Mécanique, je me suis tourné vers un DEA d'Automatique Industrielle en 1999 à l'INSA de Lyon. Ceci m'a permis de poursuivre en thèse au Laboratoire d'Automatique Industrielle (Ampère UMR5005) sur la microrobotique sous la direction du Professeur Maurice Bétemps.

J'ai été recruté en qualité de maître de conférences en septembre 2000 (après une année d'ATER à l'IUT GMP d'Aix-Marseille) à Supméca Toulon (centre principal à St Ouen) pour renforcer l'axe mécatronique. Accueilli dans cette équipe pédagogique de 4 enseignants-chercheurs et d'un professeur agrégé, il a fallu rapidement assumer des responsabilités pour contribuer à l'évolution de ce centre qui recrutait les étudiants sur le Concours Commun Polytechnique (CCP) afin de former plus de 55 ingénieurs par an.

Cet investissement pédagogique s'est traduit par la création (et la responsabilité) d'un parcours de 2^{ème} et 3^{ème} années de cursus d'Ingénieur sur la Robotique et les Systèmes Mécatroniques (RSM) en partenariat avec l'ISEN Toulon en 2002. Ce parcours a formé une vingtaine d'étudiants jusqu'en 2016 où Supméca Toulon et l'ISITV ont fusionné pour devenir Seatech, Ecole d'Ingénieurs de l'Université de Toulon recrutant sur CCP.

A Supméca Toulon, mes activités de recherche au LISMMA EA2336 (Quartz EA7393) se sont d'abord focalisées sur la Réalité Virtuelle et plus spécifiquement sur la conception d'une interface sensorimotrice pour la marche (co-encadrement de la thèse de Yves Dupuis - 2006). Le départ prématuré du Professeur responsable de cette thématique a signé la fin de l'activité, obligeant à se réorienter vers un nouveau domaine de recherche qu'est la domotique. J'ai donc co-encadré deux doctorants CIFRE (Maximilien Leclercq 2009, Etienne Arnal 2013) sur la gestion de l'énergie dans le bâtiment sous la direction du Professeur Eric Bideaux du laboratoire Ampère de l'INSA de Lyon.

La création de Seatech en 2014 a nécessité un grand investissement sur les plans pédagogique et de recherche. Dès le recrutement du Professeur Vincent Hugel (actuel directeur du laboratoire COSMER) à l'Université de Toulon, j'ai participé en novembre 2014 à la création du laboratoire COSMER EA7398. Celui-ci présente un 1^{er} axe sur la conception et le développement durable, et un 2nd sur la robotique marine et sous-marine dans lequel je m'inscris.

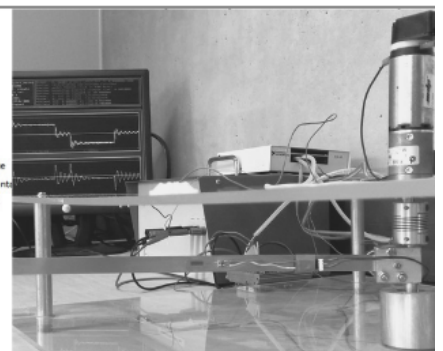
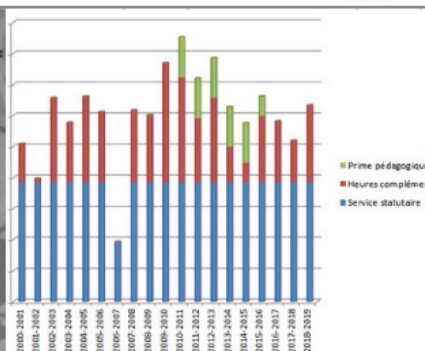
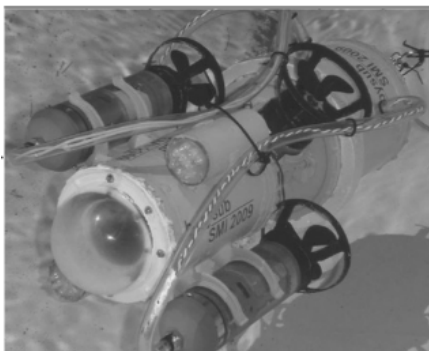
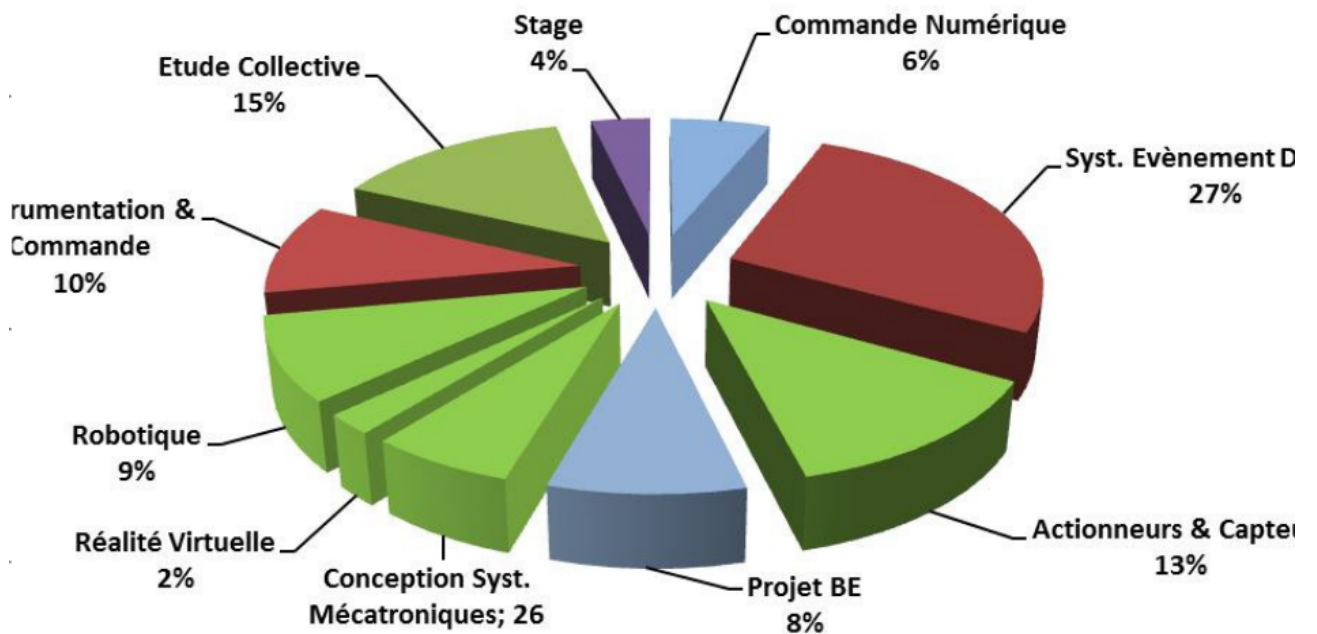
Ce laboratoire rassemble 8 enseignants-chercheurs permanents, 1 enseignant-chercheur associé, 2 chercheurs contractuels, 1 technicien et 6 doctorants. L'équipe robotique animée par Vincent Hugel rassemble 2 Professeurs des Universités (dont 1 associé), 3 maîtres de conférences et 4 doctorants. Les thèmes de recherche en partenariat et concertation avec des acteurs locaux et nationaux (Ifremer, DGA, SubSeatech, Naval Group...) portent notamment sur la cordée de robots sous-marins ou le franchissement de la zone de surf par un ROV / AUV¹. Le laboratoire met aussi en avant un axe de conception innovante durable qui oeuvre sur les méthodologies d'éco-conception ainsi que sur l'optimisation des produits créés par fabrication additive. Le lien entre ces 2 axes se concrétise par l'étude de la fabrication additive assistée par robotique.

Les retours très positifs des membres de l'HCERES (audit du laboratoire COSMER en décembre 2016) nous encouragent à poursuivre dans cette voie avec la dynamique actuelle.

1. Remotely Operated Vehicle and Autonomous Underwater Vehicle

Chapitre 1

Synthèse de carrière



- Membre des jurys d'admission et de passage pour Seatech et Master Ingénierie des Systèmes Complexes de l'Université de Toulon.
- Participation à 7 **comités de sélection** de Maître de Conférences à l'INSA de Lyon (GE, GMC) et IUT d'Aix en Provence (GMP).

1.2 Activités de recherche

1.2.1 Résumé de thèse

La microrobotique comme les microsystèmes intègrent de plus en plus notre quotidien. Les domaines de pointe (médical, défense,...) ne sont plus les seuls concernés, car les micro-systèmes atteignent la grande consommation (micro-capteurs et actionneurs pour l'automobile, IoT). La création de nouveaux systèmes, et en particulier de nouveaux micro actionneurs, permet de conquérir de nouvelles applications.

La maintenance nucléaire est entre autres un de ces domaines. Par exemple, l'inspection de tuyaux et conduites doit faire appel à des systèmes de petites dimensions. Notre étude s'est basée sur la conception d'un micro-robot à actionneur électropneumatique pour l'inspection intratubulaire. L'environnement des générateurs de vapeur est hostile et impose au robot de se déplacer dans des tubes verticaux de 17 mm de diamètre. La conception originale du micro-robot du type "*inchworm*" est axée sur un actionneur à soufflets métalliques qui présente l'avantage de posséder un très bon rapport puissance / volume. De plus, cet actionneur de par sa conception n'engendre que de très faibles frottements durant son fonctionnement, ce qui lui procure une bonne précision de positionnement. Le système développé a été modélisé et testé aux niveaux de ses modules de blocage aux parois et de son module d'allongement. La simulation confirme les performances escomptées lors de la conception. Le robot est capable de transporter une charge supérieure à 1 kilogramme à l'intérieur d'un tube réel de centrale nucléaire. Sa précision de positionnement sur une course de 90 mm est inférieure à 60 μm .

La commande utilisée pour parvenir à ces résultats utilise un correcteur PID bien qu'une commande par retour d'états soit envisagée.

1.2.2 Travaux de recherche en qualité ATER

En 1999-2000, j'ai occupé un poste d'ATER complet au département GMP de l'IUT d'Aix en Provence et j'ai travaillé aux côtés de Jean-Marc Linares et de Jean-Michel Sprauel sur des problématiques de tolérancement fonctionnel au sein d'une équipe qui a désormais rejoint l'Institut des Sciences du Mouvement Etienne-Jules Marey de Luminy. Cette activité très intéressante m'a replongé dans le domaine de la mécanique (fabrication en enseignement) et plus précisément dans la conception, le tolérancement et les contraintes d'assemblage.

Cette expérience m'a servi par la suite pour illustrer et argumenter mes enseignements en conception et fabrication mécanique destinés aux élèves ingénieurs notamment.

1.2.3 Travaux de recherche en qualité de Maître de conférences

Dès mon intégration au sein de Supméca Toulon (devenue Seatech), mon activité scientifique s'est concentrée sur 3 axes qui ont trait à la robotique et à la conception de systèmes mécatroniques en interaction avec l'humain.

De 2001 à 2006, j'ai travaillé au LISMMA (laboratoire de génie mécanique de Supméca devenu Quartz) sur la conception et le pilotage d'interfaces comportementales (Fig.1.3) pour la **réalité virtuelle** (1 thèse CIFRE co-encadrée à 50%). De 2007 à 2013, mes travaux se sont complètement réorientés vers la **domotique** et la gestion de l'énergie dans le bâtiment tertiaire (2 thèses CIFRE co-encadrées à 50%).

Enfin depuis 2013, avec la naissance de Seatech, (Ecole d'ingénieur de l'Université de Toulon) , mon activité de recherche a pris un nouveau cap pour s'inscrire dans la création d'un nouveau laboratoire (COSMER EA 7398) centré sur la **robotique marine et sous-marine** (1 thèse CIFRE co-encadrée à 40%). Ces 3 thèmes sont abordés chronologiquement ci-dessous.

Réalité Virtuelle

Pour faire le lien avec ma thèse en microrobotique, j'ai travaillé sur la conception d'une interface haptique pour la micromanipulation par adhérence (Fig.1.1) développée au LRP6 (actuellement ISIR UMR7222) par Stéphane Régnier [Yushchenko et al., 2004] [Anthierens et al., 2004] [Yushchenko et al., 2003] [Anthierens et al., 2001] [Anthierens et al., 2002]. Ce thème a fédéré 3 MCF de l'équipe en répartissant le travail sur le **simulateur**, sur **l'interface sonore** et, pour ma part, sur le **rendu haptique** (Fig.1.3 [Anthierens and Mestre, 2008]). Au cours de ces travaux, j'ai co-encadré un étudiant en DEA en collaboration avec Stéphane Régnier ainsi que 4 autres étudiants en DEA et stage de formation d'ingénieur.

Pour étendre le spectre d'application, nous avons, en compagnie de Jean-Paul Frachet, co-encadré (50%) une thèse CIFRE avec le CETIM qui portait sur la conception d'une interface comportementale de marche pour l'immersion virtuelle (Fig.1.2) [Dupuis et al., 2006b] [Dupuis et al., 2006a] [Dupuis et al., 2005a] [Dupuis et al., 2005c] [Anthierens and Dupuis, 2005] [Dupuis et al., 2005b].

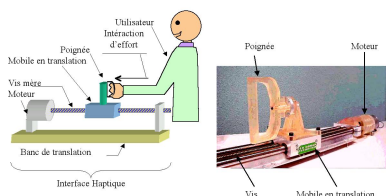


FIGURE 1.1 – Haptique de micromanipulation



FIGURE 1.2 – Interface de marche

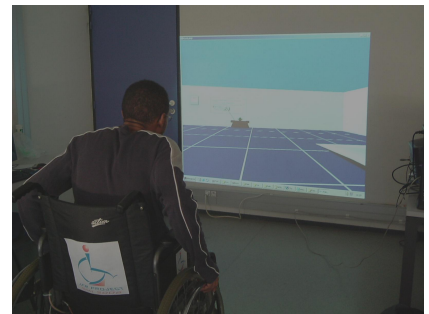


FIGURE 1.3 – Fauteuil roulant immersif

En 2007, par le biais d'un Congé de Recherche et de Conversion Thématique (CRCT), j'ai travaillé durant 6 mois dans le laboratoire de réalité virtuelle (VIRtual Reality Application Research Team - VIRART) de l'Université de Nottingham sur trois projets traitant des facteurs humains.

- **CoSpaces** : Conceptualisation du travail collaboratif pour l'aéronautique (AIRBUS)
- **DiFac** : Simulateur d'entraînement pour le travail collaboratif.
- **MeDi** : Développement d'une interface de réalité virtuelle pour l'orthoptique.

Ce CRCT m'a beaucoup apporté sur le fond pour progresser dans des domaines liés aux facteurs humains en production de groupe ou en application médical notamment. Cet acquis a été très utile pour moi par la suite pour aborder les contraintes de la perception humaine en domotique (capteur de confort visuel) ou vis-à-vis du handicap (voir Guide Sensoriel de Navigation p16).

Par ailleurs, j'ai appris énormément également en communiquant en anglais tous les jours dans un environnement de travail cosmopolite.

Domotique

Lors du changement de thématiques de recherche du laboratoire, j'ai initié une activité en domotique avec Sherpa Engineering par le biais de stagiaires que j'ai encadrés en DEA et en stage de fin d'études. Le thème d'étude s'est focalisé sur la gestion de l'énergie dans les bâtiments tertiaires via le pilotage de stores vénitiens [Leclercq et al., 2011, Leclercq et al., 2008a, Leclercq et al., 2008b, Leclercq et al., 2009, Der Arslanian and Anthierens, 2009, Leclercq et al., 2007] (Fig.1.4 et 1.5). Ce projet a été labellisé par le pôle de compétitivité Cap Energie et a permis à Maximilien Leclercq de poursuivre en thèse sous l'encadrement d'Eric Bideaux (directeur de thèse – PU INSA de Lyon – Ampère) et moi-même (encadrement à 50%).

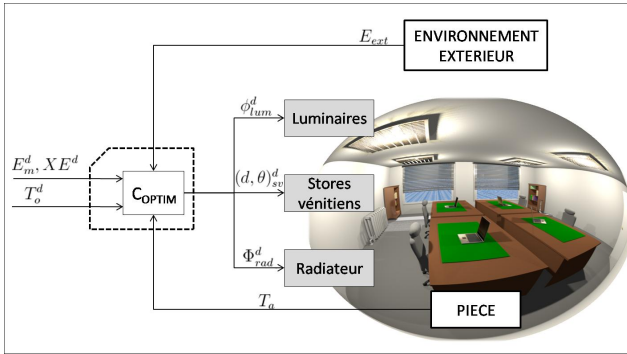


FIGURE 1.4 – Modèle optique de pièce

Ce premier sujet d'investigation a porté sur une étude égocentrée du confort visuel de l'occupant dans le bâtiment tandis qu'une seconde thèse a poursuivi cette étude sur un aspect plus techno-centré de la domotique en gérant la consommation d'énergie dans le bâtiment sous contrainte de confort [Arnal et al., 2011b, Arnal et al., 2011c]. Cette deuxième thèse dans la continuité, effectuée par Etienne Arnal, a été co-encadrée par Éric Bideaux et moi-même (encadrement à 50%).

Robotique Marine et Sous-marine

Avant la création de COSMER J'ai travaillé en robotique marine et sous-marine en proposant des sujets de projet d'Etude Collective aux étudiants de dernière année d'école d'ingénieur de l'ISEN et de Supmeca qui suivaient le parcours que je dirigeais. Ainsi d'après le cahier des charges de la société SubSeatech, nous avons entièrement conçu et réalisé un mini ROV denommé BabySub (Fig.1.6)(<https://www.youtube.com/watch?v=8d-WPooz-NQ&feature=youtu.be>).

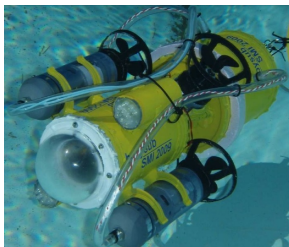


FIGURE 1.6 – Le ROV *Babysub*



FIGURE 1.7 – Robot voilier *MARIUS*



FIGURE 1.8 – Guide Sensoriel de Navigation pour kayakiste non-voyant

Quelques années plus tard en 2013, c'est la conception et la réalisation d'un robot voilier dénommé MARIUS (Fig.1.7) qui a illustré le savoir-faire des élèves ingénieurs du parcours.

Ces deux projets, que j'ai encadrés, ont été menés sur 4 mois par des étudiants de dernière année de cursus Supméca. Le projet MARIUS a été valorisé par 2 communications en congrès internationaux [Anthierens et al., 2013, Naveau et al., 2013]. Mon activité dans le domaines des robots voiliers s'est poursuivie en dirigeant 2 autres projets sur Avalon et MARIUS en 2014 et 2015.

1.3 Publications

- 6 articles de revues internationales
- 19 articles de congrès internationaux avec comité de lecture
- 13 communications nationales

Les auteurs encadrés sont des étudiants que j'ai co-encadrés en thèse, DEA ou Master 2.

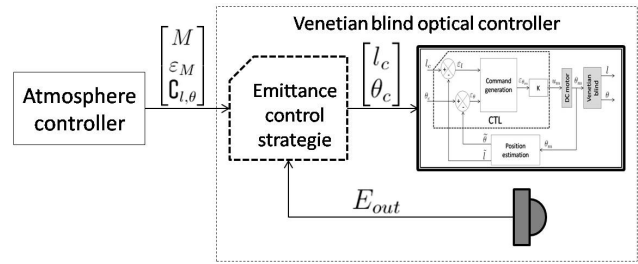


FIGURE 1.5 – Commande sous contrainte de confort

Articles de revues

[Anthierens et al., 2018], **Anthierens, C.**, Groux, D, and Hugel, V Sensory navigation guide for visually impaired sea kayakers, *Journal of Field Robotics*, 2018, Vol.35, N.5, pp732-747.

[Leclercq et al., 2011] **M. Leclercq**, **E. Arnal**, **C. Anthierens**, and E. Bideaux. Control of visual conditions for open-plan offices. *Mechatronics*, 21(3) : 581–593, 2011.

[Anthierens and Mestre, 2008] **C. Anthierens**, **M. Leclercq**, E. Bideaux, and L. Flambard. A smart sensor to evaluate visual comfort of daylight into buildings. *International Journal of Optomechatronics*, 2(4) :413–434, 2008.

[Dupuis et al., 2006b] **Y. Dupuis**, J.-L. Impagliazzo, **C. Anthierens**, and D. Millet. Design of a mechatronic interface for human gait. *Journal Europeen des Systèmes Automatisés*, 40(3), 2006.

[Linares et al., 2002] J.M. Linares, **C. Anthierens**, and J.M. Sprael. Synthesis of tolerancing by functional group. *Journal of Manufacturing Systems*, 21(4), 2002.

[Anthierens, 2001a] **C. Anthierens** and M. Bétémps. Design and control of a pneumatic micro-robot for in-pipe inspection of nuclear pipes. *Journal of micromechatronics*, 1(2) :155–174, 2001.

Articles publiés en conférences

[Anthierens et al., 2013] **C. Anthierens**, E. Pauly, and F. Jeay. MARIUS : A sailboat for sea sailing. In *International Robotics Sailing Conference*, pages 3–12, Brest, france, 2013.

[Naveau et al., 2013] **M. Naveau**, **C. Anthierens**, E. Pauly, and P. Courmontagne. MARIUS project : Design of a sail robot for oceanographic missions. In *OCEANS 2013 MTS/IEEE - San Diego : An Ocean in Common*, San Diego, USA, September 2013.

[Arnal et al., 2011b] **E. Arnal**, **C. Anthierens**, and E. Bideaux. Consideration of glare from daylight in the control of the luminous atmosphere in buildings. In *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, pages 1070–5, Budapest, Hungary, 2011.

[Anthierens et al., 2008a] **C. Anthierens**, **J. Filipezak**, **P. Mazel**, and **J. Suchere**. Design of a 4 dof joystick for wheelchair driving. In *Mecatronics'08*, page #197 6p, Annecy, le grand Bornand, France, 2008.

[Leclercq et al., 2008a] **M. Leclercq**, **C. Anthierens**, E. Bideaux, and L. Flambard. Control of optic comfort in an experimental room. In *Mecatronics'08*, page #194 6p, 2008.

[Leclercq et al., 2008b] **M. Leclercq**, **C. Anthierens**, E. Bideaux, and L. Flambard. Design of a Visual Comfort Sensor for Daylighting Devices. In *IFAC World Congress*,, pages 6873–8, Seoul, Korea, 2008.

[Dupuis et al., 2006a] **Y. Dupuis**, J.-L. Impagliazzo, **C. Anthierens**, and D. Millet. A new sensorial and driving locomotion interface for virtual reality. In *ICINCO 2006 - 3rd International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Proceedings*, Setubal, Portugal, August 2006.

[Anthierens et al., 2006b] **C. Anthierens**, J.-L. Impagliazzo, **Y. Dupuis**, and E. Richard. A specific locomotion interface for Virtual Reality - Design of a wheelchair type haptic. In *ICINCO 2006 - 3rd International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Proceedings*, 2006.

[Dupuis et al., 2005a] **Y. Dupuis**, **C. Anthierens**, and J.-L. Impagliazzo. Design of a Locomotion Interface for Self- Movement Perception. In *6th International Workshop on Research and Education on Mechatronics REM'05*, page 6p, Annecy, France, June 2005.

[Dupuis et al., 2005c] **Y. Dupuis**, **C. Anthierens**, J.-L. Impagliazzo, and L. Yushchenko. Design of a sensorial and driving locomotion interface. In *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-World)*, volume 16, Praha, Czech republic, July 2005.

[Yushchenko et al., 2004] L. Yushchenko, J.-L. Impagliazzo, C. Toussaint, and **C. Anthierens**. The Dynamic Wavelet Train Tracing Method in Virtual Acoustics. In *5th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*, page 6p, Noisy-le-Grand, France, 2004.

[Anthierens et al., 2004] **C. Anthierens**, **Y. Dupuis**, and J.-L. Impagliazzo. Design of a virtual reality workshop as a helpful tool for the microworld modeling. In *35th International Symposium on Robotics, ISR'04*, page 6p, Villepinte, France, 2004.

[Yushchenko et al., 2003] L. Yushchenko, J.-L. Impagliazzo, and **C. Anthierens**. Design of an advanced scientific simulator equipped with immersive interfaces. Application to a micromanipulation task. In *4th congress asia-europe on mechatronics*, pages 38–43, Hatoyama, Japan, 2003.

[Anthierens and Bétemps, 2001] **Anthierens C**, Bétemps M. Control design of an electro pneumatic micro actuator for a mobile in pipe micro robot. In *MECATRONICS'2001, 5th franco-japanese congress, 3rd european-asian congress*, pages 360–365, Besançon, France, October 2001.

[Anthierens, 2001a] **Anthierens, C**, Impagliazzo JL, Chollet P, Frachet JP. Design of an infinite impedance haptic interface. In *MECATRONICS'2001, 5th franco-japanese congress on mechatronics*, pages 33–38, Besançon, France, October 2001.

[Linares et al., 2000] J. M. Linares, **C. Anthierens**, and J. M. Sprael. Monte Carlo simulation in tolerancing. In *Second International Conference on Mathematical Methods in Reliability*, page 6, Bordeaux, France, 2000.

[Anthierens et al., 2000] Libersa C. Touaibia M. Bétemps M. Arsicault M. **Anthierens, C.** and N. Chaillet. Micro robots dedicated to small diameter canalization exploration. In *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 1, pages 480–5, Takamatsu, Japan, October 2000.

[Velasquez et al., 2000] [Velasquez, R], **Anthierens C.** Bétemps M. Modeling, design and control of an electropneumatic mobile micro robot for pipes inspection. In *ITNL/IEEE International Symposium on Robotics and Automation*, pages 139–144, Monterrey, Mexico, November 2000.

[Anthierens et al., 1999] **C. Anthierens**, [A. Ciftci], and M. Bétemps. Design of an electro pneumatic micro robot for in-pipe inspection. In *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, volume 2, 1999.

Autres communications

[Arnal et al., 2011c] [E. Arnal], P. Der Arslanian, **C. Anthierens**, and E. Bideaux. Contrôle coopératif des actionneurs de confort optique pour la régulation de l’ambiance lumineuse dans une pièce. In *La révolution énergétique des bâtiments.*, page 6p, Gif sur Yvette, Supélec, France, 2011.

[Leclercq et al., 2009] [M. Leclercq], [E. Arnal], **C. Anthierens**, and E. Bideaux. Capteurs de confort visuel : Application aux bâtiments tertiaires. In *7ème Colloque CAPTEURS*, page 6p, Bourges, France, 2009.

[Der Arslanian and Anthierens, 2009] P. Der Arslanian and **C. Anthierens**. Système adaptatif de pilotage pour la maîtrise de l’énergie du bâtiment (SAPB). Technical report, Rapport final de projet labellisé : Pôle de compétitivité CAP ENERGIE, 2009.

[Anthierens et al., 2008b] **C. Anthierens** and D. Mestre. Conception d’un joystick à 4 ddl pour la conduite de chaise roulante. In *IFRATH IEEE France, Handicap 2008*, pages 226–231, Paris, 2008.

[Leclercq et al., 2007] [M. Leclercq], **C. Anthierens**, E. Bideaux, and L. Flambard. Régulation du confort visuel dans une pièce : analyse pour la mise en œuvre. In *Journées Doctorales MACS, JDMACS'07*, page #49 6p, 2007.

[Anthierens et al., 2006a] **C. Anthierens**, JL. Impagliazzo, [Y. Dupuis], P. Chollet, and E. Richard. Simulateur de chaise roulante pour la conception avancée de bâtiment. In *IFRATH IEEE France, Handicap 2006*, page #4 6p, Paris, 2006.

[Anthierens and Dupuis, 2005] **C. Anthierens** and [Y. Dupuis]. Conception d’une interface de locomotion pédestre pour la Réalité Virtuelle. In *Journées Nationales d’Automatique*, page 82, Lyon, France, 2005.

[Dupuis et al., 2005b] [Y. Dupuis], **C. Anthierens**, JL. Impagliazzo, and D. Millet. Conception d’une interface sensorielle et motrice de locomotion pédestre. In *Journées Doctorales d’Automatique*, page 4p, Lyon, 2005.

[Anthierens and Richard, 2003] **C. Anthierens** and E. Richard. JULIO : Une plate-forme éducative pour la mécatronique. In *CETIS- EEA Colloque sur l’Enseignement des Technologies et des Sciences de l’Information et des Systèmes*, page 4p, Toulouse, 2003.

[Anthierens et al., 2002] **C. Anthierens**, JL. Impagliazzo, and N. Chaillet. Contribution de la réalité virtuelle pour la micro manipulation. In *5èmes journées du pôle microrobotique, 1ères journées*

du RTP microrobotique, page 6p, IRSA, Rennes Cachan, 2002.

[Anthierens, 2001b] **C. Anthierens**. Les matériaux électroactifs pour la conception de microsystèmes et microrobots. In *2ème colloque sur les matériaux électroactifs et leurs applications en génie électrique*, pages 35–40, Toulouse, France, 2001.

[Anthierens, 2001b] **C. Anthierens**. Micro et nano. *JAUTOMATISE #18*, pages 65–71, 2001.

1.3.1 Activités au sein du laboratoire COSMER

Le laboratoire COSMER créé en décembre 2014 a défini ses thématiques d'étude autour de la robotique marine / sous-marine et de la conception de systèmes durables. L'axe robotique a spontanément accueilli les recherches en cours des 4 enseignants-chercheurs composant l'équipe. C'est dans ce cadre que j'ai pu poursuivre le projet de création d'un Guide Sensoriel de Navigation (GSN - Fig.1.8) pour kayakistes non-voyants que nous avons débuté 2 ans plus tôt en collaboration avec un collègue de Supméca.

La conception et mise en oeuvre de ce système mécatronique en interaction avec l'humain a levé des problématiques telles que (a) la génération de trajectoire, (b) l'intégration mécatronique, (c) la restitution sensorielle, (d) l'objectivation d'essais et (e) la commande.

L'ensemble de ce travail a donné lieu à la publication d'un article intitulé **Sensory Navigation Guide for Visually-Impaired Sea Kayakers** (Anthierens, C., Groux, D., Hugel, V.) dans le journal **Field Robotics** [Anthierens et al., 2018].

Les précédents projets de conception de robot voilier et de miniROV m'ont permis d'acquérir une expérience qui a été mise à profit durant la phase d'équipement du laboratoire COSMER afin de se doter de miniROV tels que l'OpenROV ou le BlueRov. La problématique principale de l'axe de robotique sous-marine du COSMER est d'améliorer la manoeuvrabilité des ROV pour ouvrir de nouvelles perspectives en matière de mission.

Ainsi une première problématique abordée par la thèse de Nicolas Gartner vise à améliorer le contrôle des ROV par une connaissance poussée de leurs caractéristiques dynamiques lors d'une mission en zone de surf (courants, vagues, perturbations).

Le second thème est celui de la cordée de robots (ROV) visant à augmenter la portée d'action de ces engins. On envisage également la parallélisation de tâches élémentaires (Modèle Numérique de Terrain) et des gestions de trajectoire par asservissement visuel de la cordée [Laranjeira et al., 2017]. Ces travaux ont été principalement menés dans le cadre de la thèse de Matheus Laranjeira.

Enfin, le troisième axe concerne la gestion de l'ombilical d'un ROV de sorte à limiter les actions parasites du câble sur l'engin. Ces travaux font l'objet de la thèse d'Ornella Tortorici que je co-encadre depuis novembre 2017 en compagnie de Vincent Hugel et d'Hervé Barthélémy (IM2NP).

Pour affirmer cet axe, j'étudie les apports d'un ombilical actif à longueur variable. En effet, la maîtrise de la longueur variable de la chainette entre 2 robots constitue une stratégie originale permettant de (a) **calculer la position spatiale du robot voisin**. De plus, selon certaines hypothèses sur les mouvements de chacun des robots, on peut déduire (b) **des informations sur le courant marin** s'appliquant sur la chainette. D'autre part, l'ombilical actif permet aux robots de (c) **se regrouper pour franchir des zones à risques**, pour se redéployer plus tard dans des eaux calmes et dégagées. Enfin, sachant que les ROV sont alimentés par leur propre batterie, le câble actif peut servir de treuil pour (d) **contribuer à la locomotion de son voisin** suiveur.

La mise en oeuvre de ces fonctions a nécessité la conception d'un enrouleur de câble qui répond aux missions de trancannage, de traction, d'enroulement / déroulement, de contrôle de la longueur enroulée, et de gestion de la tension du câble.

Différents algorithmes ont été développés pour conférer à l'enrouleur des fonctions de perception (a) **proprioceptive** à la cordée, (b) **extéroceptive**, (c) de **motricité** et (d) d'**optimisation énergétique**.

D'autres projets sortant du cadre de la robotique marine / sous-marine subsistent au sein du COSMER comme c'est le cas pour l'humanoïde. Je collabore à un projet de stabilisation réflexe du robot Nao ainsi que la création d'un nouveau moyen de déplacement pour celui-ci. Cet axe d'étude est

en majeure partie alimenté par des projets d'élèves ingénieur en 2^{ème} ou 3^{ème} année de formation ou des étudiants en Master 1 Ingénierie des Systèmes Complexes, parcours Robotique et Objets Connectés.

1.3.2 Animation de recherche et rayonnement

Au niveau du laboratoire : Je suis chargé d'**organiser les séminaires** mensuels qui accueillent les présentations des professeurs invités, chercheurs du laboratoire et extérieurs.

Au niveau national : Je participe au **Groupe de Recherche Robotique** et **MACS** pour lequel j'ai **organisé les journées du groupe Systèmes Mécatroniques** à Supméca Toulon en juillet 2005.

Au niveau international : J'ai été **rédacteur en chef invité du Journal JESA** avec Tanneguy Rédarce (AMPERE INSA de Lyon) pour le volume 40, n^o3 en 2006 sur la Mécatronique et les Systèmes Multi-physique pilotés. De plus, je suis ponctuellement **relecteur** pour *Journal of Systems and Control Engineering, IEEE/ASME AIM Conference* et le journal *Mechatronics (Elsevier)*. Par ailleurs, j'ai été **membre du comité technique** de mécatronique de l'IFAC de 2005 à 2009.

1.3.3 Valorisation de la recherche

Les travaux menés en Domotique avec Sherpa Engineering ont montré une continuité (deux thèses d'affilée) qui a permis à l'entreprise de valoriser cette expérience à travers la rédaction d'un brevet et la labellisation de ce projet au pôle de compétitivité CAP ENERGIE.

D'autre part, grâce à nos recherches sur l'aide à la pratique du kayak pour les personnes à déficience visuelle, nous avons été lauréat d'un concours lancé par EDF sur l'accès au sport d'eau pour les personnes handicapées. Ce prix, d'une valeur de 4000 € a récompensé et encouragé les travaux menés en collaboration avec le Club de Kayak du Pradet.

1.4 Activités pédagogiques

1.4.1 Fonctions d'Encadrement

| Encadrements en Réalité Virtuelle | | | |
|--|----------------------|---|---|
| Benjamin ASTRUC | 2002 | Stage Ingénieur 2 ^{ème} année ENSMA Poitiers | Instrumentation de la marche. |
| Adel SGHAIER | 2002 | DEA MCAO – Univ. Marseille | Analyse biomécanique de la marche. |
| Yves DUPUIS | 2003 | DEA MCAO – Univ. Marseille | Conception d'une interface de marche pour la Réalité Virtuelle. |
| Amor BOUGHAMI | 2004 | DEA MCAO – Univ. Marseille | Analyse du facteur d'échelle en Réalité Virtuelle. |
| Iliais CHAABI | 2004 | DEA Robotique de Paris (encadrement à 50% avec Stéphane REGNIER - LRP6) | Etude du facteur d'échelle micro/macro pour la RV. |
| Yves Dupuis | Nov 2003 Nov 2006 | Thèse CIFRE avec Sherpa Engineering Co-encadrement à 50% avec J.P. FRACHET | Conception d'une interface immersive de marche pour la RV. |
| Jury : Éric Moreau (PU Univ Toulon), Maxime Gautier (PU IRCCyN – Centrale Nantes), Simon Richir (PU ENSAM), Cédric Anthierens (MCF Supméca Toulon), Pascal Souquet (Ingénieur CETIM), Dominique Millet (PU Supméca Toulon). | | | |

| Encadrements en Domotique | | | |
|--|----------------------------|--|---|
| Louis BOUTIN | 2003 | Stage de fin d'études ISEN Toulon (6 mois - SHERPA Engineering) | Conception d'un banc de test de stores intelligents. |
| Maximilien CLERCQ (enseignant chercheur ISIEE Amiens) | LE- 2005 | Master Recherche MER Univ. Toulon | Mise en place et commande d'une fenêtre intelligente. |
| Maximilien CLERCQ | LE- Jan. 2006 dec. 2009 | Thèse CIFRE avec Sherpa Engineering Co-encadrement à 50% avec Eric BIDEAUX (Ampère INSA Lyon) | Conception d'un système domotique pour le confort optique d'un bâtiment. |
| Jury : Jacques Lottin (PU Univ. Savoie - Annecy, SYMME), Pierre Bonton (PU, Clermont-Ferrand II, LASMEA), Jean-Louis Scartezzini (PR, Ecole polytechnique de Lausanne), Joseph Virgone (PR, UCB Lyon I), Eric Bideaux (PR, INSA de Lyon, Ampère), Cédric Anthierens (MCF, SupMeca Toulon). Invités : Jean Brunet (Ing, Sherpa Eng.), Éric Blanco (MCF, ECL, Ampère) | | | |
| Etienne ARNAL (Ingénieur R&D Optis) | Jan 2009 Jan 2013 | Thèse CIFRE avec Sherpa Eng. Co-encadrement à 50% avec Éric BIDEAUX (Ampère INSA Lyon) | Modélisation et commande hiérarchisées du bâtiment pour l'amélioration des performances énergétiques, thermiques et optiques. |
| Jury : Joseph Virgone (PR, CETHIL-INSA Lyon), Hervé Gueguen (PR, Supelec), Rachid Outbib (PR, LSIS), N. Morel (PhD, LESO-PB-EPFL Lausanne), Philippe Fiani (Directeur Scientifique, Sherpa Eng.), V. Boutin (Ingénieur, Schneider Electric), E. Bideaux (PR, INSA de Lyon, Ampère), C. Anthierens (MCF, SupMeca Toulon). | | | |

| Encadrements en Robotique sous-marine | | | |
|---------------------------------------|-----------------|---|--|
| Zeineb AYED | 2016 | Stage de fin d'études de l'ENIT (Labo COSMER) | Développement du contrôle d'un BlueROV sur une cible temps réel embarquée. |
| Ornella RICI | TORTO- Nov 2017 | Thèse Région co-encadrée avec Vincent Hugel (PU COSMER) et Hervé Bartélémy (IM2NP) | Conception et pilotage d'ombilical actif pour la cordée d'engins sous-marins |

De façon régulière, j'encadre en moyenne 1 projet de 1^{ère} année (5 étudiants), 1 projet de 2^{ème} année (2 étudiants) et 1 projet de fin d'études (3 étudiants) par an à Seatech (idem au paravant à Supméca).

D'autre part, j'ai encadré 8 stages de fin d'études (DEA MCAO Univ. Aix/Marseille, Master MER Univ. Toulon, ISEN Toulon) en laboratoire entre 2002 et 2016

1.4.2 Activités d'enseignement

Quantité d'enseignement

Mon service d'enseignement est en moyenne de 303 h eq.TD par an depuis septembre 2000 (hors CRCT en 2007 et hors prime pédagogique - Fig.1.9). Ceci a été dû au nombre restreint d'enseignants permanents à SUPMECA Toulon. En effet, j'ai été le seul enseignant permanent à effectuer la majorité de son service au sein du parcours RSM de 2^{ème} et 3^{ème} année à SUPMECA.

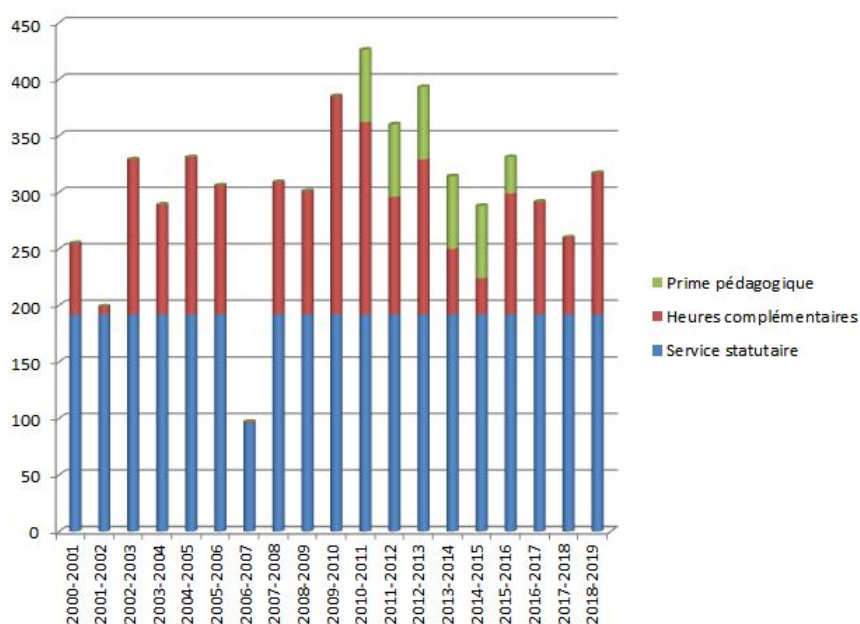


FIGURE 1.9 – Volume annuel de service

Les fluctuations de volume annuel sont dues aux variations du nombre de groupes de TP/TD, à l'équivalence TP/TD, au nombre d'étudiants encadrés en projet, au nombre de suivis de stage. Les variations du volume d'enseignement de ces 3 dernières années sont dues à une prise en charge d'enseignements nouveaux dans la formation de Seatech à mesure que s'est clôturée la formation de Supméca Toulon.

Méthodes pédagogiques

Durant les heures présentielles, l'accent est mis sur l'échange interactif avec les étudiants. Pour la partie cours, j'utilise Moodle¹ comme espace de stockage documentaire où les étudiants peuvent

1. moodle.univ-tln.fr

retrouver les supports de cours, TD et TP. Durant le TP, je reste à la disposition des étudiants en guidant leur progression individuelle de sorte à illustrer et conforter les acquis des cours et TD. Les évaluations se font via un examen écrit de courte durée (1h30 max) ou sur **Moodle** pendant lesquelles les étudiants doivent répondre à des questions à choix multiples ou questions ouvertes portant sur le cours, les applications de TD et les expérimentations de TP.

1.4.3 Présentation synthétique des enseignements

L'ensemble de mes enseignements se répartit entre le génie mécanique (en bleu sur le graphique ci-dessus), l'automatique (en rouge) et plus majoritairement la mécatronique (en vert) (Fig.1.10).

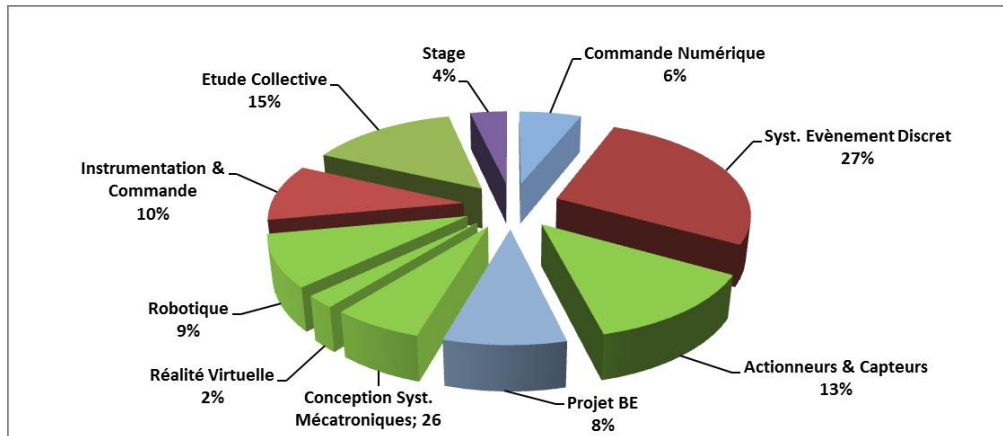


FIGURE 1.10 – Disciplines enseignées

Le travail en projet représente à peu près 1/4 de mon service ; il en est de même pour les Cours et TD, tandis que les TP représentent environ 50 % de mon service. Le tableau ci-dessous donne l'exemple de répartition de mes enseignements de cette année (essentiellement Seatech depuis septembre 2016).

| | Matière | Resp. Module | Cours h cours | TD hTD | TP hTP | Projet heq.TD |
|--------------|---|--------------|---------------|--------|--------|---------------|
| Méca | Mécanique vibratoire (S1) | | | | 36 | |
| | Machine Outil CN (S1) | | 9 | 6 | | |
| Mécatronique | Projet (S1) | | | | | 11 |
| | Projet (S2) | | | | | 21 |
| | Projet (S3) | | | | | 30 |
| | Robotique (S2) | | 6 | | 5 | |
| | Modélisation de systèmes mécatroniques (S2) | X | 6 | 12 | | |
| | Instrumentation & commande (S3) | | 6 | 3 | 12 | |
| | Capteurs, actionneurs (S2) | X | 24 | 12 | 14 | |
| | Réalité Virtuelle (S3) | | 9 | | | |
| Auto | Automatique linéaire (S1) | | | | 48 | |
| | Systèmes à Evènement Discret (S3) | X | 6 | 3 | 12 | |

FIGURE 1.11 – Récapitulatif d'enseignement

Toutes les matières listées appartiennent à des Unités d'Enseignement comprenant d'autres matières et s'adressent aux étudiants de Seatech en tronc commun de 1^{ère} année (niveau licence 3 - 120 étudiants) ainsi qu'à ceux des parcours de Mécatronique et Mécanique de 2^{ème} et 3^{ème} année (niveau Master 1

et 2 - 20 étudiants par promotion) et, depuis l'année passée, aux étudiants de Master Ingénierie des Systèmes Complexes 1^{ère} année. Le tableau mentionne les UE dont je suis responsable ainsi que les matières qui ne sont plus enseignées actuellement (lignes grisées).

Création de plates-formes physiques

Mon goût pour la mise en oeuvre réelle des principes physiques que l'on cherche à appréhender, comprendre et faire comprendre, m'a toujours poussé à conclure les projets étudiant que j'ai encadrés par des réalisations et démonstrations expérimentales. Tant que les moyens financiers et humains le permettent, je favorise la création de systèmes physiques qui motive les participants d'un groupe, valorise les études menées et offre un héritage aux projets à venir.

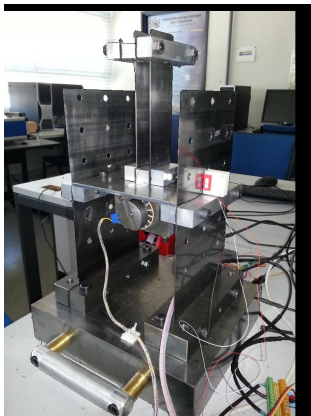


FIGURE 1.12 – Etouffeur dynamique

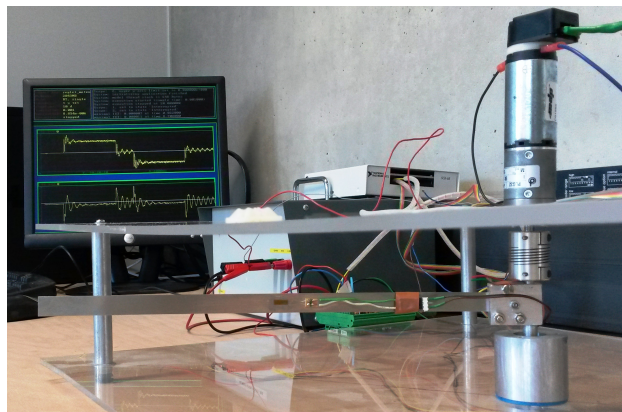


FIGURE 1.13 – Poutre souple actionnée

De plus, ces démonstrateurs, maquettes ou prototypes sont réutilisés également en TP pour illustrer la démarche de conception, le dimensionnement, la modélisation ou le pilotage du système. On peut citer l'haptique (Fig.1.1 p12), le fauteuil roulant virtuel (Fig.1.3 p12), le miniROV Babysub (Fig. 1.6 p13) ou encore le robot voilier MARIUS (Fig.1.7 p13). Leur portée va bien au delà du groupe d'étudiants qui les a conçus.

J'ai encadré des projets ayant pour but de mettre en évidence certains principes physiques à des fins pédagogiques. Ainsi l'instrumentation et le pilotage d'un étouffeur dynamique (Fig.1.12), d'une plaque mince suspendue en vibration, ou de poutres en *cantilever* sont toujours en exploitation depuis plus de 10 ans en TP de mécanique vibratoire (72h TP par an). Il en est de même en automatique et *Hardware In the Loop* avec des plate-formes de type banc de translation, pendule actionné en rotation d'axe horizontal ou poutre souple motorisée (Fig.1.13)(32h TP par an).

1.4.4 Création de formation

Alors que Supmeca Toulon ne proposait qu'une seule option de dernière année (contre 3 à Supmeca Paris), j'ai été chargé, un an après mon recrutement, de mettre en place une seconde option de dernière année adressant le thème de la mécatronique tout en intégrant la volonté politique de rapprocher les établissements de Supmeca et de l'ISEN qui résidaient dans le même bâtiment. L'option accueillait 24 étudiants issus des deux écoles et avait pour particularité le brassage des spécialités scientifiques et la collaboration au sein d'un projet de fin d'études commun.

J'ai assuré la responsabilité et l'animation de cette formation qui couvrait les deux années de niveau master de 2001 à 2016 (dernière promotion diplômée par Supmeca Toulon)

Points forts de la formation :

- Pendant 14 ans, l'option RSM a formé des ingénieurs au profil recherché en France et à l'étranger.
- Cette formation originale a attiré un nombre croissant d'étudiants.

- Les enseignements ont été assurés par des enseignants chercheurs issus des 2 écoles et des intervenants extérieurs (académiques et industriels).
- La mixité disciplinaire des binômes (ISEN / Supméca) a catalysé l’auto-formation des étudiants.
- La participation collégiale de tous les étudiants à un grand projet de fin d’études (Etude collective - EtCo) s’est davantage apparentée à une expérience industrielle plutôt qu’à un travail didactique.
- Les enseignements de ce parcours étaient nouveaux pour les 2 formations d’ingénieur, ce qui ne nécessitait pas de prérequis autre que la culture scientifique d’ingénieur.
- La complémentarité des cours a motivé l’ouverture scientifique et élargi le champ d’application pour le stage de fin d’études et la 1^{ère} embauche.

Etude Collective : Le projet de fin d’études, intitulé *Etude Collective*, rassemblait la promotion complète d’une vingtaine d’étudiants environ durant 100 heures planifiées à l’emploi du temps et était soutenu financièrement à concurrence d’un budget de 7500 € ht chaque année.

Les sujets, très ambitieux et inédits chaque année, ont été la vitrine du savoir-faire et des compétences de nos étudiants en fin de cursus. Ces projets se sont matérialisés notamment par la conception, fabrication et exploitation de *Julio* (robot mobile de locomotion terrestre bi-énergie), *Babysub* pour Subseatech (mini sous-marin téléguidé personnel pour faibles profondeurs - Fig.1.6), *Sigma-B* pour Airbus Helicopters (démonstrateur de gyroscope MEMS sur carrousel), *Attest* pour Clearisy (banc de mesure 3D pour capteurs ferroviaires), *MARIUS* (robot voilier Fig.1.7), etc.

J’ai assuré la responsabilité, l’animation et l’encadrement de ces projets tout au long des 14 années d’existence de la formation Robotique et Systèmes Mécatroniques.

Plusieurs réalisations ont été valorisées par des publications scientifiques en congrès nationaux et internationaux (Projet *Julio* [Anthierens and Richard, 2003] / Projet Fauteuil roulant RV (Fig.1.3) [Anthierens et al., 2006b] /Projet *MARIUS* [Anthierens et al., 2013][Naveau et al., 2013]). Ceci permet d’associer les étudiants au rayonnement de leur établissement et de les familiariser au monde de la recherche.

Rayonnement : L’excellent placement de nos diplômés en France et à l’étranger (Airbus, Valeo, EDF, Volvo, Schlumberger, Sagem, Dassault Systèmes...) témoigne du rayonnement positif produit par le parcours RSM et par Supmeca Toulon. Par ailleurs, l’ouverture à l’international de ce parcours via les offres de mobilité académique (en moyenne 15% par an) a été un indicateur positif de dynamisme de notre formation vis-à-vis des écoles partenaires de Delft, Cranfield, Esslingen, Sao Paulo, Milan, Montréal ainsi que des instituts français issus des réseaux Polyméca et FESIC.

Bilan en qualité de responsable de formation Le rôle de responsable de parcours à Supméca a impliqué un travail constant comprenant :

- l’actualisation du contenu pédagogique (sur les 3 semestres de M1 et M2),
- la gestion et le suivi des stages,
- la gestion des vacataires,
- le rendu des notes et la participation aux jurys (passage, mobilité académique, diplomation, remise de diplôme),
- l’édition de budget prévisionnel et réel entre les 2 établissements,
- la mise à jour de la convention inter-établissement,
- ...

Bien qu’extrêmement chronophage, ce rôle m’a apporté beaucoup de satisfaction et de retours positifs de la part de nos jeunes diplômés et des entreprises partenaires.

1.4.5 Bilan des activités pédagogiques

Mon travail en matière d'enseignement s'attache à faire le lien entre les domaines de la mécanique et de l'automatique en mettant en évidence aux yeux des étudiants les relations nombreuses et fructueuses qui existent entre ces deux grandes disciplines.

Outre ces démarches pédagogiques, je me suis investi pendant 14 ans dans le développement de l'école d'ingénieurs de Supmeca Toulon en proposant et en gérant un parcours Mécatronique original de par son contenu et sa forme (collaboration avec ISEN). La pérennité de cette formation s'est justifiée notamment par le bon placement de nos jeunes diplômés au profil recherché.

Fort de cette expérience pédagogique, j'ai participé activement, en animant des commissions et groupe de travail, à la création et mise en place de l'école Seatech. Aujourd'hui le parcours Systèmes Mécatroniques et Robotique de Seatech hérite en grande partie du programme de la formation initialement menée à Supméca.

N'ayant pas souhaité poursuivre à Seatech en qualité de responsable de parcours pour consacrer plus de temps à la recherche, je reste néanmoins investi dans le développement de l'enseignement en mécatronique et la robotique au sein de notre formation d'ingénieur mais également de l'Université de Toulon.

En effet, après pratiquement deux ans de travaux en collaboration avec des collègues de l'IUT et de l'UFR Sciences et Techniques, un nouveau parcours intitulé *Robotique et Objets Connectés* a ouvert au sein d'un Master Ingénierie des Systèmes Complexes l'année passée. Outre ma participation à la création de la maquette pédagogique (l'expérience de responsable de parcours à Supméca a été une aide), je suis en charge des études du Master 2 de ce parcours dans lequel j'interviens également en enseignement.

Ce parcours compte 11 étudiants en 1^{ère} année et 8 en 2^{nde} dont 3 issus du parcours Systèmes Mécatronique et Robotique (SYSMER) de Seatech en vue de l'obtention d'un double diplôme. Au-delà de la gestion de la planification, des intervenants et des jurys, mon travail s'est aussi focalisé sur les équivalences pédagogiques pour les élèves ingénieurs et la complétude de ces 2 cursus.

Problématique de Recherche

Mon parcours de recherche riche d'expériences dans des domaines variés (Microrobotique, tolérance fonctionnelle, réalité virtuelle, domotique puis robotique sous-marine) m'a fait découvrir des méthodologies et outils utiles sur un large spectre de recherches relatif à la robotique et la mécatronique. Les applications de mes recherches antérieures sont multiples mais comportent néanmoins une problématique commune qui m'a toujours passionné. La conception mécatronique, qui rassemble la mécanique et les systèmes pilotés, est le cœur de ma recherche, et sa particularité est son interaction avec l'humain. C'est donc dans ce dernier champ que se retrouvent mes activités allant de la **réalité virtuelle** à la **robotique marine** en passant par la **domotique**.

Problématique générale

L'Homme perçoit son environnement d'une façon propre selon les sens stimulés, leur nombre et leur intensité (seuil, dynamique, subjectivité, adaptation...). Sa perception est naturelle et intuitive mais peut être altérée ou corrompue selon les situations (trompe-l'œil, incohérence sensorielle inattendue,vection, défaut de perception vestibulaire...). Il est donc possible d'interagir avec l'humain pour lui faire percevoir quelque chose qui n'existe pas (réalité virtuelle/augmentée), lui faire percevoir son environnement naturel différemment (comme par téléprésence [Awabot,]) et également le faire agir sur son environnement autrement que naturellement (téléopération chirurgicale par exemple). Tout ceci peut s'envisager en modifiant des modes de pensée (méditation, médiumnité) ou, de façon plus à propos, en ayant recours à des interfaces artificielles qui vont prendre place entre l'humain et un environnement réel ou virtuel.

Nous allons aborder ici la conception d'interfaces mécatroniques pour l'interaction humaine selon 3 niveaux distincts de perception.

- Tout d'abord en étudiant les modes de perception et d'action de l'humain, ce dernier pourra vivre une expérience dans un monde totalement synthétique grâce à la Réalité Virtuelle (RV).
- Dans un second temps, nous montrerons comment un système domotique peut permettre à l'humain de percevoir son environnement de façon améliorée mais naturellement.
- Enfin dans une troisième partie, nous illustrerons comment un système mécatronique peut rapprocher l'humain de sa perception naturelle en traitant le cas d'un assistant mécatronique palliant un handicap visuel dans le cadre de la pratique du kayak.

Le plan de ce chapitre va donc suivre ce découpage en trois parties.

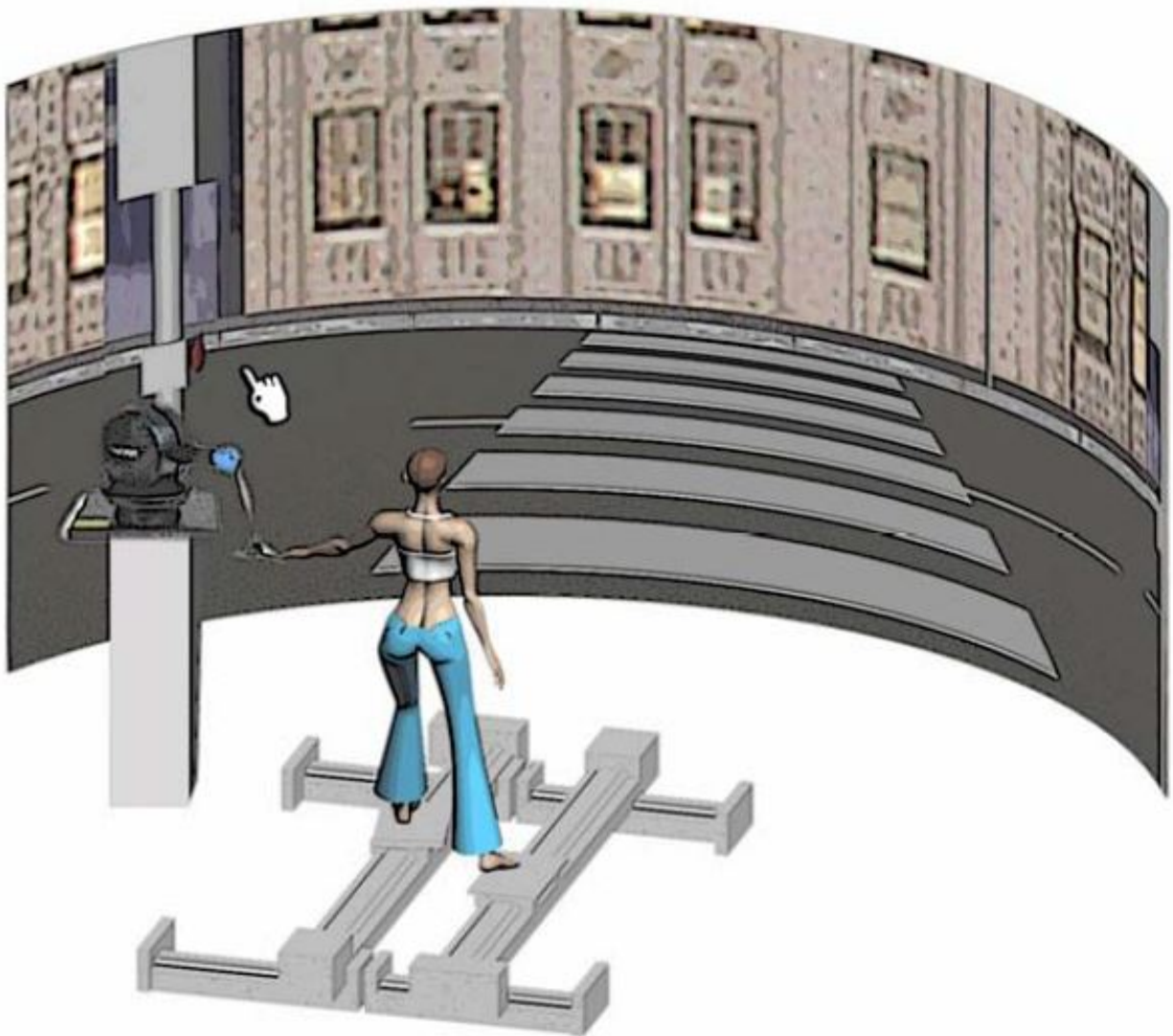
De façon globale et au-delà des applications listées ci-dessus, la problématique au sens large de la **conception de systèmes mécatroniques en interaction avec l'humain** telle qu'abordée dans mes travaux de recherche passe par les 4 phases clé que sont :

1. La modélisation des comportements sensorimoteurs de l'humain
2. La création de systèmes d'interaction (interfaces)
3. La mise en oeuvre, le test et la commande des systèmes créés
4. La validation de la perception, de l'action et du ressenti

Les outils et les méthodes utilisés et développés au cours de ces différentes phases mettent en évidence les interactions et les couplages qui sont à prendre en compte dans le pilotage et la conception de systèmes mécatroniques pour un large éventail d'application. Ainsi cette méthodologie globale contribue au développement de projets de recherche au laboratoire COSMER en robotique et mécatronique qui trouvent leur place au sein des communautés scientifiques nationale et internationale (Journaux Mechatronics, Transactions on Mechatronics, Field Robotics, conférences ICRA, IROS, IFAC, groupes de recherche MACS, Robotique ...).

Chapitre 2

Réalité Virtuelle



2.1 De l'historique à la pratique

La réalité virtuelle telle que décrite dans le traité de réalité virtuelle [Fuchs et al., 2006] rassemble les techniques et méthodes permettant de plonger l'utilisateur dans un environnement synthétique lui procurant la sensation de vivre une scène désirée. Initiée dès la fin du 19^{ème} siècle par l'inventeur du stéréoscope (Sir Charles Wheatstone) qui permettait de voir un objet en relief à partir de 2 images planes, les réels prémices de la réalité virtuelle apparurent dans les années 60 avec les interfaces homme /machine pour interagir avec les ordinateurs.

D'abord très orientées vers l'immersion visuelle (casque stéréoscopique dynamique), les interfaces comportementales se sont tournées peu à peu vers l'instrumentation des actions motrices de l'utilisateur pour intégrer ces mouvements et pour lui permettre d'interagir avec cet environnement virtuel (gant de données dès 1982). La montée en puissance des moyens de calculs informatiques permettent l'arrivée sur le marché de logiciels au rendu graphique de plus en plus réaliste ce qui contribue à plonger l'utilisateur dans un monde virtuel en lui donnant la possibilité d'interagir de façon synthétique (CAO, architecture de bâtiment...). Ainsi la conception volumique des pièces offre des rendus 3D réalistes qui établissent les bases de l'immersion visuelle. Simultanément les jeux vidéo progressent sur la gestion dynamique des scènes faisant la différence entre le réalisme et la simulation du réel.

Les applications en attente de ces progrès sont multiples et concernent notamment le divertissement, l'entraînement pour le geste médical, la défense (simulateur de vol ou d'engins) ou la conception industrielle. Ce dernier domaine nuance la réalité virtuelle en la déclinant en réalité augmentée. Ainsi certaines caractéristiques d'un produit par exemple sont rendues visibles alors que non perceptibles naturellement. Cette technique met en pratique l'intérêt des métaphores et substitutions sensorielles que nous reverrons plus tard. Les enjeux de la réalité virtuelle relèvent d'un gain de temps en termes de conception, de production, de qualité de formation pour les missions d'entraînement et d'évaluation, et surtout de réduction de coût de développement en favorisant la simulation informatique et minimisant le nombre d'essais expérimentaux et leurs impacts (économiques, écologiques, risques potentiels...).

Pour qu'une application revête le terme de réalité virtuelle, nous évaluons ses facilités d'**immersion**, d'**interactivité** et de **réactivité / temps réel**. Qu'il soit réaliste ou issu de la fiction, le monde virtuel peut immerger l'utilisateur tel qu'un film sur grand écran le ferait en vision 3D par exemple. L'écran agit comme une **interface sensorielle** pour stimuler la vue de l'utilisateur. Ainsi on est dans un espace virtuel qui peut devenir réactif dès lors qu'on autorise une certaine interactivité. C'est dans ce contexte qu'interviennent d'autres interfaces comportementales qui vont prendre en compte les actions de l'utilisateur pour que ce dernier agisse sur le monde virtuel dans lequel il est plongé.

Au-delà de la présence (notion très importante en réalité virtuelle), la première interaction est celle de l'observation où l'utilisateur a la liberté de porter son regard où il le souhaite dans ce monde virtuel. Le plus souvent ceci est réalisé par un casque immersif, très largement démocratisé désormais grâce aux lunettes de réalité virtuelle adaptables aux smartphones [Lemonde.fr, 2018], ou un *CAVE*, qui est une salle de projection murale [Cav, 2018]. Outre l'observation, l'utilisateur interagit tactilement avec des objets présents dans le décor virtuel. Pour que son interaction soit la plus naturelle possible, l'interface va tendre à solliciter ses schèmes de préhension, toucher, manipulation, déplacement, etc. Pas toujours requises, ces actions sont souvent synthétisées par des **interfaces motrices** qui traduisent les actions de l'utilisateur pour lui permettre d'effectuer l'action désirée sans pour autant être en mesure de lui restituer des stimuli sensoriels autres que visuels en lien avec son action (action de préhension sans retour tactile). C'est là que les techniques de réalité virtuelle se sont multipliées pour augmenter le réalisme en rendant les interactions intuitives mais non naturelles grâce aux substitutions sensorielles (remplacement d'un rendu sensoriel via l'excitation d'un autre sens) ou aux métaphores notamment (modification des stimuli suivant le même sens sollicité, utilisation d'avatar par exemple). Les premières utilisent un autre sens de perception pour restituer le ressenti que celui qui serait utilisé naturellement. Par exemple, l'aide au stationnement des voitures sait nous faire percevoir une distance à un obstacle via un signal sonore à fréquence variable. Les secondes conservent le sens sollicité pour effectuer des restitutions sensorielles comme le fait le curseur de la souris pour manipuler des fichiers lorsque votre main déplace physiquement la souris.

On distingue donc le réalisme du réel, car la réalité virtuelle la plus immersive possible ne vise

pas à reproduire synthétiquement le réel. En effet, les interfaces sont à la frontière du réel que vit l'utilisateur, et du virtuel que lui propose le monde immersif. De plus, elles se doivent d'être cohérentes dans leur rendu pour que l'illusion soit la plus réaliste possible. C'est ici que la notion de **temps réel** prend tout son intérêt, car une bonne synchronisation de stimuli peut faire croire des choses à l'humain qui n'existent pas. Dans la vie courante, nous avons tous vécu la sensation de reculer en voiture en attendant à un feu rouge alors que ce sont les véhicules voisins que ce sont mis à avancer simultanément. La synchronisation de ces images de vection bluffe notre cerveau et notre ressenti. Les travaux d'Anatole Lecuyer sur la conception de pseudo-haptique (**interface sensori-motrice**) [Lecuyer, 2001] montrent, à ce sujet, comment le ressenti tactile peut être volontairement trompé par le biais du retour visuel. Par conséquent, le temps réel et la cohérence des sens sont non seulement des éléments indispensables pour le succès d'une immersion virtuelle, mais ils peuvent permettre de jouer "abusivement" sur les rendus perçus par l'utilisateur (faire croire ou percevoir au-delà de ce qui est restitué).

Un des grands vecteurs de l'immersion virtuelle qui vient compléter l'observation et l'interaction tactile est le fait de pouvoir **se déplacer dans le monde virtuel**. Bien entendu dans les jeux vidéo les périphériques informatiques ne manquent pas pour prendre en compte les désirs de l'utilisateur en matière de déplacement et mouvement. Les utilisateurs savent manier intuitivement joysticks, boutons et pads tactiles pour déplacer leur avatar ou mettre en mouvement toute une équipe de foot dans leur jeu préféré. Remplacer la marche ou la course par un mouvement de joystick relève de la métaphore dès lors qu'on ne se soucie pas du ressenti vestibulaire, mais bien qu'intuitif (période d'apprentissage très réduite) ceci n'est pas du tout naturel.

Donc si l'application visée a pour primitive primaire de se déplacer en marchant dans le monde virtuel (ce qui n'est pas du tout le cas dans la plupart des jeux vidéo qui suggère par exemple de se débarrasser d'ennemis ou de guider une équipe de foot), quelle interface peut permettre à l'utilisateur d'évoluer librement dans un environnement virtuel de façon illimitée en restant globalement sur place (les dimensions des Caves ou autres enceintes immersives dimensionnent l'espace physiquement disponible) ? En conservant à l'esprit ce que l'on a vu précédemment sur les principales caractéristiques que doit avoir une interface comportementale pour satisfaire une bonne immersion virtuelle, nous allons passer en revue quelques solutions originales pour tenter de répondre à cette problématique. Puis nous verrons en quoi la conception mécatronique d'une interface peut tendre à répondre à ce problème.

2.2 Les interfaces de locomotion pédestre

Certaines interfaces qui reproduisent à l'identique des postes de pilotage de véhicules comme le vélo, le deltaplane, l'avion ou encore la conduite automobile offrent la possibilité à l'utilisateur de réaliser les actions habituelles telles qu'exécutées dans la vie quotidienne en percevant en retour des stimuli visuels, sonores, tactiles voire vestibulaires (Fig.2.1, Fig.2.2). L'immersion virtuelle est souvent très réussie car les interfaces comportementales employées sont partiellement issues de la réalité physique. Néanmoins la primitive de déplacement est alors soumise à l'emploi d'une interface de véhicule habituelle pour le pilotage mais pas pour se déplacer le plus naturellement en marchant.

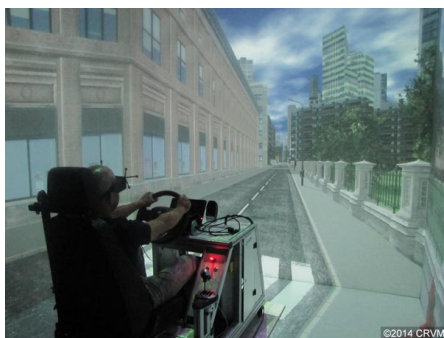


FIGURE 2.1 – Simulateur de conduite



FIGURE 2.2 – Simulateur de fauteuil roulant

La caractéristique primordiale pour une interface est d'être transparente pour l'utilisateur, c'est à dire que ce dernier ne perçoit que ce que l'interface veut faire ressentir sans distinguer le fait que les stimuli proviennent synthétiquement d'une interface comportementale. Le défi de la conception d'interface est de tenter de permettre à l'utilisateur de se déplacer dans un environnement virtuel comme il le fait dans la réalité physique. La marche est très délicate à investiguer, tandis que d'autres modes de locomotion comme la nage paraissent pratiquement impossibles (expérience tentée avec des combinaisons "zéro G").

Bien souvent conçues à des fins d'exploration d'un monde virtuel, les interfaces de locomotion individuelles ne se sont pas appuyées sur des modes de marche naturelle. C'est ainsi que bon nombre d'interfaces ont vu le jour sous forme de vélo [Distler and Bölhoff, 1996] ou banc elliptique afin de prendre en compte le désir de l'utilisateur de progresser dans l'environnement virtuel via l'enregistrement des actions motrices réalisées par ses jambes (Fig.2.3).



FIGURE 2.3 – Interface de locomotion vélo

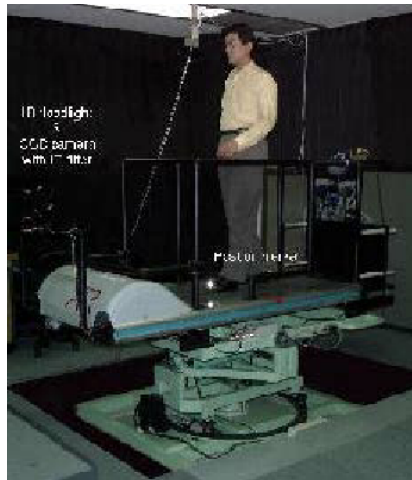


FIGURE 2.4 – Système ATR Atlas



FIGURE 2.5 – *Treadport* à base de tapis roulant

Une seconde catégorie d'interface met en avant le fait de libérer les pieds de l'utilisateur sans imposer de pédales pour laisser l'utilisateur gérer les phases d'appui et de balancement des jambes comme dans la marche naturelle. Souvent basées sur des solutions de tapis roulants ces interfaces présentent l'inconvénient d'être unidirectionnelles, de ne pas différencier les retours cinématiques indépendamment au niveau de chacune des jambes (on verra par la suite que ceci a son importance) et de ne pas permettre de changement de direction durant la marche (Fig.2.4, Fig.2.5).

Par ailleurs, pour ajouter un retour tactile simulant une progression plus ou moins évidente, certaines interfaces de marche comme le *Treadport* (Fig.2.5) emploient une ceinture de retenue passive qui freine la progression de l'utilisateur. Comme pour l'ATR, le tapis roulant est inclinable pour donner une sensation de déclivité sur le sol.

L'inconvénient majeur de ces interfaces sur le plan cinématique est qu'elles ne permettent pas une progression dans le plan mais uniquement dans une direction. On est donc ici face à une interface mixte qui satisfait une partie des attentes cinématiques en proposant un degré de liberté privilégié. Le réalisme au niveau de la marche est meilleur que celui des interfaces qui n'emploie pas un réel mouvement de marche (comme le vélo). A défaut d'améliorer cette caractéristique, les concepteurs de ces interfaces ont prévu d'inclure un retour de sensation synonyme de difficulté de progression via l'emploi d'une ceinture de retenue et/ou d'une inclinaison complète de l'interface. Enfin, couplé à un monde virtuel où l'utilisateur peut faire le choix de sa direction, les changements d'orientation se font via une orientation des épaules ou du regard par rapport à l'axe du tapis.

La conception d'interface est devenue encore plus complexe quand Darken et Cockayne [Darken et al., 1997] ont entrepris de réaliser un tapis roulant 2D qui offre la possibilité de se déplacer dans le plan virtuellement tout en restant au centre de l'interface. Cette idée quoique complexe a été reprise dans la conception du *Torus Treadmill* (Fig.2.6) qui reprend le même avantage et les mêmes

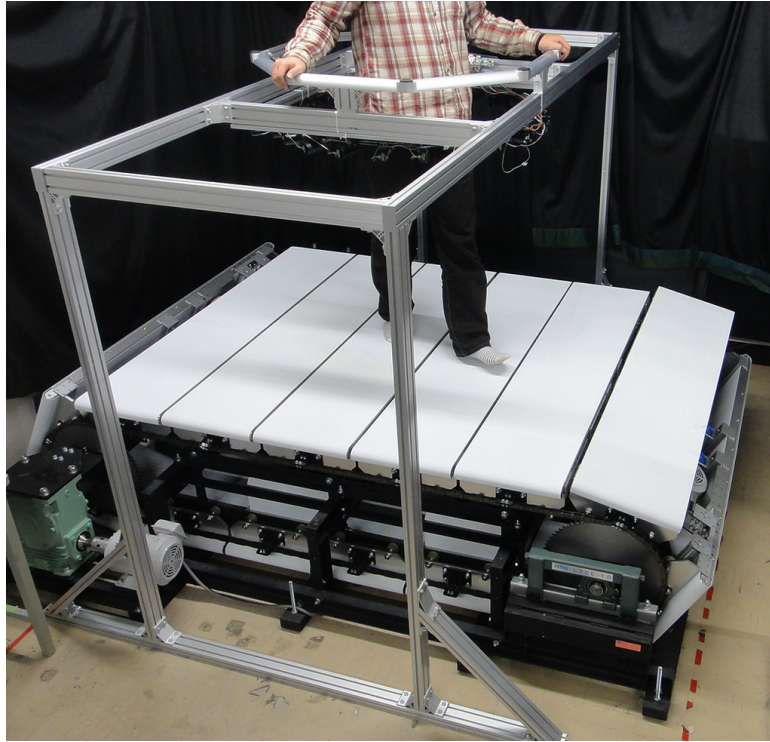


FIGURE 2.6 – *Torus Treadmill* : Tapis roulant 2D

inconvenients en abandonnant l'inclinaison de l'interface, forçant l'utilisateur à avoir une dynamique de marche très faible (longueur de pas 30 cm) et une cinématique identique pour les 2 jambes.

Pour contrer certaines de ces limitations, plusieurs systèmes à pédales comme le *Gaitmaster* (Fig.2.7 [Iwata et al., 2001]) ont vu le jour en proposant de nouvelles fonctionnalités (comme la marche sur sol non plan grâce à l'individualisation des stimuli sur chacun des pieds), mais sans garantir de gain au niveau du réalisme du fait d'une dynamique de pas très faible, d'un volume de travail très réduit et de la présence obligatoire de garde corps de sécurité pour assurer l'équilibre. Bien que limité dynamiquement et relativement contraint d'un point de vue de sécurité, les systèmes à pédales semblent les plus prometteurs en termes de réalisme de marche.

Enfin cette problématique globale délicate a également été abordée via la création d'une interface assez originale mais complexe qu'est le *CirculaFloor* (Fig.2.8) qui se compose de 4 dalles mobiles indépendantes ayant pour rôle de venir se placer sous les appuis de l'utilisateur durant sa marche. L'idée est intéressante mais la mise en œuvre ne respecte pas les besoins de stabilité (appuis sur une ou plusieurs dalles) et de temps réel (marche très lente).



FIGURE 2.7 – *Gaitmaster*



FIGURE 2.8 – *CirculaFloor*

Les solutions étudiées ici ne représentent qu’une partie des interfaces comportementales de locomotion visant à simuler la marche. D’autres existent mais sans mouvement de jambes ce qui nous éloigne des caractéristiques naturelles de marche recherchées initialement. Au regard de ce survol de solutions, on constate qu’aucune technologie ne permet de satisfaire pleinement ou de façon évidente l’immersion virtuelle durant la primitive comportementale de déplacement à pieds. Néanmoins comme évoqué plus haut, le réalisme ne signifie pas reproduire la réalité, donc nous devons étudier et analyser les modes d’action et de perception sollicités durant la marche pour retenir les principaux et concevoir une interface qui respecte ces spécifications. Cette phase, souvent minimisée, est essentielle car on conçoit très bien qu’on ne peut pas croire marcher (donc avancer le plus clair du temps) en restant globalement sur place.

Originalités de cette recherche

Au cours des études précédemment citées, les systèmes qui ont été créés sont pour la plupart des interfaces motrices qui permettent à l’utilisateur de rester sur place en exerçant une gestuelle proche des schèmes de déplacement fréquemment utilisés dans la vie courante (marche, pédalage, ...).

Notre approche se distingue nettement de celle-ci car l’interface de marche virtuelle développée se base en premier lieu sur une étude de la marche d’un point de vue biomécanique et perceptif. Nous avons pris en compte, au regard de ce que la littérature nous a offert, les modes de perception kinesthésique, vestibulaire et proprioceptif. Puis ces considérations physiologiques ont été conceptualisées de sorte à créer un cahier des charges de l’interface qu’on a voulu **sensori-motrice**.

Cette interface de marche étant perceptive et active, son instrumentation, ses actionnements et ses modes de commande ont fait l’objet d’une conception simultanée nécessaire pour la création de systèmes mécatroniques.

Enfin, nous n’avons jamais quitté des yeux l’objectif qui était de valider de bien fondé de la méthode de conception, des hypothèses de départ (sur la perception notamment), du dimensionnement et du pilotage pertinent de cette interface. Celle-ci a non seulement l’intérêt d’approcher le réalisme et de plus pouvoir étudier l’influence des différents facteurs biomécaniques et physiologiques présents durant la marche.

2.3 L’analyse de la marche

D’un point de vue **cinématique**, la marche se décompose en 8 phases alternant des périodes d’appui (68%) et de balancement du pied (32%) durant lesquelles la masse du sujet bascule sur l’une et l’autre

des deux jambes. Pour un sujet de taille moyenne qui avancerait à environ 1.2 m/s avec des pas de 69 cm, les pieds peuvent atteindre des vitesses de 4.5 m/s en phase de balancement et des accélérations de presque 30 m/s² au début de celle-ci. La position verticale du centre de masse décrit une sinusoïde selon le cycle de marche, mais d'amplitude assez faible (25 cm crête à crête environ). Celle-ci peut être évaluée par le biais des mesures d'effort des pieds sur le sol, ce qui est intéressant en terme de prédiction de changement de cadence ou de direction dans le cadre de conception de l'interface comportementale.

D'un point de vue **kinesthésique**, notre corps possède un grand nombre de capteurs pour la perception des actions locomotrices mais également pour décrire l'orientation du corps dans l'espace. Les fibres neuromusculaires mesurent les longueurs des muscles et leur vitesse d'élongation rendant ainsi un sujet plus ou moins réactif selon l'ordre de la réponse perçue. La fatigue musculaire est aussi génératrice de signaux sensoriels caractérisant l'action de marche effectuée. Le cerveau module à chaque pas par exemple la sensibilité des différents faisceaux sensoriels.

Le **système vestibulaire** de l'oreille interne quant à lui est assimilable à une centrale de mesure inertielle qui produit des signaux dans 3 axes orthogonaux relatifs aux accélérations de translation (otolithes) et de rotation (canaux semi-circulaires).

La **vection** (perception visuelle du mouvement) peut nous donner l'illusion de mouvement propre alors que nous restons sur place du fait de la mobilité de la scène, de son envergure et surtout de la cohérence de celle-ci avec l'hypothèse d'anticipation faite par notre cerveau. La perception de notre mouvement propre s'estime en ramenant le mouvement des objets environnant dans le repère de notre corps (codage égocentré) ou les uns par rapport aux autres (codage allocentré). Le système vestibulaire renseigne le corps sur ses mouvements propres par rapport aux rotations et à la gravité, il est donc égocentré.

La marche, comme d'autres activités, implique la nécessité de construction d'une cohérence multisensorielle basée sur les données issues des accéléromètres vestibulaires et du tachymètre visuel. Les neurones du noyau vestibulaire intègrent également les informations émanant des récepteurs musculaires du cou qui traduisent les changements d'orientation du regard et les accélérations perçues au niveau de la tête. La création de cohérence est complexe du fait de la nature variée des signaux (visuel, inertiel, sthénique) et aussi de leurs bandes passantes très différente qui rendent perceptibles les accélérations et leurs changements bien avant les signaux de vection.

La perception est donc une interprétation et sa cohérence est une construction dont les règles dépendent de facteurs endogènes et des actions que nous projetons. Les multiples manières d'agencer ces données sensorielles pour construire cette cohérence peuvent mener à la création d'illusions.

L'étude de l'action de marche et de la perception de cette action montre que les interfaces comportementales de déplacement pédestre dans un monde virtuel listées plus haut ne peuvent pas représenter cette action de façon réaliste et naturelle tant les modes de perception sont nombreux.

2.4 Conception de l'interface de marche

Le besoin qui ressort de l'analyse de l'existant et de l'étude de la marche est celui de concevoir une interface comportementale pour la locomotion pédestre uni-axiale qui permet une utilisation naturelle, c'est à dire tant du point de vue cinématique/dynamique que sensoriel. Dans un premier temps, le changement de direction sera proposé par substitution sensorielle ou métaphore. Notre cahier des charges se focalise donc sur l'interface sensori-motrice de marche (ne prend pas en compte l'immersion visuelle et sonore) qui doit équiper des centres de réalité virtuelle tels que des *CAVES* aux dimensions le plus souvent contenues dans une surface carrée de 3 mètres de côté.

Les modes de perception de la marche mettent en évidence l'intérêt de distinguer les retours sensoriels sur chacune des jambes ce qui amène à abandonner l'idée de tapis roulant unique dommageable au moins pendant la phase de double appui. De plus, la complexité de différents modes de perception (kinesthésique et vestibulaire) invite à concevoir une interface permettant de produire des trajectoires (effort, position, vitesse, accélération) de retour sensoriel d'ordre élevé pour stimuler les différents senseurs selon leur bande-passante respective. Enfin, le choix de la modularité pour ce système mécatronique est fait pour permettre une évolution possible vers un déplacement complet dans le plan au

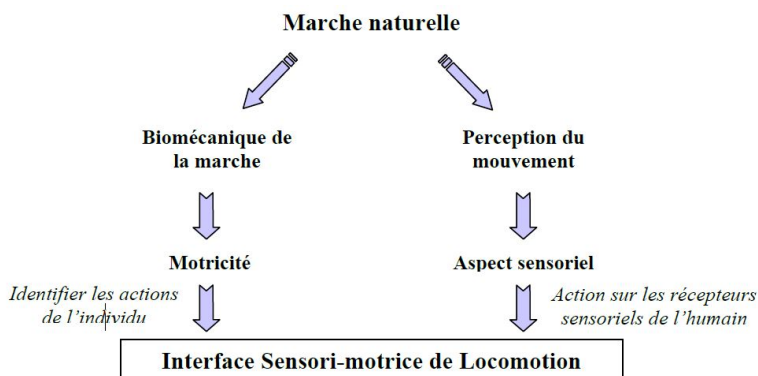


FIGURE 2.9 – Interface sensorimotrice naturelle

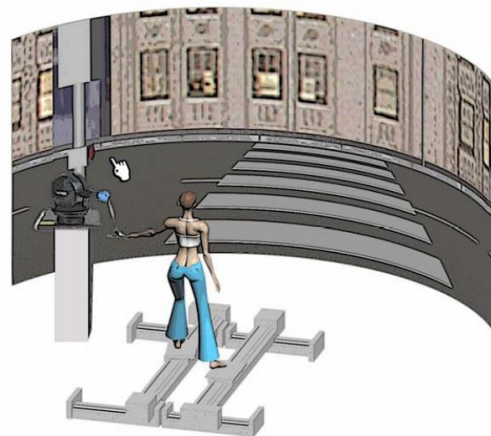


FIGURE 2.10 – Projet d'interface de marche

milieu d'un environnement immersif.

Si l'on souhaite que l'interface équipe les *CAVES* dans le but de simuler la marche en restant sur place et en conservant une orientation du sujet face à l'écran (ce qui est inutile en cas de port de casque immersif), il est important de permettre à l'utilisateur de percevoir en cohérence ses actions de marche naturelle sans qu'il ne perçoive le fait qu'il reste globalement sur place avec la même orientation. Nous tenterons donc de minimiser la perception des mouvements de rappel tant sur sa position que sur son orientation. Dans un premier temps, nous nous focaliserons sur une marche uni-axiale (le seul degré de liberté actionné étant longitudinal (intersection des plans sagittal et transversal) sachant qu'en 2D dans le plan transversal, nous considérerions 3 degrés de liberté pour chacun des 2 pieds à savoir une translation longitudinale, une translation transversale et une rotation d'axe vertical.

Imaginée sous forme d'un système à pédales où les pieds ne sont pas attachés, l'interface va devoir considérer les contraintes issues de la phase d'appui des pieds (où les efforts de l'utilisateur vont être à tour de rôle moteurs et résistants) et de la phase de balancement (où le pied subit des accélérations avoisinant 3 g et des vitesses supérieures à 4 m/s).

Dimensionnement La motorisation de l'interface a nécessité un dimensionnement soigné pour constituer le point de départ de notre conception. Les contraintes relatives aux forces d'appui motrices et résistantes de l'utilisateur sur les pédales, la dynamique de marche et les caractéristiques de frottement de guidage ont été pris en compte pour dimensionner les actionneurs. Pour calculer les actions et réactions de l'utilisateur sur une pédale lors de la phase d'appui, il nous faut anticiper la nature et la forme de la trajectoire de retour de la pédale. Les études sur l'analyse de la marche d'un point de vue cinématique et perception nous amènent à modéliser l'humain comme un pendule inverse doté d'une masse propre mais également d'actions motrices proches de celles employées durant la marche naturelle.

Le choix de la trajectoire de retour est déterminant pour dimensionner les efforts à mettre en œuvre par l'interface. Néanmoins, on pourrait croire que la phase de balancement est moins critique que la phase d'appui en termes de puissance à mettre en œuvre mais il faut garder à l'esprit que lors de la phase d'appui l'action de l'interface va être partiellement résistante (Fig. 2.12). De ce fait, la dynamique de la phase de balancement est à considérer sérieusement (Fig. 2.11).

Nous avons donc pris en compte les efforts d'appui lors de la marche normale et les vitesses des pieds par rapport au Centre de Masse de l'humain pour déterminer les caractéristiques dynamiques que l'interface doit avoir pour, ne serait ce, que conserver l'utilisateur globalement sur place. Les stimuli d'accélération à générer au niveau des pieds pour exciter à distance le système vestibulaire de l'utilisateur sans perdre l'équilibre n'ont pu être calculés que grossièrement, c'est pourquoi un coefficient de sécurité de 2 a été retenu. L'actionneur retenu pour mettre en mouvement chacune des pédales est donc un banc linéaire de translation actionné par un moteur *brushless* de 1200 W.

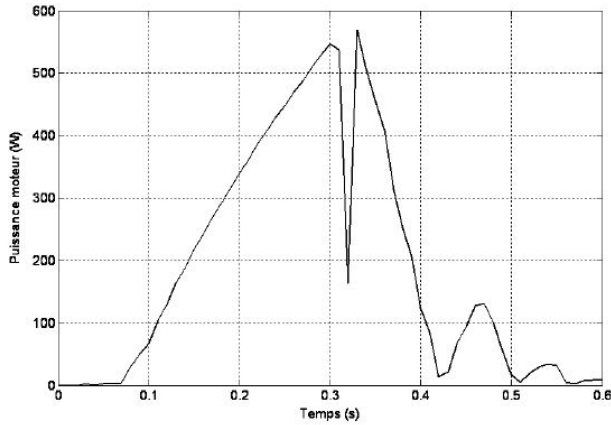


FIGURE 2.11 – Puissance requise en phase de balancement

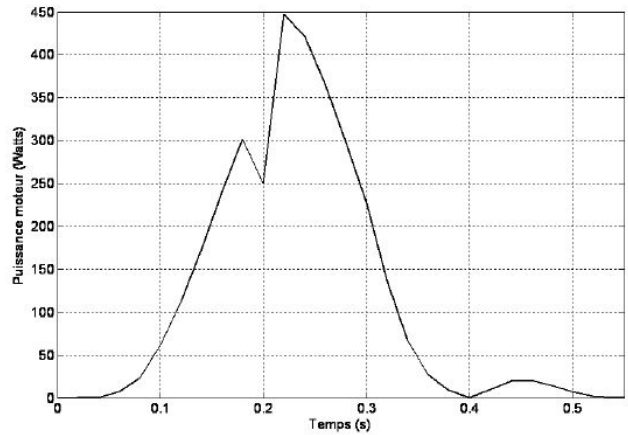


FIGURE 2.12 – Puissance requise en phase d'appui

Instrumentation L'interface à concevoir se veut sensorimotrice, ce qui signifie qu'elle a l'aptitude de percevoir les déplacements moteurs de l'utilisateur et de générer les stimuli sensoriels en retour. Par conséquent, l'instrumentation est extéroceptive pour traduire les mouvements de l'utilisateur et proprioceptive pour contrôler les actions générant des restitutions sensorielles.

Nous distinguons deux modes de fonctionnement pour les pédales selon que le pied soit en contact (phase d'appui ou double appui) ou non (phase de balancement). Ainsi l'axe motorisé de chacune des pédales produit un retour sensoriel suivant une trajectoire désirée lorsque le pied concerné est en contact avec la pédale, ou bien un suivi de celui-ci lors de la phase de balancement pour anticiper la prochaine pose (Fig.2.13).

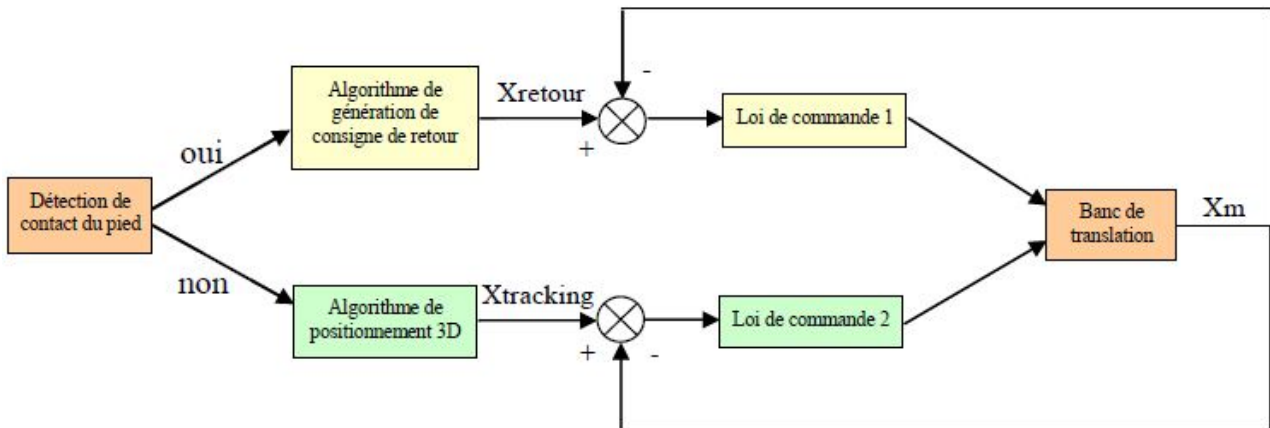


FIGURE 2.13 – Phases de pilotage de pédale

L'instrumentation est donc composée de :

- capteurs d'effort au niveau de chaque pédale pour détecter l'occurrence du contact du pied et pour mesurer le torseur des efforts de l'action de l'utilisateur sur chaque pédale afin d'anticiper la taille du pas à venir,
- capteurs de position du pied lors de sa phase de balancement pour assurer le suivi de pédale correspondante,
- capteurs de position/vitesse de chacune des pédales sur leur axe motorisé respectif pour assurer le pilotage de celles-ci.

La surface d'appui supérieure de la pédale (semelle) repose sur 4 pieds instrumentés par des capteurs FSR qui mesurent les **efforts verticaux** et la **position variable du centre de pression** du pied sur la pédale (hypothèse de non transmission de moments purs du pied sur la pédale dans le plan de

celle-ci). En série, un capteur d'effort longitudinal mesure l'**effort contributeur du pied dans le plan horizontal et suivant l'axe d'avance** de l'utilisateur (montage découplé par glissière à billes).

La position des pieds et celle du centre de masse (COM) à chaque instant traduisent assez bien le cycle de marche, c'est pourquoi nous avons développé deux systèmes de mesure leur étant dédiés. Chacun de ces deux systèmes est composé d'une caméra placée (384 x 288 pixels) qui filme l'utilisateur selon son axe d'avance par devant pour capter la position du tibia et en déduire celle du talon en phase de balancement, et par derrière pour capter la position du bas du dos proche de celle du COM. L'utilisateur porte donc des motifs identifiés comme des marqueurs dans le bas du dos et sur chaque tibia. Ces motifs blancs sur fond noir sont inclus dans une forme de type ellipse qui a la particularité de se transformer dans le plan image en une ellipse de dimensions différentes indépendamment de la transformation géométrique qui a eu lieu entre le point de vue et l'objet suivi (tibia ou COM). Ainsi les 5 paramètres dans le plan image que sont les coordonnées X_c , Y_c du centre de l'ellipse, les rayons R_1 et R_2 , et l'angle de rotation de l'ellipse selon l'axe optique, θ , constituent les seuls paramètres à identifier à chaque instant (Fig. 2.14).

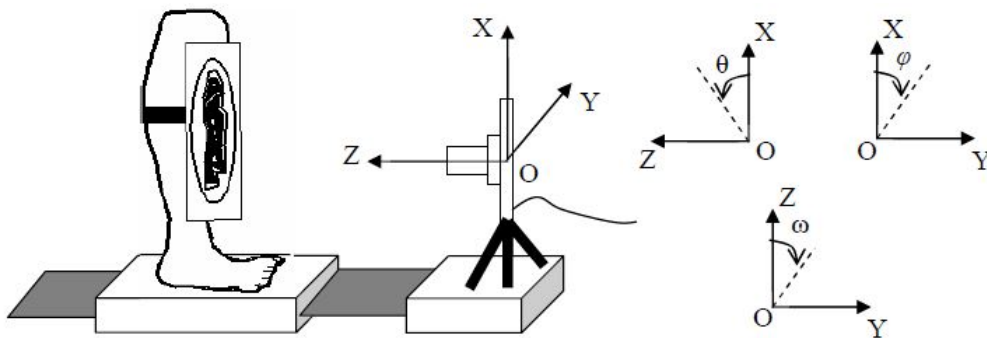


FIGURE 2.14 – Repère de caméra pour le suivi de pied

Lors de la marche, le tibia subit de très faibles rotations suivant l'axe vertical (Fig. 2.15) ce qui permet, en les négligeant, de calculer directement la distance entre la caméra et le tibia (la transformation du motif en forme de rectangle sur le tibia permet d'obtenir rapidement et de façon approchée cette distance avec une incertitude de 9,5 mm sur 1,5 m).

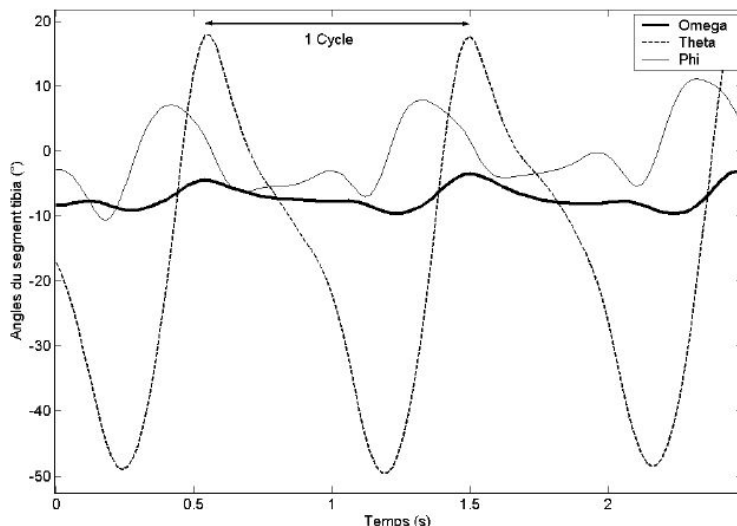


FIGURE 2.15 – Rotations du tibia durant la marche

L'approximation de la transformation géométrique qui modifie l'image du motif dans le repère de la caméra se fait en utilisant un calcul d'homographie appliqué aux points caractéristiques qui sont les sommets des 4 triangles (Fig.2.16) appartenant aux petits et grands rayons de l'ellipse. Ces points sont identifiés dans l'image avec une résolution subpixel à partir du calcul d'intersection des 2 génératrices linéaires formant le sommet concerné. Cette méthode offre une approximation de ± 0.03 pixel alors que l'incertitude due à la distorsion de la lentille est de ± 0.2 pixel ce qui est bien supérieur.

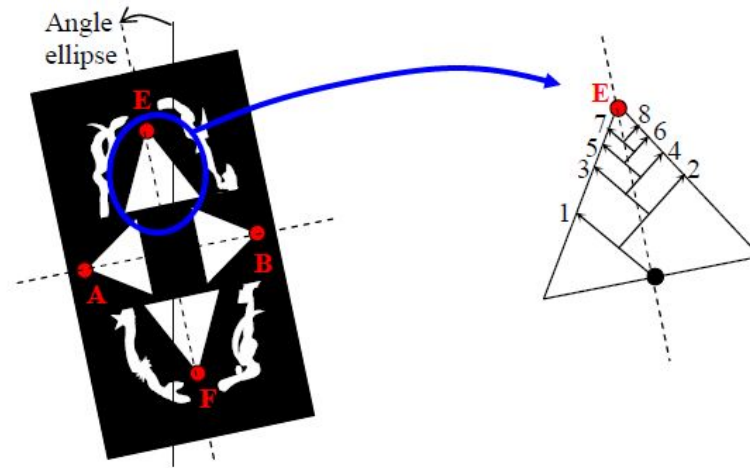


FIGURE 2.16 – Le motif et ses points caractéristiques

La validation de cette mesure est faite via l'illustration donnée sur les figures 2.17 et 2.18 où l'on constate une erreur statique maximale de 10 mm et un peu de bruit sur l'approximation angulaire qui ne seront pas foncièrement dommageables pour réaliser la tâche de suivi du pied (talon) durant la phase de balancement de la jambe.

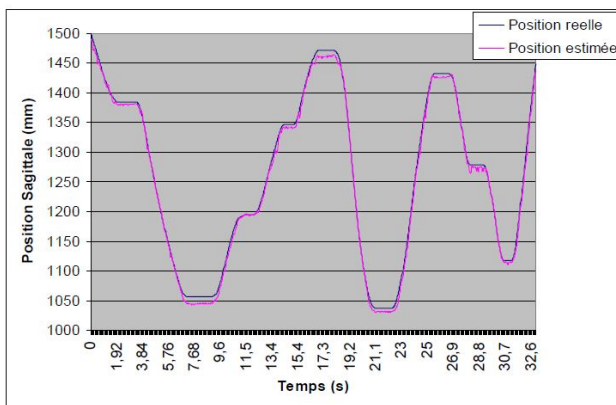


FIGURE 2.17 – Validation du suivi de motif

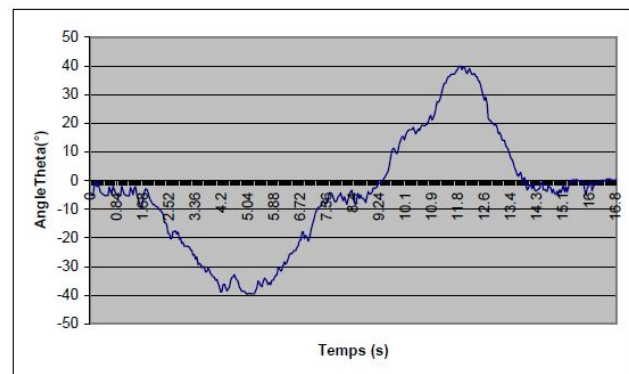


FIGURE 2.18 – Validation du suivi de motif

La dernière partie d'instrumentation de l'interface est celle liée aux déplacements générés par les actionneurs. Les moteurs *brushless* choisis sont équipés de codeur pour satisfaire les besoins de leur carte de commande. Par conséquent, les informations de déplacement sont directement exploitées à partir des mesures fournies par les codeurs (position, vitesse, accélération linéaires).

Sécurité de l'interface La sécurité de l'interface est prise en compte tout d'abord dans le fait que le couple des moteurs est bridé à 5 N.m au niveau de la carte de commande, sachant que la génération de la commande est elle-même limitée au niveau logiciel. En cas de dysfonctionnement constaté (erreur de détection ou de suivi de cible, *timeout*, lecture de données erronées, retard trop important du suivi, franchissement de barrière anti-matériel sur les glissières...), un arrêt d'urgence logiciel est activé pour stopper les axes.

Chaque axe est muni de deux butées logicielles et deux butées solides (caoutchouc) à ses extrémités. L'utilisateur dispose de main courante en cas de déséquilibre et est équipé d'un harnais à enrouleur pour le retenir en cas de chute. Enfin, un bouton d'arrêt d'urgence est accessible par l'utilisateur et un opérateur externe pour stopper l'interface de façon prioritaire.

2.4.1 Synthèse de conception

L'analyse des modes de perception et d'action de la marche a mis en lumière la multiplicité des facteurs intervenants dans la marche naturelle et qui ne sont pas considérées intégralement dans les

interfaces décrites dans l'état de l'art 2.2. La conceptualisation de ces facteurs a produit une liste d'exigences sensorimotrices que l'interface nouvelle génération doit comporter pour prétendre satisfaire une marche naturelle dans un environnement immersif.

Ces spécifications techniques ont déterminé les choix technologiques et le dimensionnement des organes de perception et d'action en prenant une marge liée aux incertitudes et à la flexibilité des différentes lois de commande envisagées.

Cette phase de conception de système mécatronique s'est donc nourrie des spécifications techniques tirées des besoins liés à l'interface sensorimotrice à développer. Par ailleurs, les solutions retenues tant au niveau de l'actionnement que de l'instrumentation ont requis :

- l'usage de modèles comportementaux relatifs à la biomécanique de la marche humaine,
- des choix d'organes d'action et de perception dimensionnés en conséquence,
- le développement et la mise en œuvre de technologies et méthodes d'instrumentation adaptées (pédale instrumentée, suivi visuel de cible/motif).

Les méthodes de conception mécatronique utilisées ici ont la particularité de s'attarder sur les spécifications issues des besoins et d'étudier le système dans sa globalité pour tendre à répondre au mieux aux performances escomptées de cette interface de marche virtuelle innovante.

2.5 Consigne et commande de l'interface de marche

Le pilotage de l'interface nécessite de décomposer les trajectoires à suivre suivant les 2 phases distinctes que sont le balancement et l'appui. Durant la phase de balancement, l'interface est dite motrice, car elle numérise les actions de l'utilisateur, ici en suivant visuellement le pied en mouvement par rapport au sol virtuel. Le suivi de cible vu précédemment dans le paragraphe 2.4 fournit les informations de position et d'orientation des tibias de l'utilisateur à partir desquelles nous en déduisons celles des talons (premier point de contact avec la pédale). Avant emploi, une phase d'initialisation de l'interface sert à saisir le paramètre anthropomorphique, d , de l'utilisateur et à mesurer la hauteur des cibles, h , portées par ce dernier (Fig.2.19).

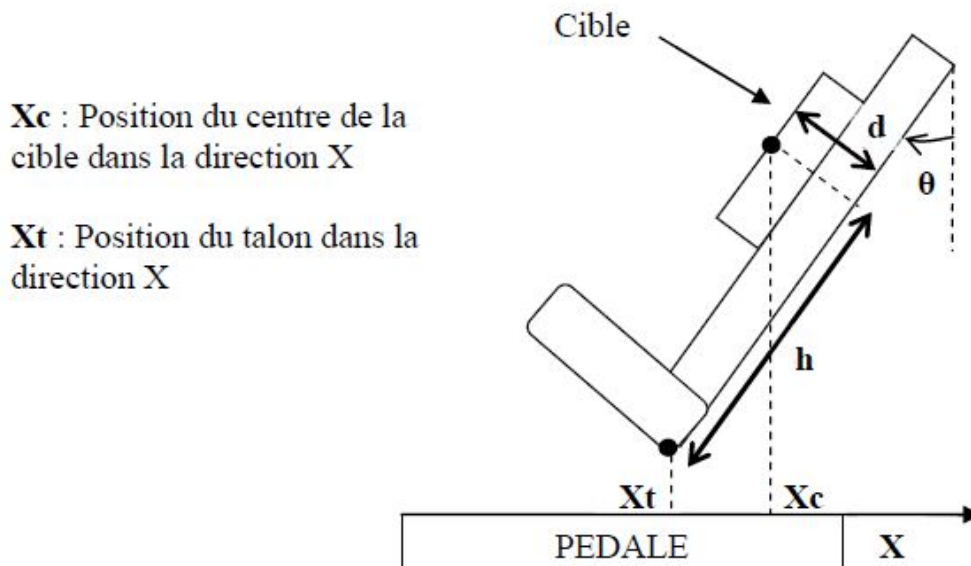


FIGURE 2.19 – Validation du suivi de motif

La période d'échantillonnage visuel incluant l'acquisition d'image, la poursuite de cible, l'extraction des points caractéristiques, le calcul homographique et la transmission des données est de 50 ms. Le pilotage des moteurs peut être rafraîchi toutes les 10 ms ce qui rend l'instrumentation visuelle sous-échantillonnée. Afin d'éviter toute saccade dans le pilotage des pédales due à un défaut du signal de retour (bruit, bruit de quantification, période d'échantillonnage trop longue), nous lissons le signal de retour par le biais d'un filtre passe-bas à Réponse Impulsionnelle Finie qui a néanmoins l'inconvénient

de présenter des écarts notables au niveau des forts changements de pente qui sont présents lors de l'attaque talon.

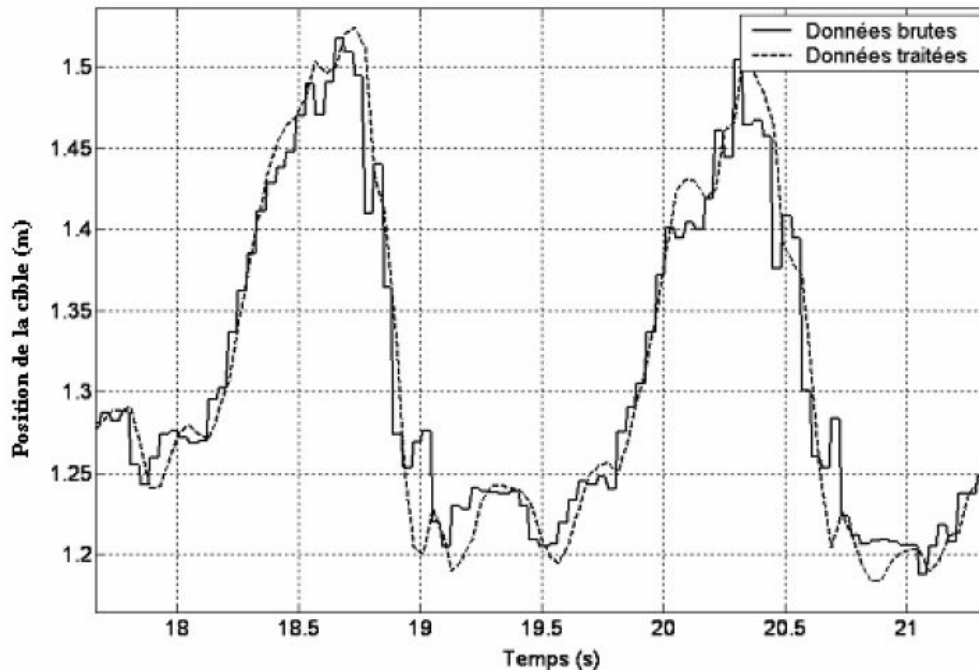


FIGURE 2.20 – Positions mesurée et filtrée de la position de la cible

Pour pallier ce problème, la position du pied en balancement est désormais estimée par un filtre RIF muni d'un facteur d'innovation qui intègre l'erreur d'estimation commise sur l'échantillon précédent, ce qui a pour effet de lisser le signal de retour sans imposer de déphasage néfaste au niveau des points d'inflexion du signal de position du pied (Fig.2.20). Ce signal obtenu sera donc exploité comme *feedback* pour alimenter un correcteur simple lors de la phase de balancement dans le pilotage complet de l'interface.

2.5.1 Trajectoire de la pédale durant l'appui

L'interface de marche dispose de 2 pédales pour le retour sensoriel puisse être dissocié pour chacune des jambes de l'utilisateur dans le but d'exciter de façon cohérente (et réaliste !) ses perceptions vestibulaire et kinesthésique (la vection relevant davantage de l'immersion visuelle n'est pas considérée dans la conception propre de cette interface de marche). De ce fait, il ne nous semble pas intéressant de reproduire le fonctionnement d'un tapis roulant qui s'attacherait à conserver le centre de masse de l'utilisateur sur place au risque d'annuler toute perception des accélérations d'avance et de percevoir les accélérations de retour.

Nous cherchons donc à rendre l'interface la plus transparente possible aux yeux de l'utilisateur en le conservant globalement sur place tout en lui offrant la possibilité de percevoir l'efficacité de ses actions d'avance. Ainsi nous faisons le choix que l'utilisateur posera son pied au début de la phase d'appui sur une pédale arrêtée (la vitesse d'impact pied /sol ne sera donc pas conforme à la réalité) et décollera son pied de la pédale au début de la phase de balancement dans les mêmes conditions.

Trajectoire de retour d'ordre 5 Le système vestibulaire, majoritairement constitué d'organes sensibles aux accélérations, est crucial pour le maintien de l'équilibre et donc souvent mis en cause dans les problèmes de vertige. L'interface ne doit donc pas prendre le risque de déséquilibrer l'utilisateur par manque de cohérence vestibulaire ou désaccord du retour sensoriel avec la dynamique de marche souhaitée. Pour que le retour sur place soit le moins perceptible possible pour l'utilisateur, on applique une trajectoire d'ordre 5 qui a pour particularité de permettre d'avoir des accélérations initiale et finale nulles et une continuité du signal de Jerk (dérivable). Ce retour d'environ 0,7 m s'effectue pendant une période de 0,6 s, ce qui crée une trajectoire telle que proposée sur les figures 2.21 et 2.22.

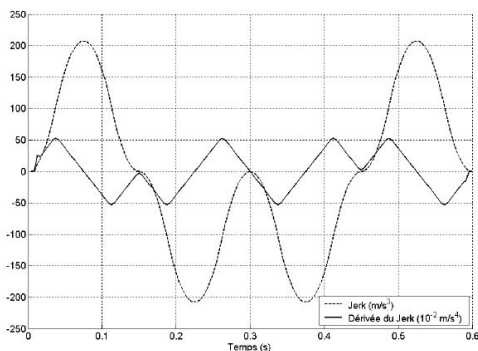


FIGURE 2.21 – Consigne de retour en position d'ordre 5 - Jerk

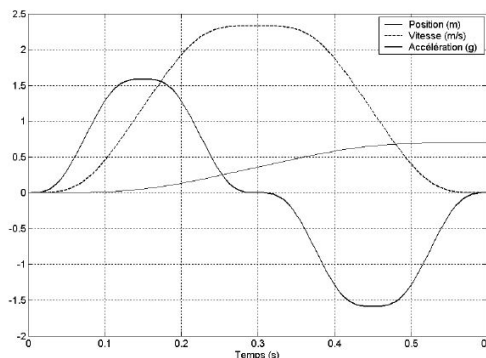


FIGURE 2.22 – Consigne de retour en position d'ordre 5 - Accélération

Trajectoire sinusoïdale Lors des phases de balancement de la marche, et donc de simple appui, le corps peut être assimilé à un pendule inverse où les mouvements oscillatoires sont reliés entre eux par des phases de double appui. L'altitude du COM, à l'image de sa vitesse d'avance, est très proche d'une courbe sinusoïdale (Fig.2.23).

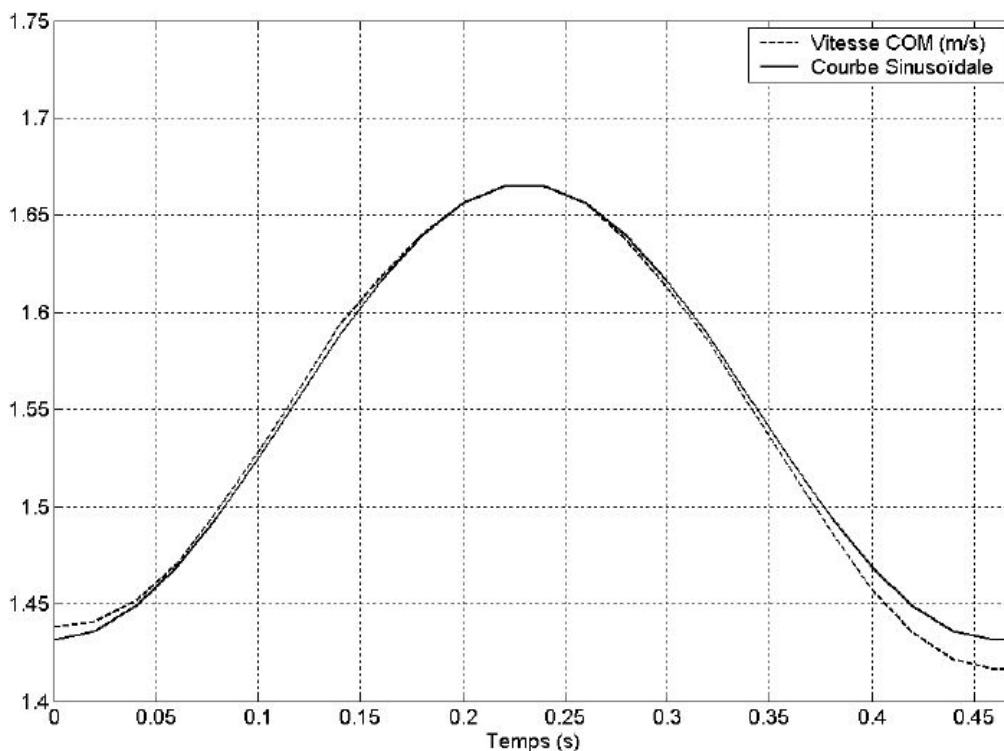


FIGURE 2.23 – Vitesse du COM et approximation sinusoïdale

Par conséquent, nous pouvons imaginer un retour en position de la pédale d'appui (et des 2 pédales lors du double-appui) de forme sinusoïdale de sorte à contenir le COM globalement au même endroit. Très proche de la trajectoire d'ordre 5, ce retour néanmoins diffère quelque peu au moment du changement de signe des accélérations (mi-parcours) et aura pour conséquence d'aider l'utilisateur à faire le pas, ce qui est bienvenu pour le maintien de son équilibre dynamique.

Trajectoire pseudo-naturelle Les deux trajectoires proposées précédemment ne comportent pas de phase de retour à vitesse constante en se laissant la possibilité d'exploiter de plus grandes courses pour lisser les phases d'accélération et de décélération. Néanmoins on peut penser que pour limiter la perception de retour sur place, il est intéressant d'utiliser une phase où l'accélération des pédales (donc de l'utilisateur) est très faible afin de ne pas exciter les capteurs du système vestibulaire. On rappelle que les otholites présents dans l'utricule fonctionnent comme des accéléromètres dans le plan horizontal. Le temps à

partir duquel une accélération sera perçue par le système vestibulaire dépend de l'amplitude de celle-ci comme l'illustre la figure 2.24. Ainsi une accélération de 0,8 G ne sera pas forcément perçue par le système vestibulaire si elle n'est pas maintenue au-delà d'une seconde.

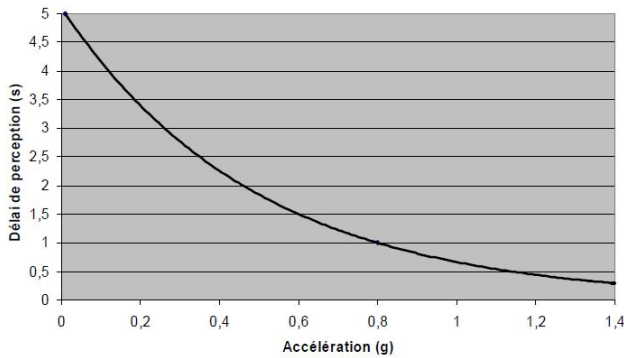


FIGURE 2.24 – Seuil temporel de perception d'accélération linéaire [Young et al., 1983]

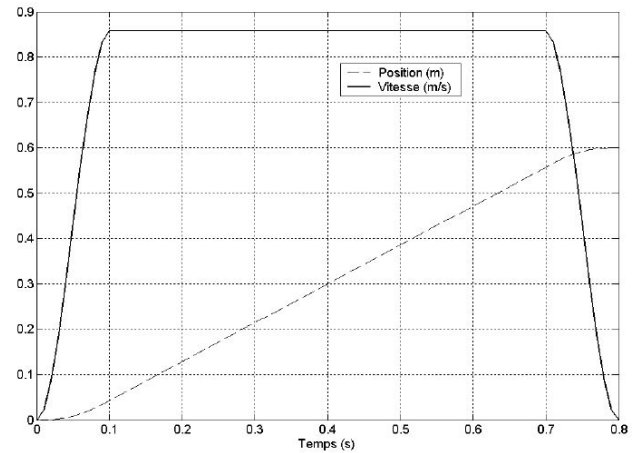


FIGURE 2.25 – Consigne de retour en position pseudo-naturelle

Nous utilisons cette hypothèse pour façonner une trajectoire de retour 60 cm durant 0,8 s et qui a une accélération maximale de 1 G durant 0,1 s (Fig.2.25). Ainsi on souhaite maximiser la durée de retour à vitesse constante tout en conservant les conditions initiales et finales nulles aux niveaux des vitesses et accélérations. Cette trajectoire peut contribuer à rendre le retour non-perceptible au niveau vestibulaire d'autant que le corps par le biais des muscles du cou agit comme un filtre passe-bas entre les mouvements du COM et de la tête (donc l'oreille interne) [Coerman, 1962].

Malgré la prise en compte d'un grand nombre de paramètres d'action et de perception de l'humain lors de la marche, ces trois types de trajectoires seront par la suite testés pour fournir un retour critique sur le réalisme qu'ils procurent.

2.5.2 Synthèse de commande

Le pilotage des actionneurs de pédales se fait via des cartes variateur dédiées aux moteurs *brushless* qui ont la possibilité d'assurer un asservissement de couple (gestion du déphasage vectoriel du moteur ou variation du courant de commande) ou un asservissement de position grâce au signal de retour produit par les codeurs internes. Nous avons fait le choix de commander les moteurs en couple et de synthétiser un correcteur pour réaliser l'asservissement de position des pédales.

Suite à une réponse à un échelon de couple, le modèle d'un axe piloté (comprenant le moteur et le guidage linéaire) a été assimilé à un système du premier ordre entre le couple moteur et la vitesse de linéaire de sortie. Ceci a permis d'identifier les paramètres de frottements internes et d'inertie équivalente de notre modèle de connaissance. Le correcteur choisi de type PID a été calculé par placement de pôles pour satisfaire la précision, la stabilité et la robustesse du système (Marge de gain 13 dB à 130 rd/s. Marge de phase : 60° à 40 rd/s). Les réponses obtenues suivant les différentes trajectoires de consigne sont satisfaisantes. C'est à dire que le système rejette les perturbations dues aux actions de l'utilisateur sur la pédale et ne crée pas d'oscillations parasites pouvant troubler le réalisme du rendu. Le surdimensionnement de l'interface au niveau des actionneurs contribuent sans doute au bon comportement de l'interface.

Architecture logicielle Pour s'adapter aux différentes morphologies d'individus et types de marche, l'interface de commande a été conçue de façon modulable pour jouer différentes stratégies de retour avec les paramètres propres de l'utilisateur selon divers scénarios simulant la marche en avant, en arrière, perturbée comme dans un train ou encore glissante comme en ski de fond ou sur sol gelé.

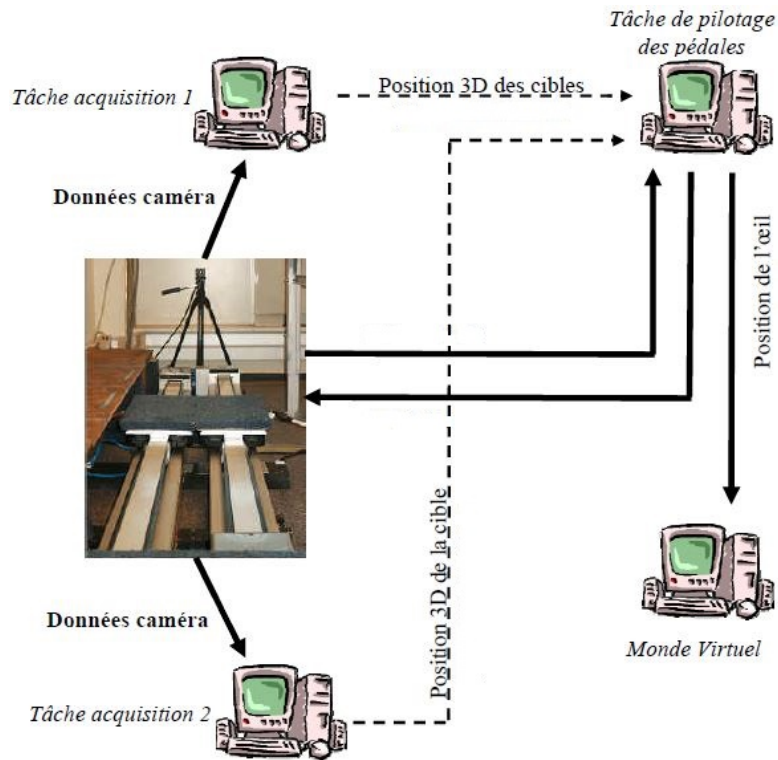


FIGURE 2.26 – Architecture matérielle

Pour ce faire, un PC fait l'acquisition des deux caméras frontales de sorte à transmettre la position 3D des talons à un PC de pilotage. Ce dernier recueille également l'information de la position 3D du COM fournie par un PC relié à la caméra arrière. Le PC de pilotage gère ces informations et les entrées /sorties issues d'une carte d'acquisition temps réel (NI PCI 6251) pour asservir le mouvement des pédales. Enfin, il transmet également la position de l'oeil de l'utilisateur au PC en charge du monde virtuel et de l'affichage (Fig. 2.26).

Dans le cadre d'une marche en avant par exemple, le système complet peut être décrit sous forme d'un automate à 7 états finis où chaque pédale possède 3 états définissant sa dynamique selon la présence de contact avec le pied ou non (pied en contact → phase de retour ; pied en l'air → phase de balancement et mode de suivi ; pédale immobile → position orthostatique).

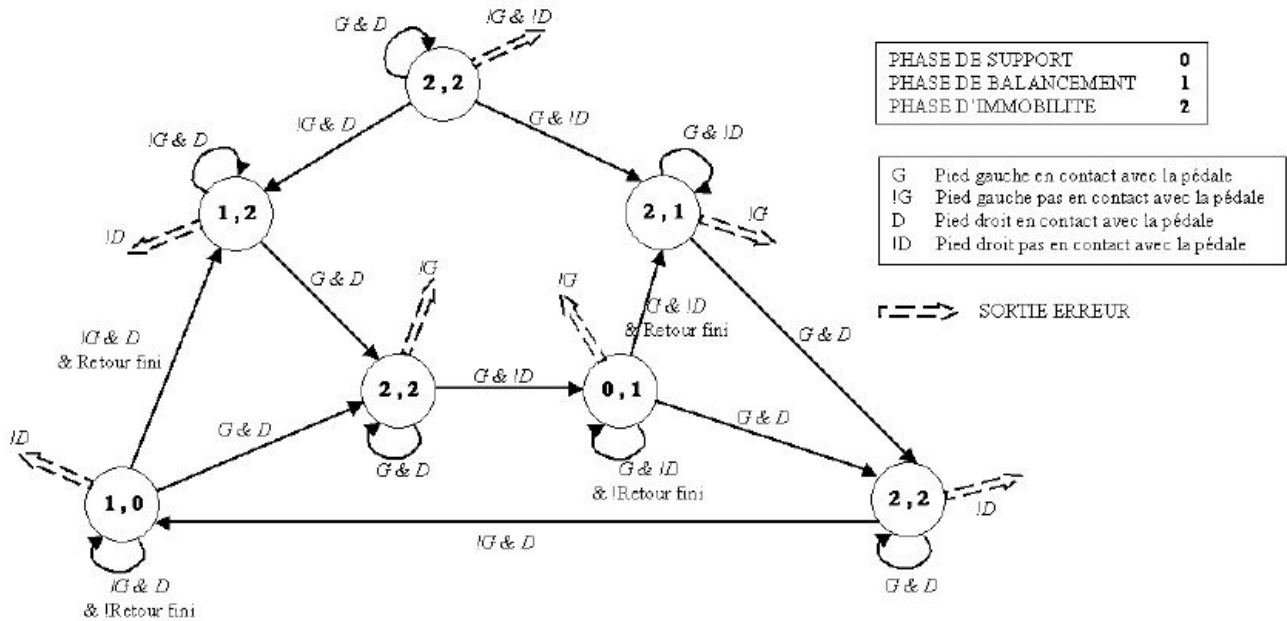


FIGURE 2.27 – Automate à états finis

La programmation en C++ de toute l'interface offre la possibilité à l'utilisateur de choisir le mode de traitement des données pour la phase de suivi (données brutes, filtrage, ...), le type de consigne de retour durant la phase d'appui ainsi que le type de marche souhaité. Ce paramétrage définit notamment si en phase de double-appui les pédales sont immobiles ou couplées en vitesse.

La commande étant validée, nous passons à la phase expérimentale qui vise à évaluer la qualité des trajectoires de retour lors d'une immersion de l'utilisateur dans un monde virtuel.

2.6 Expérimentation de l'interface de marche in situ

Pour valider la pertinence de la conception mécatronique de l'interface de marche comme interface comportementale sensorimotrice, nous devons rappeler que celle-ci doit être transparente au niveau physique aux yeux de l'utilisateur. C'est ce qui a été fait en prévoyant d'instrumenter et suivre les mouvements de l'utilisateur par des solutions optiques sans contact (3 caméras vidéo).

Pour ce qui est de l'aspect totalement immersif, nous distinguons 2 niveaux :

- Immersion et interaction sensorimotrices (I^2 sensorimotrices) → l'interface interprète les actions motrices de l'utilisateur et lui fournit des réponses sensorielles en adéquation avec les caractéristiques d'amplitude et de dynamique des sens stimulés.
- Immersion et interaction mentales (I^2 mentales) → l'interface immerge totalement l'utilisateur dans le monde virtuel en le décentralisant des retours sensoriels synthétisés par les interfaces comportementales.

I^2 sensorimotrices L'interface de marche satisfait la dynamique du pas de l'utilisateur comme l'illustre la figure 2.28 où la taille du pas est en moyenne de 0,6 m avec une consigne de retour sinusoïdale comme pratiqué sur sol fixe (Fig.2.3) et montre une progression d'amplitude à mesure que la vitesse d'avance augmente (Fig. 2.29). La vitesse sur l'interface avoisine 4 m/s identiquement à la marche normale.

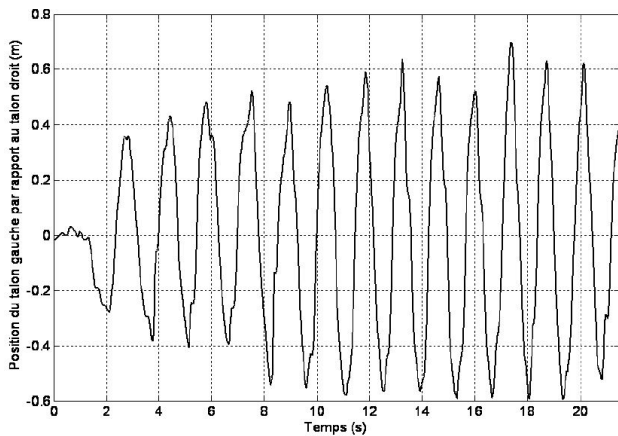


FIGURE 2.28 – Taille des pas sur l'interface

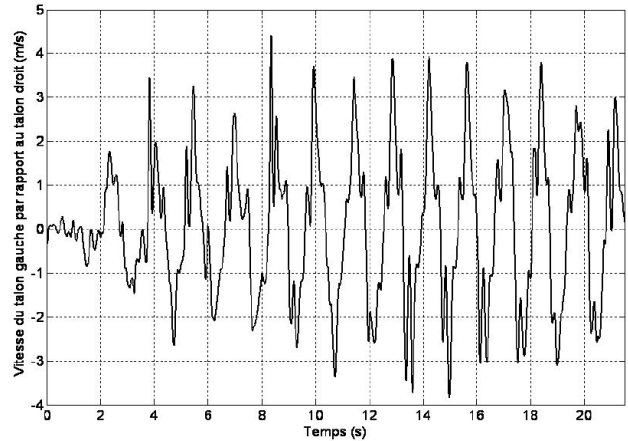


FIGURE 2.29 – Vitesse d'avance sur l'interface

Par ailleurs, l'inclinaison du tibia est également représentative pour qualifier une démarche naturelle. La figure 2.30 montre que le pied quitte la pédale alors que le tibia est incliné entre -15 et -20° par rapport à la verticale (habituellement -20° lors d'une marche sur sol fixe) et se repose en phase d'appui avec un angle entre 0 et 5° . Ceci est très proche de la marche normale, bien qu'on note que l'utilisateur par précaution fléchit légèrement le genou lors de l'attaque talon pour se donner plus de flexibilité d'action si souhaité.

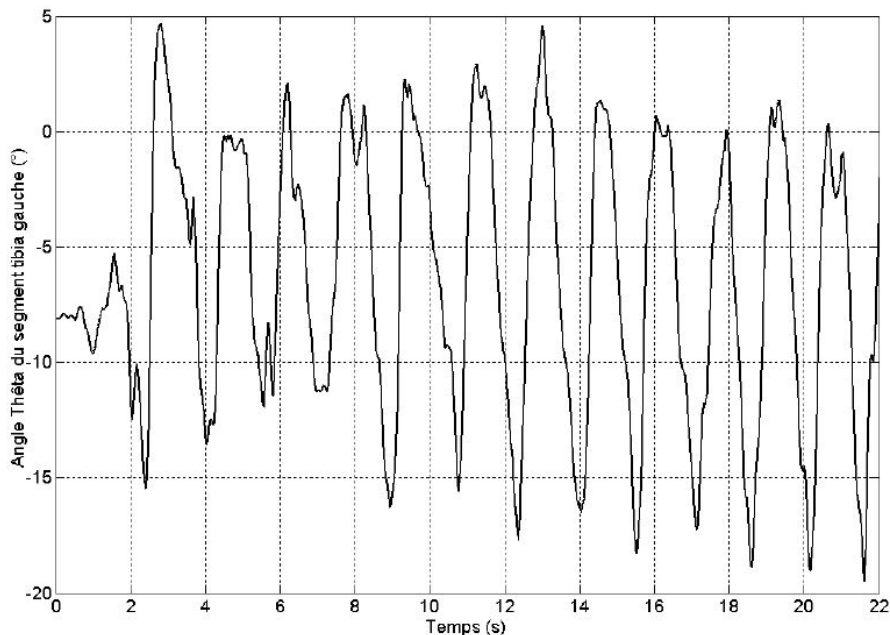


FIGURE 2.30 – Inclinaison du tibia lors de la marche sur l'interface

Ces essais illustrent le fait que l'interface satisfait les besoins kinesthésiques exigés par la marche humaine. L'équilibre de marche est tributaire de la cohérence entre les ressentis vestibulaire, kinesthésique et visuel ce que nous n'avons pas encore testé ici. Afin de valider l'aptitude de l'interface à bluffer les retours kinesthésique et vestibulaire, nous avons annulé le retour visuel de l'utilisateur en lui bandant les yeux et constaté que l'équilibre était maintenu lors d'une marche à allure normale (cf 2.6). Sans toutefois garantir d'ores et déjà que le réalisme de marche recherché est atteint par le biais de cette interface, nous pouvons valider son bon fonctionnement en termes d'Immersion et d'Interaction Sensorimotrices.

I² mentales Pour qualifier l'I² mentales, nous pouvons évaluer la durée d'apprentissage d'un utilisateur découvrant la plate-forme afin de la caractériser comme interface comportementale pseudo-naturelle. Pour des raisons de mise en sécurité et de représentativité du panel de participants, nous n'avons pas

objectivement estimé cette caractéristique, néanmoins deux utilisateurs débutant sur cette interface se sont prêtés à l'expérimentation. Pour chacun d'eux (en bonne aptitude physique), cinq essais ont suffi pour s'adapter à l'usage de la machine et ne plus craindre de perte d'équilibre (l'appréhension de ne pas avoir de pédale sous le pied au moment de l'appui est le premier frein à l'adaptation).

A défaut de pouvoir objectivement évaluer l'efficacité des différentes stratégies de retour, nous avons recueilli les ressentis convergents des deux utilisateurs qui les ordonnent par intérêt.

Ainsi le retour d'ordre 5 s'avère être assez déstabilisant lorsque l'utilisateur souhaite accélérer, ce qui accentue la dynamique de retour (le sol semble se dérober).

La stratégie de retour selon la trajectoire sinusoïdale est bien appréciée par les utilisateurs car elle réduit les efforts nécessaires de l'utilisateur sur le sol virtuel (la pédale). Le centre de masse étant presque maintenu sur place, les problèmes de déséquilibre sont réduits et on se rapproche le fonctionnement d'un tapis roulant à vitesse constante.

Enfin le retour pseudo-naturel est plus fatigant que le précédent mais se rapproche le plus de la marche sur sol fixe, car le centre de masse progresse vers l'avant du fait des accélérations motrices de l'utilisateur.

2.7 L'apport de la conception mécatronique pour la réalité virtuelle

La prise en compte, avant la conception du système, de facteurs biomécaniques et de perception indispensables pour la réalité virtuelle a permis de spécifier les caractéristiques physiques (performances escomptées) et technologiques de l'interface de marche. La distribution des fonctions de perception et d'action sur les différents organes contribue à assurer le caractère sensorimoteur de l'interface de marche.

Les solutions techniques mises en œuvre ont été dimensionnées en incorporant dès la phase de conception les algorithmes dynamiques qui assurent le maintien global de l'utilisateur sur place. De ce fait, la conception propre de l'interface de marche autorise une grande variété de stratégies et de types de pilotage du système pour étudier la qualité d'immersion d'un utilisateur en déplacement dans un environnement virtuel. Par ce biais, l'interface répond favorablement à ses prétentions initiales pour faire progresser nos connaissances sur nos modes de perception et d'action.

Même s'il est possible de marcher les yeux bandés sur l'interface (validant ainsi l' T^2 sensori-motrices 2.6), il n'a pas été montré qu'une stratégie de retour pouvait clairement bluffer les sens humains au point de qualifier l'interaction comme étant quasi-naturelle. Néanmoins l'usage d'un joystick ad hoc pour l'orientation de marche a montré que l'utilisateur savait progresser dans un environnement virtuel comme désiré.

La conception de systèmes mécatroniques comme interfaces comportementales est de grand intérêt comme pour les haptiques de manipulation par exemple. Ces travaux élargissent cet intérêt au niveau des interfaces de locomotion au plus proche des ressentis naturels humains qui sont ceux de la marche.

Bilan de l'activité Ces travaux sont le fruit des activités de recherche qui se sont fédérées autour de la thèse d'Yves DUPUIS pour laquelle j'ai participé au co-encadrement à la hauteur de 50% alternativement avec Jean-Paul Frachet puis Dominique Millet. La conception de cette interface de marche a été activement soutenue par la contribution de Jean-Luc Impagliazzo sur les parties de tracking visuel et d'interfaçage avec le monde virtuel dont il est à l'origine.

A travers cette thèse, l'équipe Réalité Virtuelle de Supméca composée de trois maîtres de conférences et d'un professeur des universités, s'est positionnée sur le thème de l'immersion virtuelle avec l'originalité d'adresser la problématique du déplacement naturel dans un environnement virtuel avec une approche égocentrée qui a guidé la conception innovante de cette interface de marche. Les avancées obtenues distinguent clairement cette interface des autres issues de la même communauté scientifique nationale et internationale.

Ainsi les productions scientifiques orientées en accord avec notre partenaire industrielle CIFRE qui est le CETIM ont mis en avant une synthèse de l'existant sur les interfaces comportementales, la conception mécatronique intégrée comprenant dès le début l'architecture distribuée d'actionnement

/d'instrumentation et les lois de commande pressenties, et l'exploitation du système conçu comme interface exploratoire d'immersion virtuelle.

2.8 Perspectives de l'activité

Bien que n'ayant pas été poursuivie au sein du laboratoire, cette étude laisse entrevoir plusieurs pistes à investiguer. On note tout d'abord que les interfaces de marche pour la réalité virtuelle ne permettent toujours pas d'envisager une marche proche du naturel car elles se basent sur une marche sur place avec [Virtuix, 2019, Lee et al., 2018] ou sans interface [Park and Kim, 2017].

Les applications visées concernent le jeu vidéo, mais aussi les démonstrations ou simulation qui ont trait à la formation ou au développement d'infrastructures industrielles. Dès lors qu'on envisage un déplacement ou une interaction motrice, le casque d'immersion est souvent privilégié au détriment du CAVE qui est bien plus contraignant à mettre en oeuvre.

Ceci signifie qu'il n'est pas prioritaire de marcher sur place en conservant absolument l'orientation face à un mur de projection. Et pourtant la volonté de permettre une marche naturelle reste d'actualité bien que l'indépendance des jambes et la cohérence vestibulaire /kinesthésie ne soient pas au coeur des préoccupations [Omnifinity, 2019].

On constate qu'aujourd'hui les techniques d'immersion ont très largement évolué en favorisant le temps réel (interaction) tout en se démocratisant pour inonder le quotidien de bon nombre de joueurs. On distingue encore néanmoins la réalité virtuelle de l'immersion en monde virtuel (proposée par les jeux vidéo) par l'usage d'interfaces comportementales sensori-motrices qui permettent d'interagir de façon quasi-naturelle.

Le déplacement (sans véhicule) en courant ou marchant reste donc toujours à améliorer pour tenter de revenir au niveau de l'immersion visuelle. La conception de l'interface de marche réalisée durant la thèse d'Yves Dupuis a montré que la forme des trajectoires de retour sur les 2 pédales avait une influence directe sur le ressenti. Par ailleurs, l'indépendance des membres offertes par la présence de deux pédales découplées offre une grande liberté sur les stratégies à adopter pour simuler tel ou tel type de sol.

Poursuivre dans ce domaine pourrait revenir à proposer de nouvelles générations de consigne de sorte à les comparer tout en remontant aux facteurs déterminants de la perception du mouvement (quand est ce que le vestibulaire devient prépondérant sur le kinesthésique en matière de réalisme). Ce type d'étude nécessite d'avoir recours à des campagnes d'essais basées sur un échantillon varié de sujets tel que cela a été fait pour valider le fonctionnement du Guide Sensoriel de Navigation que nous verrons plus tard (p96). Par ailleurs, nous pouvons suggérer l'emploi d'un système de capture vidéo tel que Vicon (système disponible au laboratoire IAPS de l'université de Toulon que nous avons déjà utilisé pour une application de robotique mobile bio-inspirée) qui permettrait de relever précisément les mouvements de chaque segment et d'isoler les déplacements et accélérations du sujet par rapport à l'interface et à la pièce.

Etendre cette recherche sur l'interface de marche telle que conçue permet d'alimenter d'un côté le domaine de la réalité virtuelle en travaillant sur la qualité d'immersion, mais aussi de contribuer à l'étude des modes de perception et de décision de l'humain en plongeant le sujet immergé dans des situations irréalistes ou nouvelles. Ce schéma de recherche réciproque entre les neurosciences, les sciences cognitives et la réalité virtuelle est notamment celui employé par le laboratoire Institut des Sciences du Mouvement Etienne Jules Marey de Marseille UMR7287. On voit que la conception de système mécatronique contribue à répondre par le biais de tels systèmes à des problématiques liées à la perception et au comportement humains.

2.9 Communications produites sur le domaine

Journaux /revues

[Dupuis et al., 2006b] Y. Dupuis, J.-L. Impagliazzo, C. Anthierens, and D. Millet. *Design of a mechatronic interface for human gait. Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 40(3), 2006.

Communications avec comité de lecture

[Anthierens et al., 2001] Anthierens, C., Impagliazzo JL., Chollet P., Frachet JP. *Design of an infinite impedance haptic interface*. In *MECATRONICS'2001, 5th franco-japanese congress on mechatronics*, pages 33–38, Besançon, France, October 2001.

[Yushchenko et al., 2003] L. Yushchenko, J.-L. Impagliazzo, and C. Anthierens. *Design of an advanced scientific simulator equipped with immersive interfaces. Application to a micromanipulation task*. In *4th congress asia-europe on mechatronics*, pages 38–43, Hatoyama, Japan, 2003.

[Yushchenko et al., 2004] L. Yushchenko, J.-L. Impagliazzo, C. Toussaint, and C. Anthierens. *The Dynamic Wavelet Train Tracing Method in Virtual Acoustics*. In *5th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*, page 6p, Noisy-le-Grand, France, 2004.

[Anthierens et al., 2004] C. Anthierens, Y. Dupuis, and J.-L. Impagliazzo. *Design of a virtual reality workshop as a helpful tool for the microworld modeling*. In *35th International Symposium on Robotics, ISR'04*, page 6p, Villepinte, France, 2004.

[Dupuis et al., 2005a] Y. Dupuis, C. Anthierens, and J.-L. Impagliazzo. *Design of a Locomotion Interface for Self- Movement Perception*. In *6th International Workshop on Research and Education on Mechatronics REM'05*, page 6p, Annecy, France, June 2005.

[Dupuis et al., 2005c] Y. Dupuis, C. Anthierens, J.-L. Impagliazzo, and L. Yushchenko. *Design of a sensorial and driving locomotion interface*. In *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-World)*, volume 16, Praha, Czech republic, July 2005.

[Dupuis et al., 2006a] Y. Dupuis, J.-L. Impagliazzo, C. Anthierens, and D. Millet. *A new sensorial and driving locomotion interface for virtual reality*. In *ICINCO 2006 - 3rd International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Proceedings*, volume RA, Setubal, Portugal, August 2006.

[Anthierens et al., 2006b] C. Anthierens, J.-L. Impagliazzo, Y. Dupuis, and E. Richard. *A specific locomotion interface for Virtual Reality - Design of a wheelchair type haptic*. In *ICINCO 2006 - 3rd International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Proceedings*, 2006.

Communications nationales

[Anthierens et al., 2002] C. Anthierens, J.L. Impagliazzo, and N. Chaillet. *Contribution de la réalité virtuelle pour la micro manipulation*. In *5^{èmes} journées du pôle microrobotique, 1^{ères} journées du RTP microrobotique*, page 6p, IRSA, Rennes, Cachan, 2002.

[Anthierens and Dupuis, 2005] C. Anthierens and Y. Dupuis. *Conception d'une interface de locomotion pédestre pour la Réalité Virtuelle*. In *Journées Nationales d'Automatique*, page 82, Lyon, France, 2005.

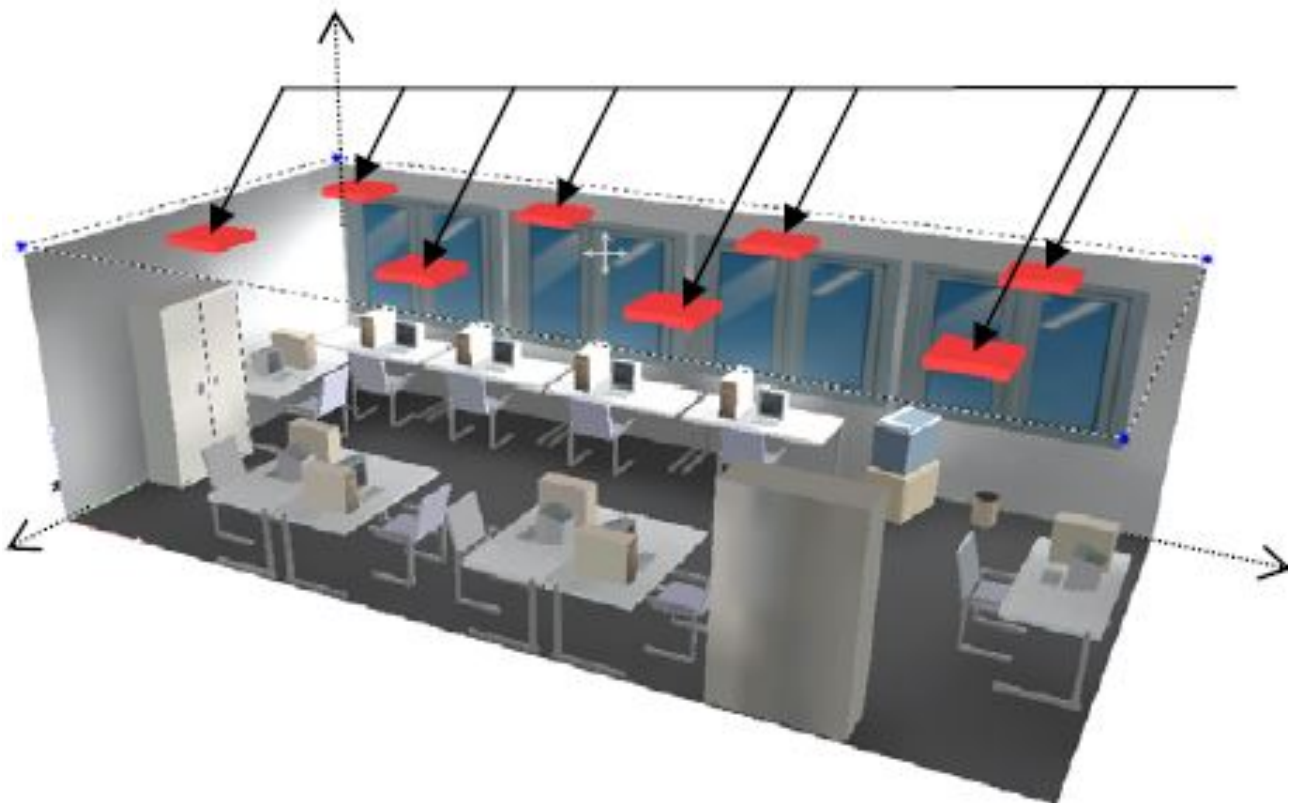
[Dupuis et al., 2005b] Yves Dupuis, Cedric. Anthierens, Jean-Luc. Impagliazzo, and Dominique Millet. *Conception d'une interface sensorielle et motrice de locomotion pédestre*. In *Journées Doctorales d'Automatique*, page 4p, Lyon, 2005.

[Dupuis, 2006] Dupuis, Yves, *Conception d'une interface de marche pour la réalité virtuelle, Thèse de doctorat*, 19 décembre 2006, 148p.

A l'issue de sa thèse, Yves Dupuis, ingénieur Supméca de formation, a intégré le monde de l'industrie en qualité d'ingénieur d'études en entreprise.

Chapitre 3

Domotique



3.1 Introduction et problématique

L'étude des systèmes domotiques sont au coeur d'un réel enjeu économique et écologique. L'énergie dans les domaines résidentiels et tertiaires représente le premier poste de consommation devant le transport et l'industrie (respectivement 70, 50 et 35 millions de tonnes équivalent pétrole en France en 2005). On estime à 30% la part du chauffage et à 38% celle due à l'eau chaude et sanitaire, qui sont deux domaines dans lesquels de réels efforts d'économie ont déjà été engagés depuis des années. Ceci implique que la consommation énergétique due à l'électricité spécifique et à l'éclairage compte pour près de 32%, ce qui est important alors que ce domaine n'a pas encore été réellement au cœur des préoccupations énergétiques. Dans le domaine résidentiel, l'éclairage est responsable de seulement 14% de cette électricité domestique derrière le gros électroménager. En revanche dans le domaine tertiaire et selon la nature d'activité, l'éclairage représente entre 25 et 50% de cette consommation d'électricité domestique.

Outre les besoins de l'activité professionnelle qui impactent l'éclairage, on note la présence d'une sur-consommation le plus souvent due à des comportements humains menant à des aberrations d'usage (lumière allumée dans un bureau inoccupé ou lorsque l'éclairage extérieur naturel est suffisant). Dans les zones tempérées, la Commission Internationale sur l'Eclairage estime qu'une économie potentielle entre 50% et 70% peut être faite en utilisant convenablement l'éclairage naturel [Fontoynt, 2002]. De plus, les apports lumineux naturels peuvent avoir une contribution non-négligeable sur les besoins en chauffage du bâtiment bien qu'on garde à l'esprit que ceux-ci peuvent également apparaître comme des perturbations sur le confort thermique des occupants [Arnal, 2013].

Les enjeux économiques étant définis, les solutions locales existantes consistent le plus souvent à détecter la présence d'occupant sans prendre en compte de réelles notions de confort de ceux-ci. Or comme beaucoup de systèmes automatiques en fonctionnement avec et pour l'humain, une mauvaise adéquation aux besoins des utilisateurs mènent au rejet du système [Clarke J.A., 1999]. Ceci soulève l'intérêt d'explicitier ces notions de confort d'utilisateurs à travers les modes de perception et d'action de ceux-ci, tout comme cela a été fait précédemment dans l'étude et la conception d'une interface comportementale de marche pour les environnements immersifs.

Les verrous s'opposant à l'objectivation du confort visuel au sein d'un bâtiment tertiaire et au pilotage des grandeurs d'influence agissant sur celui-ci sont notamment les suivants :

- Le confort est subjectif pour chaque individu bien que l'on puisse décrire des phénomènes physiques causes d'inconfort et leurs attentes individuelles peuvent être divergentes. [Lee E.S., 1998]
- Les solutions communément mises en place par les utilisateurs ne sont pas forcément bornées (cumul d'éclairage) [Mohammadi et al., 2007].
- Les exigences en termes d'éclairage évoluent pour un individu au cours de la journée et de ses humeurs.

Une des réponses possibles à ces verrous est de favoriser l'éclairage naturel qui est commun à tout utilisateur d'un lieu et qui guide le rythme biologique de chacun (donc est naturellement accepté). De plus, la lumière du soleil couvre un large spectre à haute densité d'énergie rendant notre acuité visuelle optimale pour les bandes de fréquences auxquelles nous sommes sensibles [Cuttle, 1983]. Ce principe va également dans le sens d'économie d'énergie.

Cet éclairage naturel, qui est le plus apprécié et qui influe sur notre efficacité au travail [Janak, 1997, J.C., 2005], présente l'inconvénient majeur d'être en perpétuel changement et de ne pas être facilement domestiqué dans les bâtiments tertiaires [Jennings J.D., 1999, Janak and Macdonald, 1999]. L'absence de modèles fiables de prédiction de l'éclairement naturel dans un bâtiment [Guillemin A., 2001], les équipements et architectures inadaptés [Milone et al., 2007, Park C.S., 2003, Seongju J., 2001], et la méconnaissance des utilisateurs sur l'influence des variables pilotables sur leur confort ressenti font qu'il est intéressant de développer des systèmes domotiques qui peuvent non seulement objectiver la notion de confort des occupants d'une pièce, mais également agir sur la modulation d'éclairage naturel et artificiel pour satisfaire des conditions visuelles attendues tout en intégrant le soucis d'économie d'énergie.

Originalités de cette recherche

Nous avons donc souhaité concevoir un système mécatronique de large envergure qui garantit un niveau de confort pour les occupants d'un bâtiment tertiaire en exploitant au mieux les apports énergétiques solaires.

Bien conscients de la multitude de méthodes de caractérisation d'ambiance lumineuse (indices nombreux et très variés) et des non-moins nombreux moyens d'influer sur les grandeurs physiques optiques définissant ces ambiances, nous n'avons pas jugé adapté agrandir les listes en proposant un nouvel indice. En revanche, nous avons créé un système complet inspiré par le ressenti humain qui pilote les actionneurs du bâtiment tout en incluant des préoccupations énergétiques.

Pour cette étude implique :

1. Appréhender la notion de confort visuel humain (comme nous avons étudié les modes de perception de la marche dans la section 2.3).
2. Concevoir un capteur pour objectiver cette notion.
3. Définir des modèles d'environnement lumineux.
4. Etablir des stratégies de commande pour piloter les ambiances lumineuses et satisfaire les exigences des occupants.

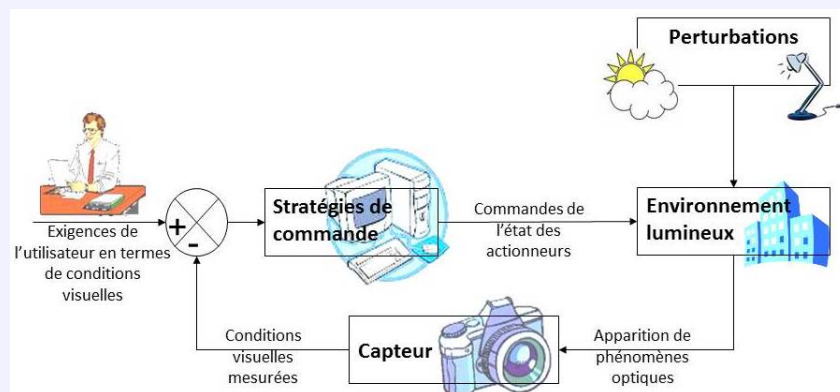


FIGURE 3.1 – Schéma global de la régulation en confort visuel

Ce découpage chronologique et fonctionnel, comme présenté sur la figure 3.1, est également retenu pour la structure de ce chapitre.

Une fois encore dédié à l'humain, ces travaux débutent par une étude de la perception humaine (visuelle) dans le cadre de la conception de système piloté de façon automatique.

3.2 La perception visuelle

La photométrie est la science des rayonnements visibles contrairement à la radiométrie qui considère l'énergie transportée par tout rayonnement. On caractérise une source lumineuse par son **flux lumineux en lumen** (quantité de lumière émise par la source par unité de temps) et son **intensité lumineuse en Candela** ou lumen par stéradian qui est une quantité de flux par angle solide. L'**éclairage en lux** ou lumen par mètre carré caractérise la quantité de lumière reçue sur la surface d'une scène. Par exemple, un ciel diurne couvert produit environ 15000 lux contre 100 000 lux pour un ciel d'été ensoleillé à midi, tandis qu'il est préconisé d'avoir au moins 300 lux d'éclairage pour travailler sur un bureau.

En revanche l'œil ne perçoit que la luminance d'un objet qui correspond à l'intensité lumineuse émise par l'objet divisée par la surface apparente de cet objet. La luminance s'exprime en Candela par mètre carré (Cd/m^2).

La perception et le confort visuels sont complexes car ils impliquent le fonctionnement de l'œil mais

également l'interprétation des signaux par le cerveau. L'œil est un capteur qui permet de percevoir les intensités lumineuses variables selon la luminance des sujets dans la scène, les couleurs, les mouvements et, par le biais du cerveau, les scènes en 3 dimensions. L'analyse sémantique d'une scène va guider l'œil à acquérir des signaux mettant en évidence des variations de contraste spatiales et temporelles. On note que la rémanence de notre capteur optique est d'environ de 20 ms ce qui intervient dans les phénomènes d'éblouissement et d'images subliminales.

Notre **champ visuel** est d'environ 130° verticalement tandis qu'il approche 180° horizontalement. La vision binoculaire, couvrant à peu près 120°, nous permet d'avoir une vision nette dans la zone fovéale (2° autour de l'axe optique), une perception des formes dans la zone d'ergorama (30° autour de l'axe optique) et uniquement une perception des mouvements dans la zone de panorama (60° autour de l'axe optique).

La **perception des contrastes** dépend des conditions d'éclairage de la scène et de la proximité de l'axe optique où l'œil est le plus sensible. Ceci explique que nous sommes moins éblouis par un fort contraste visible dans la zone de panorama. Quoiqu'il en soit la présence de 2 zones contiguës de luminances très différentes tend à diminuer l'acuité visuelle et à dégrader la sensation de confort. Selon le niveau de luminance global d'une scène, l'œil s'adapte pour distinguer au mieux les variations de contraste en présence (rôle des cônes et bâtonnets répartis de façon non homogène dans l'œil et qui possèdent des sensibilités et rémanences différentes).

Les **normes d'éclairage** sont faites pour garantir une qualité d'éclairage au travail permettant de satisfaire efficacement les besoins d'une tâche donnée sans engendrer de fatigue visuelle. Le confort visuel est délicat à définir car il dépend de nombreux critères subjectifs liés à chacun, à son humeur, au moment de la journée, à l'âge du sujet, et la tâche à accomplir. C'est pourquoi il est plus évident et commun à chacun de lister des phénomènes d'inconfort visuel comme une distribution hétérogène de lumière dans une pièce, la présence d'ombres gênantes, l'absence de perception des textures ou encore des teintes de lumière inadaptées à la tâche ou l'ambiance visée.

L'**éclairage naturel**, qui dispose d'un très large spectre, est souvent le plus apprécié sans pour autant bannir toutes ces causes d'inconfort. En effet, l'éclairage solaire direct, bien qu'apprécié et salubre, peut être source d'éblouissement en plus d'être un facteur de surchauffe en été. Par ailleurs, l'éclairage diffus issu de la voûte céleste (nuage, obstacles...) présente l'avantage de générer peu d'ombre, mais a l'inconvénient d'être parfois très variable dans le temps et d'être insuffisant pour éclairer une tâche donnée selon l'architecture du bâtiment considéré.

Le **contraste** est le critère qui se rapproche le plus du sens humain et qui s'exprime de la façon suivante avec L , la luminance d'une surface considérée :

$$C_S = \frac{\Delta L}{L}$$

D'un point de vue confort, nous acceptons sans désagrément des contrastes jusqu'à 3 dans la zone fovéale, et jusqu'à 10 dans la zone de panorama. On note par ailleurs que la détection de contraste dépend aussi grandement de la luminance de fond, ce qui signifie qu'on perçoit mieux les faibles contrastes si l'éclairage est important (hors éblouissement bien sûr). De plus, la perception et l'acceptation de contraste dans le champ visuel dépend aussi de sa distribution spatiale (un effet de moiré ou des rayures lumineuses, possiblement provoqué par les lamelles d'un store vénitien, sont inconfortables) et de son occurrence temporelle (un clignotement ou scintillement est vite perçu comme inconfortable).

L'**éblouissement direct** est un phénomène très important d'inconfort qui se manifeste par la présence de luminaires trop puissants à proximité du champ de vision (les normes fixent des tolérances sur les positions angulaires de ces sources artificielles selon leur luminance). L'**éblouissement indirect** est dû aux réflexions spéculaires des rayons sur les surfaces brillantes qui peuplent nos intérieurs (écrans, meubles vernis...). L'**éblouissement par effet de voile** (c'est à dire par une forte luminance dans l'ergorama) perturbe en atténuant les contrastes utiles dans le champ de vision. Ainsi bien qu'elles ne soient pas prises en compte directement par les normes, les sources naturelles comme les fenêtres peuvent aussi être cause d'éblouissement par rapport au reste de la pièce selon sa géométrie.

La **couleur** intervient également dans la notion de confort visuel et principalement selon la proximité (en pourcentage) du spectre de l'éclairage artificiel à celui d'un éclairage naturel. Ainsi les normes préconisent des **Indices de Rendu de Couleurs (IRC)** selon les zones de travail dans un

bâtiment. Plus important que l’ambiance chromatique que peut dégager une pièce par ses revêtements ou la couleur de son mobilier, le **Facteur de Lumière du Jour (FLJ)** caractérise le potentiel lumineux d’une pièce fenêtrée par le rapport de l’éclairement naturel reçu sur le plan de travail de la pièce et l’éclairement extérieur simultané horizontal par ciel couvert (sans éclairage direct). Un FLJ compris en 2% et 7% satisfait fréquemment un certain confort de travail sur table.

Des grandeurs photométriques aux modes de perception visuelle en passant par la caractérisation des scènes et ambiances perçues, on s’aperçoit que la notion de confort visuel reste assez subjective et floue à définir. Cependant on accepte communément que l’éblouissement apparaisse comme une cause première d’inconfort, ce sur quoi les normes statuent pour proscrire les ambiances lumineuses néfastes au travail. Ceci explique le grand nombre d’études et d’indices tentant de modéliser de façon générique et fiable les phénomènes d’éblouissement.

L’éblouissement agit comme un trouble du contraste nécessaire à la bonne perception d’une scène soit par excès, soit par manque. Dans ce dernier cas, on considère la luminance de voile comme étant une cause importante de l’atténuation de contraste comme l’illustre la figure 3.2.

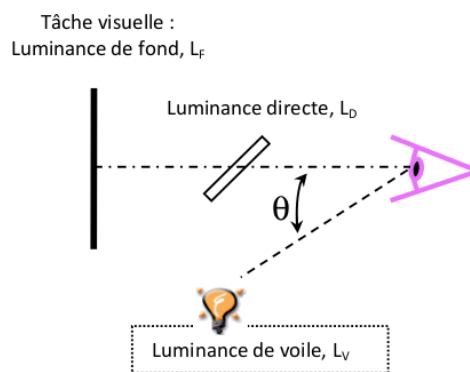


FIGURE 3.2 – Luminance de voile

Le contraste perçu devient $C_S = \frac{L_D - L_F}{L_F + L_V}$

La luminance de voile a été étudiée de très longue date par Holladay [Holladay, 1926], Stiles et Crawford [Stiles, 1937] en fonction du nombre de sources, de leur angle de diffusion et de leur position dans le champ de vision. Bien plus tard, Vos a pris en compte le facteur de l’âge du sujet pour pondérer la perception de cette luminance de voile [Vos, 2003]. En reprenant tous ces paramètres, Hopkinson a produit un modèle de Luminance de gêne [Hopkinson RG, 1960] qui a été mis à jour au cours des années par Bennett [Bennett C. A. and B.C.V., 1984]. Ces modèles bien qu’intéressants ne distinguent pas les sources naturelles et artificielles, et n’intègrent pas la valeur de la luminance moyenne pourtant déterminante pour la sensibilité de l’œil.

Guth fut l’un des premiers à faire évoluer la notion de Luminance de gêne en proposant un Rapport d’Eblouissement de la Lumière du Jour (**DGR** pour *Daylight Glare Rate*) employé dans l’estimation de la probabilité d’un confort visuel (VCP pour *Visual Comfort Probability*) repris par la Commission Internationale de l’Eclairage (CIE) [CIE, 1983].

En parallèle, d’autres modèles ont vu le jour pour caractériser notamment un bâtiment vis-à-vis de son aptitude à exploiter la lumière naturelle (**BGI** pour *Building Research Station Glare Index*) mais leur validité a été contestée car inadaptés aux sources étendues et ne prenant pas en compte l’adaptation de l’œil à l’environnement lumineux [Chauvel J., 1982].

Après des décennies d’études sur ce domaine ayant pour but d’affiner des modèles de perception visuelle (**DGI**, *Daylight Glare Index*, **CGI**, *CIE Glare Index*, ...), la CIE a adopté l’**UGR** (*Unified Glare Rating*) pour définir des normes au sujet des luminaires pouvant être cause d’éblouissement dans des environnements de travail définis.

Au regard de cet état de l’existant sur la perception visuelle, on se rend compte que malgré une bonne connaissance des grandeurs photométriques caractérisant un environnement visuel, il est délicat de généraliser une notion de confort visuel pour chacun du fait de la sensibilité propre de chaque

individu. Même si les normes n'ont eu de cesse de faire évoluer des modèles de perception pour tel ou tel cas (sources faiblement étendues, d'origine artificielle ou naturelle, multiples ou localisées...), elles convergent néanmoins sur les origines de l'inconfort visuel principalement dû à l'occurrence d'éblouissement.

Par ailleurs, toutes les études s'accordent à statuer que l'éclairage naturel et la vue de l'extérieur améliore de confort visuel ressenti par les occupants d'une pièce. On peut faire le parallèle avec une température ambiante froide perçue confortable dès lors que le sujet est en présence de rayons calorifiques.

Donc outre le fait qu'il soit très délicat de vouloir définir un indice de confort visuel universel, on imagine bien que l'humain aura également grand peine à maîtriser et contrôler les grandeurs visuelles d'influence de son environnement pour tendre au mieux vers une situation plus confortable (éviter les incohérences, les optima locaux). Dans ce contexte, la conception d'un système mécatronique complet permettant de moduler les grandeurs optiques de l'environnement des occupants d'un bâtiment tertiaire semble intéressant dès lors qu'il est possible d'objectiver les conditions visuelles actuelles de façon fiable et répétable pour évaluer la perception visuelle des occupants à travers une notion de confort. De plus, il pourra estimer la contribution des organes d'actionnement (luminaires pour les sources artificielles et stores vénitiens par exemple pour les sources naturelles) pour faire évoluer ces conditions.

C'est donc dans cet objectif que s'inscrit la conception d'un capteur de condition visuelle présentée ci-après.

3.3 Capteur de conditions visuelles

La conception d'un capteur de confort visuel se justifie par la volonté de piloter l'éclairage d'une pièce dans un bâtiment tertiaire afin de satisfaire les exigences des occupants en termes de conditions visuelles pour un travail donné [Leclercq et al., 2007]. De ce fait, nous cherchons à élaborer un moyen objectif de quantification de ces conditions pour créer la boucle de rétroaction du contrôle optique.

En plus d'une maîtrise plus juste de cet environnement, le but sous-jacent de cette recherche est également de réduire la consommation d'énergie électrique pour l'éclairage en favorisant le potentiel naturel extérieur. Pour cela, nous verrons que l'équipement des fenêtres par des stores vénitiens permettra de moduler la contribution de cet apport solaire à volonté.

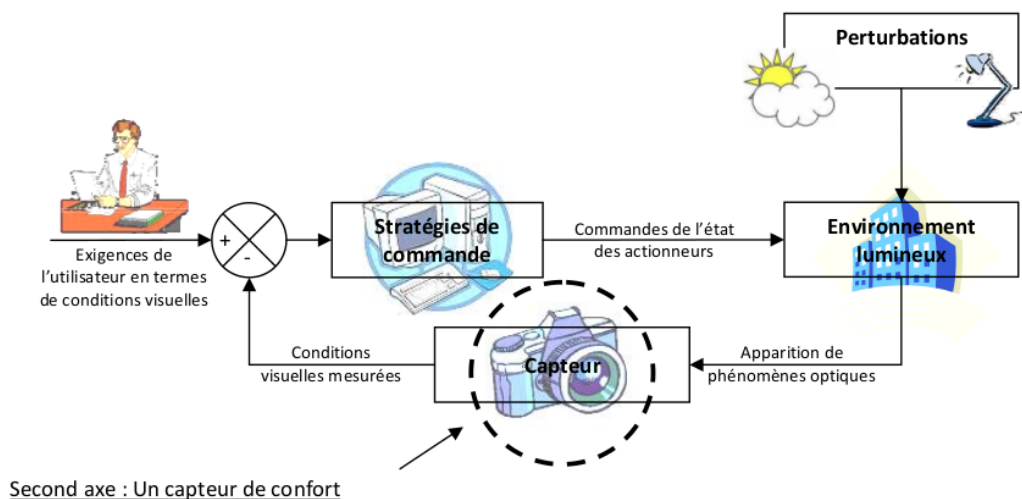


FIGURE 3.3 – Boucle de rétroaction des conditions visuelles

3.3.1 Spécification du capteur

Face à la difficulté d'objectivation du confort, la stratégie de régulation se base tout naturellement sur le fait de bannir les phénomènes sources d'inconfort abordées dans la section 3.2 de sorte à tendre vers une satisfaction vis-à-vis des conditions d'éclairage.

Il faut être ainsi en mesure de détecter et quantifier :

- les éblouissements potentiels,
- les contre-jours,
- les éclairagements hétérogènes sources d’ombres,
- et les insuffisances lumineuses.

Comme vu précédemment la perception visuelle dépend de l’individu (même parfois des origines ethniques de chacun), de sa sensibilité et de sa position par rapport aux sources en présence dans son champ de vision. L’espace de travail d’un bâtiment tertiaire étant partagé par plusieurs occupants, il semble raisonnable de gérer globalement la distribution d’éclairage au sein de la pièce pour satisfaire au mieux les conditions visuelles dans l’ensemble de la pièce, ce qui tend à opter pour une solution globale de l’espace concerné. L’occupation des lieux par du mobilier et l’aménagement des espaces de travail pourra exiger la mise en œuvre de solutions locales d’occultation ou d’éclairage ; le système mécatronique conçu se focalisera sur la gestion de l’apport global de l’éclairage solaire au sein de la pièce pour l’éclairage fonctionnel requis (selon la tâche visée).

Le capteur doit s’intégrer facilement à l’environnement sans perturber les occupants et doit s’approcher de la sensibilité humaine pour exploiter les modèles et indices validés notamment par la CIE (p53). Tous ces indicateurs font référence à :

- la luminance moyenne de la scène,
- le niveaux des contrastes,
- la répartition spatiale des sources lumineuses.

C’est pour cela que nous avons opté pour un capteur visuel de type **caméra grand-angle** (*fish-eye*) qui par son grand champ de vision évite de multiplier le nombre de capteurs nécessaires à l’instrumentation d’une pièce. Le choix d’une caméra est justifié par le fait de produire un signal riche afin d’évaluer les indices d’éblouissement (cause principale d’inconfort) contrairement à un luxmètre qui est adapté aux mesures d’éclairage mais ne fournit qu’une information locale par exemple.

Placé en un lieu unique de la pièce, le capteur a pour rôle de détecter l’occurrence des phénomènes causes d’inconfort visuel dans le but de pouvoir les bannir par le pilotage de stores par exemple tout en tirant profit de l’apport solaire extérieur. La présente étude s’appliquant sur des bâtiments tertiaires avec des activités de bureau, nous ne nous intéresserons pas à l’Indice de Rendu des Couleurs (p52) dans la mesure où l’apport de lumière du jour sera sans cesse favorisé.

Pour éviter tout éblouissement direct ou par réflexion, nous ferons en sorte de **bannir les rayons directs** en favorisant l’éclairage diffus ce qui permet de plus d’évaluer l’éclairage **moyen** lié par proportion à la luminance moyenne perçue par un capteur vidéo [Halonen L., 1995].

L’analyse de la distribution spatiale des sources de lumière est un critère important pour quantifier l’homogénéité lumineuse de la pièce, qui est partiellement synonyme d’occurrence de larges zones d’ombre qualifiées comme désagréables par les occupants. Ce critère sera quantifié par l’**excentration du barycentre lumineux** dans la pièce.

Enfin plus localement, nous nous focalisons sur les éblouissements en détectant et quantifiant la **présence de forts contrastes** dans la scène observée.

Mise en oeuvre du capteur

Le capteur en contact de la scène a pour but de percevoir une image qui approche la perception humaine de sorte à pouvoir exprimer les critères physiologiques responsables d’inconfort visuel [Leclercq et al., 2008b].

Le capteur choisi est une caméra vidéo *fish-eye* de 3 millions de pixels qui a un angle d’ouverture de 140°. Une phase de calibration a été réalisée en niveaux de gris pour quantifier la luminance de la scène comme le montre la figure 3.5 selon le modèle $P = L^\gamma$ avec $\gamma = 0.48$.

Le premier critère d’évaluation de l’ambiance lumineuse est la moyenne de la luminance calculée sur l’ensemble de la scène. Le second critère est l’équilibre lumineux qui est calculé comme étant la distance Euclidienne du barycentre lumineux par rapport au centre de l’image. Enfin le troisième critère



FIGURE 3.4 – Modèle de perception visuelle humaine

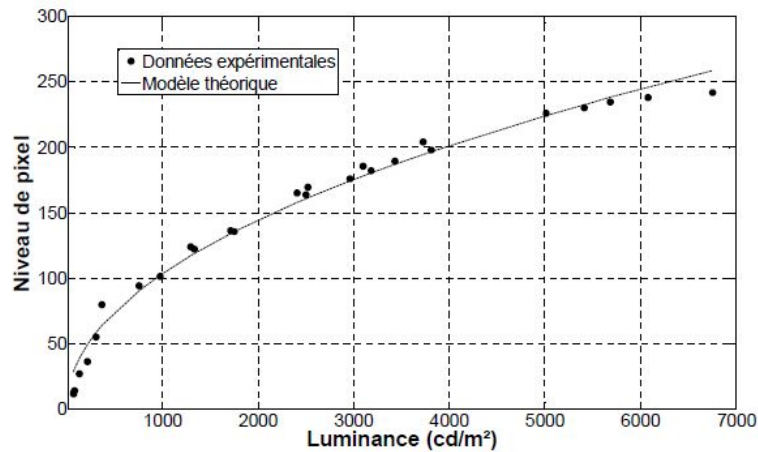


FIGURE 3.5 – Calibration de la caméra

consiste à détecter les forts contrastes synonymes de risques potentiels d'éblouissement. Pour cela, une succession de traitements est nécessaire.

Après avoir subi une correction Gamma, l'image est quantifiée sur 8 niveaux de gris pour éviter les aberrations locales, puis elle est dilatée et érodée 5 fois de sorte à produire 2 images qui seront soustraites, mettant ainsi en évidence les zones de fort contraste (points gênants). Si le contraste est 5 fois supérieur à la moyenne de luminance de la scène, la zone sera considérée comme étant éblouissante (Fig.3.6).

A partir de ces 4 critères (quantité moyenne de lumière, excentration de barycentre lumineux, nombre de points gênants, nombre de points éblouissants), l'ambiance lumineuse de la scène est évaluée à chaque nouvelle image telle que représentée sur l'IHM illustrée sur la figure 3.7

Les critères choisis s'approchent de la perception visuelle physiologique humaine et doivent permettre de synthétiser un critère de confort visuel de la scène qui servira de variable de retour dans le cadre d'un asservissement des conditions d'éclairage. La logique floue, souvent employée pour créer des capteurs intelligents (maturité des fruits, nez artificiel) apparaît comme étant un outil particulièrement adapté pour agréger les différents critères visuels afin de produire une évaluation de confort de la scène.

3.3.2 Capteur de confort visuel flou

Après l'obtention d'une image des critères physiologiques contribuant à la caractérisation d'une ambiance lumineuse, nous employons la logique floue pour agréger ces différentes grandeurs et produire

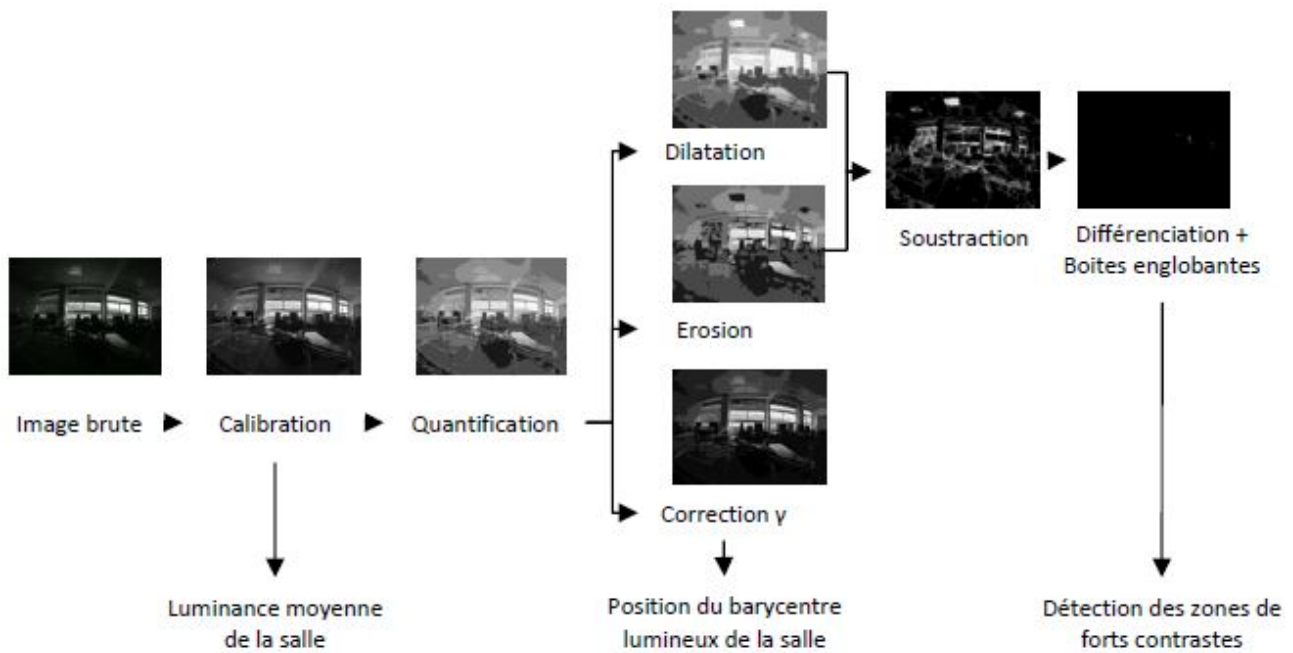


FIGURE 3.6 – Synthèse du traitement d'image pour la détection des forts contrastes



FIGURE 3.7 – Tableau de bord de l'ambiance lumineuse actuelle

un critère global de confort visuel [Leclercq et al., 2009][Anthierens et al., 2008b].

L'hétérogénéité des critères retenus (valeur continue ou discrétisée, synonyme d'inconfort ou de qualité d'ambiance visuelle), la subjectivité d'une notion de confort et l'adaptabilité de chacun face à des situations diverses nous ont tout naturellement poussés à avoir recours à la logique floue et à de multiples implications. Bien que normalement basée sur une phase d'apprentissage, nous avons décidé de fuzzifier (définir des sous-espaces flous en fonction des niveaux des grandeurs d'entrée) les différents critères par rapport à des normes d'éclairage préconisé selon 3 niveaux. Le capteur se basant sur des critères synonymes d'inconfort, il est plus évident de définir des sous-espaces communs à tous. Les 5 sous-espaces flous du niveau de confort visuel en sortie sont décrits, comme les entrées, en forme de trapèze et triangle.

On compte 18 règles d'implication et nous utilisons la méthode de fuzzification de Mamdani (disponible dans l'environnement *Matlab*TM), les opérateurs min/max et la méthode du barycentre comme méthode de défuzzification. Ce type de configuration classique est déjà utilisé en domotique pour évaluer des indices de confort (qualité de l'air notamment) [G.S., 2006][A.I. and C., 2008] et a l'avantage de traiter les entrées et sorties comme des grandeurs continues, ce qui est favorable pour alimenter une boucle de rétroaction.

Les surfaces de sortie comme illustrée Fig.3.8 montre l'injectivité et la monotonie du critère de confort avec l'évolution des entrées ce qui est favorable pour le pilotage de l'ambiance lumineuse.

Critères physiologiques :

Contrastes,
Répartition des éclairages, ...

Niveau de
confort visuel

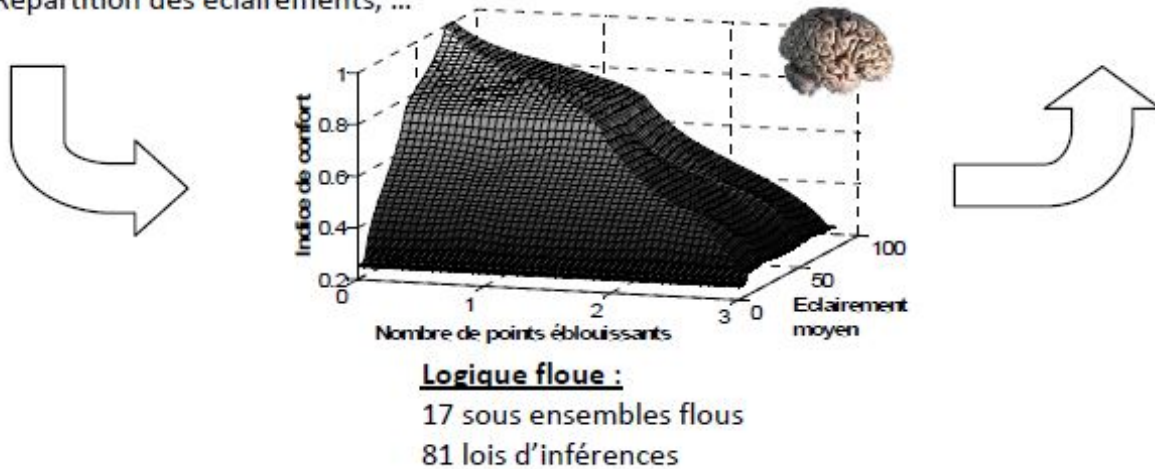


FIGURE 3.8 – Modèle d'interprétation humaine de confort visuel

3.3.3 Validation du capteur

Pour garantir l'exploitation cohérente du capteur, nous avons confronté les mesures qu'il produit avec le ressenti humain exprimé par 25 sujets (9 femmes, 16 hommes) de 19 à 48 ans (27,5 ans en moyenne). Confronté à 8 configurations différentes (ambiances lumineuses et tâches demandées de lecture ou de bureautique), chaque sujet a évalué son indice de confort visuel.

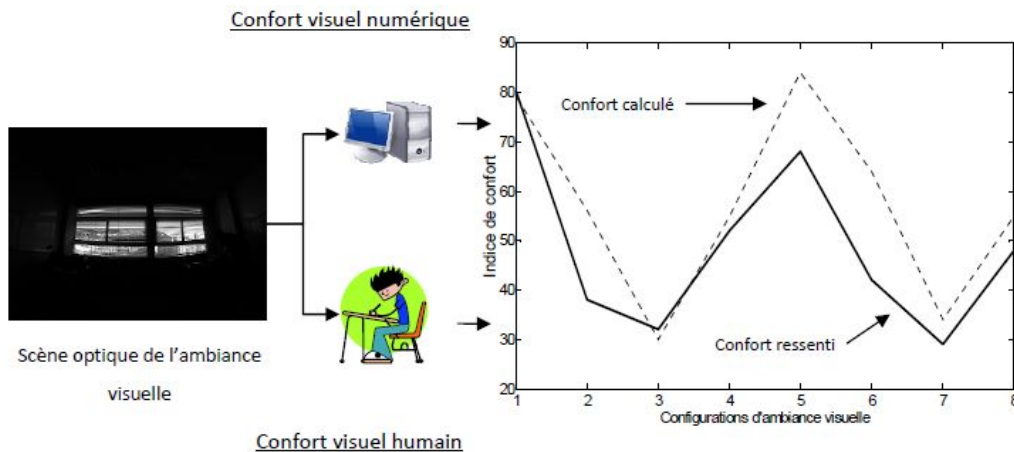


FIGURE 3.9 – Protocole expérimental de validation du capteur

L'humain étant incapable de juger dans l'absolu le confort d'une situation subie, l'évaluation fournie par le capteur ne prétend pas être elle-même absolue. En revanche, l'humain est sensible aux modifications d'ambiance et c'est ce qui nous intéresse pour le pilotage. Donc sans se substituer aux différents ressentis de tous les occupants d'une même pièce, le capteur va pouvoir comparer objectivement deux situations et permettre de quantifier l'efficacité d'un système de pilotage optique.

Le bien-fondé des mesures produites par le capteur a été évalué par calcul du coefficient de corrélation de Pearson entre les réponses des sujets et ses mesures. Sur l'ensemble des essais, nous avons une valeur moyenne de ce coefficient de 81% tandis qu'elle est seulement de 67% entre les sujets eux-mêmes.

Nous avons donc un capteur qui objective le confort de la scène et surtout son évolution telle qu'elle serait perçue par des occupants. Cette évaluation va intervenir dans la boucle de feedback d'un pilotage d'ambiance lumineuse proposé ci-après.

3.4 Conception de salle pour la régulation de confort visuel

La création d'un moyen de mesure des conditions visuelles fonctionnelles au sein d'une pièce de bâtiment tertiaire fourni par le capteur préalablement présenté montre le double intérêt d'objectiver le ressenti d'inconfort visuel et de produire un signal de retour pour alimenter une boucle de rétro-action. De toute évidence, ce capteur a été conçu en prenant en compte d'une part la perception visuelle humaine (égocentré) et d'autre part l'environnement dans lequel il allait oeuvrer (technocentré).

Ainsi l'environnement de travail présenté ici qui sera régulé en confort visuel, a été conçu et modélisé de façon simultanée avec le capteur. Même si l'on n'exclut pas l'occurrence de cycles itératifs de conception, on note que les différents sous-systèmes mécatroniques (le capteur basé sur la perception et le ressenti visuel humain, les actionneurs lumineux de la salle d'étude, l'environnement matérialisé par les conditions extérieures d'éclairage, et les lois de contrôle en confort visuel) sont les produits d'une conception simultanée dite concourante.

La figure 3.10 illustre la partie présentement étudiée.

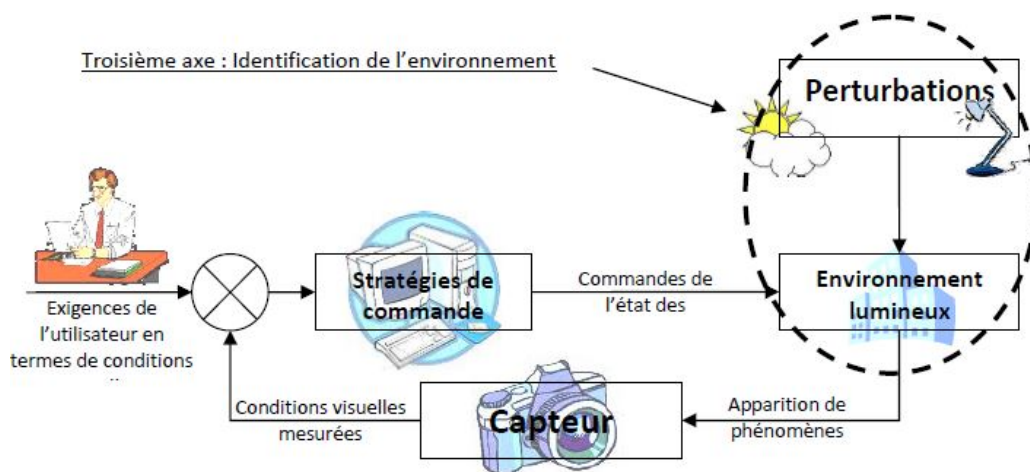


FIGURE 3.10 – Schéma global de la régulation en confort - Environnement et actionneurs

L'étude sur les bâtiments tertiaires a dicté quelques hypothèses relatives à la pièce type :

- les ouvrants appartiennent à une seule parois de la pièce (façade).
- Les pièces sont rectangulaires avec 10 m de façade, 5 m de profondeur et 2,5 m de plafond.
- Les fenêtres sont toutes équipées identiquement de stores vénitiens intérieurs motorisés ainsi que de 8 plafonniers manuellement pilotés et répartis comme illustré sur la figure 3.11.

La pièce de test, quant à elle, dispose en plus de 2 rampes de 3 lampes halogènes pilotées et placées perpendiculairement aux fenêtres. Cette pièce au 5^{ème} étage d'un bâtiment au centre ville de Toulon dans le Var appartient à la façade Nord. La moitié de la pièce est instrumentée et pilotée tandis que l'autre est laissée libre et apparaît comme une perturbation. Les algorithmes de commande s'attacheront à réguler au mieux le confort visuel dans l'ensemble de la pièce.

Pour favoriser les flux lumineux extérieurs, la modulation des flux entrants est assurée par les stores vénitiens motorisés. Dans un premier temps, nous devons maîtriser l'état **mécanique des stores**, pour ensuite être en mesure de contrôler leur **transmittance optique** et donc leur contribution lumineuse afin de piloter l'ensemble des actionneurs pour réguler les **conditions visuelles dans la pièce** de test.

3.4.1 Modèle du store vénitien

Modèle mécanique

Les stores vénitiens sont composés de lamelles pouvant s'orienter et se remonter. On pilote donc l'angle des lamelles et l'altitude de la barre de lest qui permet d'occulter complètement ou partiellement la fenêtre. La chaîne cinématique est composée d'un moteur à courant continu qui entraîne un

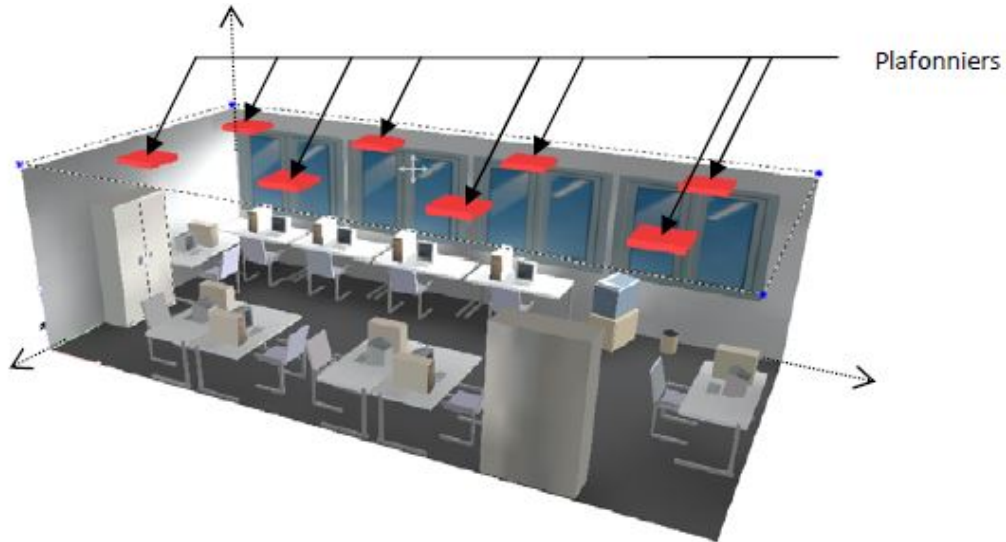


FIGURE 3.11 – Salle de test - Dialux

arbre en rotation sur lequel s'enroulent les cordelettes qui entraînent les lamelles. L'angle des lamelles évolue jusqu'à saturation en même temps que l'altitude de la barre de lest change. L'instrumentation du store est assurée par un codeur incrémental placé sur l'axe relié à l'arbre moteur et un accéléromètre monté en inclinomètre sur la première lamelle. Un modèle comportemental simple qui intègre néanmoins les paramètres moteur et quelques non-linéarités comme le frein électromagnétique, la tension de seuil au démarrage et le jeu dans la transmission a été établi entre la tension de commande du moteur et l'angle des lamelles. La figure 3.12 montre qu'une erreur faible réside entre le modèle mécanique de la chaîne cinématique fournissant l'angle des lamelles et l'angle effectif mesuré. Cette erreur n'est pas cumulative car sur des courses importantes les lamelles arrivent en butée à des angles connus et fixe. Par ailleurs, une incertitude négligeable est présente sur l'altitude de la barre de lest car le codeur mesure presque directement cette grandeur.

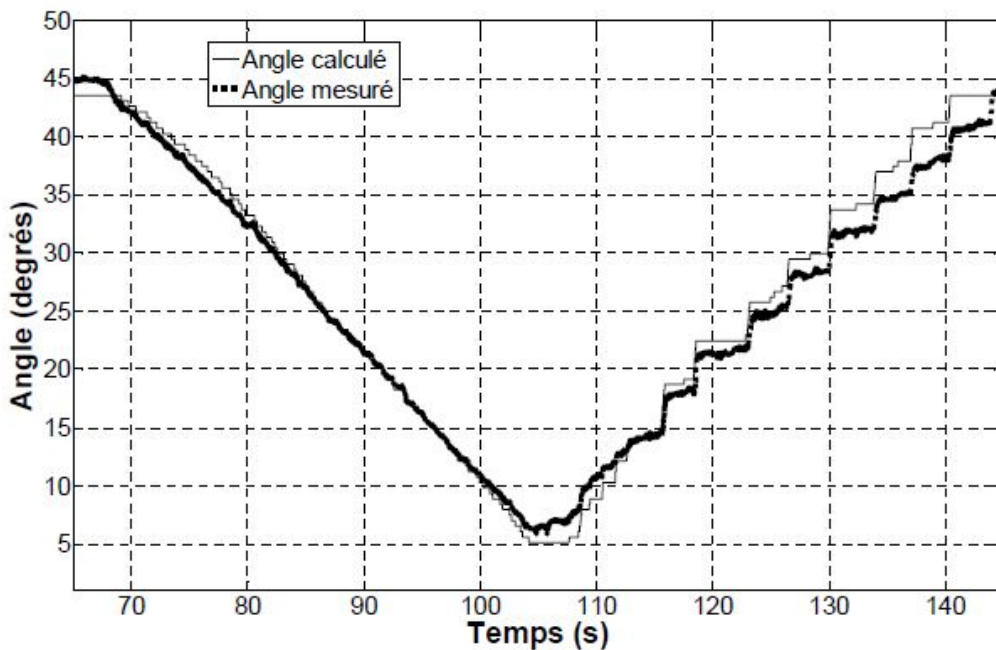


FIGURE 3.12 – Comparaison entre l'angle mesuré des lamelles et celui produit par modélisation

L'obtention d'un modèle assez juste et fidèle a son importance au niveau de la commande pour être en mesure de bannir les rayons directs, refléter la lumière sur le plafond, éviter les scintillements

lumineux lors des mouvements (effet de flash), minimiser l'énergie consommée dans l'actionnement, et être le plus discret possible visuellement et acoustiquement.

Une fois le store modélisé mécaniquement, nous pouvons l'envisager comme un actionneur lumineux en étudiant sa transmittance.

Modèle de transmittance du store

La transmittance du store peut s'évaluer comme étant le rapport entre l'éclairement extérieur reçu par le store et l'éclairement intérieur qu'il produit. La transmittance du vitrage est considérée comme constante et est incluse dans la transmittance du store. Le profil faiblement bombé des lamelles et leur espacement permettent d'envisager un modèle de transmittance du store comme étant une fonction de la surface occultée sur la surface apparente (Fig.3.13).

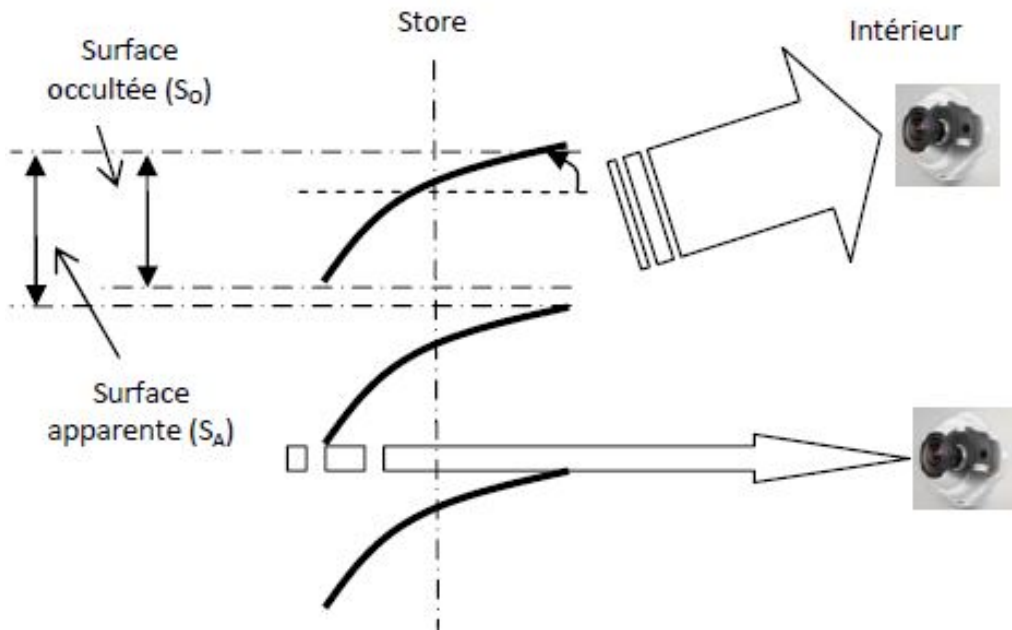


FIGURE 3.13 – Modèle d'occultation

Calibré à partir du capteur intérieur (caméra grand angle) en comparant des zones de fenêtre sans store et les zones équipées, on retient le modèle de forme sinusoïdale qui relie la transmittance du store à l'angle des lamelles (Fig.3.14).

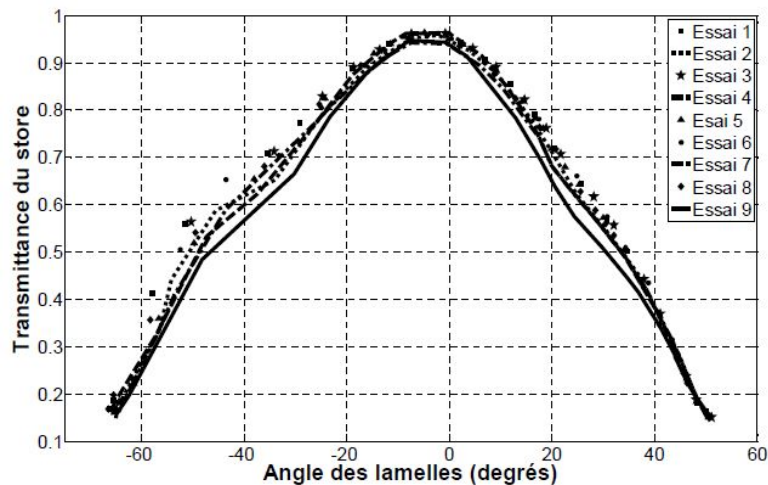


FIGURE 3.14 – Modèle d'occultation

$\frac{E_{int}}{E_{ext}} = \alpha \cdot \cos \theta - \beta$ avec θ , l'angle des lamelles.

Avec $\alpha = 2.037$ et $\beta = 1.17$, paramètres obtenus par ajustement du modèle tracé sur Fig.3.14.

Les sources naturelles diffuses (façade nord) et les essais multiples montrent qu'il n'y a pas d'influence de la position du capteur intérieur sur les mesures de transmittance.

La modélisation du store en qualité d'action optique étant désormais effectuée, nous pouvons nous focaliser sur la contribution de chaque store sur les paramètres lumineux de la pièce considérée.

3.4.2 Contribution des stores sur les paramètres optiques de la pièce

Nous nous attachons ici à étudier deux des quatre critères optiques retenus pour synthétiser le confort visuel, à savoir, l'éclairement moyen et la distribution de l'éclairement caractérisée par la position du barycentre lumineux.

Sachant d'ores et déjà que le rôle des deux stores pilotés de la pièce est de nuancer les apports lumineux et de bannir les rayons directs, nous pouvons considérer leurs éclairagements comme diffus et indépendants, ce qui permet de retenir le principe de superposition des éclairagements. Une série de tests instrumentés par la caméra intérieure conforte l'idée que l'éclairement moyen de la pièce, E_p , peut être considéré comme une fonction affine des éclairagements diffus des stores, E_i , et d'un éclairage d'offset, E_{per} .

$$E_p = \sum_{i=1}^2 a_i \cdot E_i + E_{per} \quad (3.1)$$

Avec $a_1 = 0.22$, $a_2 = 0.26$, E_{per} dépendant de la luminance extérieure.

L'expérimentation conforte l'hypothèse de superposition des apports des sources et de leur caractère diffus.

En ce qui concerne le barycentre, nous retenons le modèle classique d'abscisse du barycentre optique identifié expérimentalement comme suit :

$$X_p = b_1 \cdot E_1 + b_2 \cdot E_2 + X_0 \quad (3.2)$$

Avec $b_1 = -0.7$, $b_2 = 0.33$ et $X_0 = 369 \text{ pixels}$ qui est le décalage par rapport au bord de l'origine de l'image. On note que les contributions des 2 stores pour la position du barycentre lumineux sont différentes du fait de la présence d'un mur blanc sur la gauche de l'image qui renforce l'influence de store N°1.

Nous avons établi des modèles qui régissent les comportements du store mécaniquement mais aussi optiquement de façon isolée et au sein de la pièce. Le store vénitien est désormais défini comme un actionneur lumineux qui aura pour mission de bannir les causes d'inconfort visuel et de favoriser les apports lumineux naturels afin de garantir un confort visuel maximal dans la pièce. Cet actionneur, au même titre que les autres sources lumineuses en présence dans la pièce, peut être piloté selon plusieurs objectifs comme le confort permanent, le confort moyen ou encore l'économie d'énergie. Le pilotage de la pièce et des actionneurs qui complète la démarche de conception du système multiphysique mécatronique est abordé dans la partie suivante.

3.5 Pilotage hiérarchisé

La conception de ce système de régulation de confort visuel est guidée depuis son origine par une approche égocentrée qui met le ressenti de l'utilisateur au coeur de la problématique. La démarche de conception s'est basée sur des modèles de différents niveaux tels qu'ils seraient décrits dans un cycle en "V" depuis le confort visuel humain jusqu'aux modèles d'actionneur (les stores). Tous ces modèles qu'ils soient comportementaux (transmittance des stores) ou de connaissance (barycentre lumineux) ou issus de normes (éblouissement) sont pensés pour décrire l'état du système complet, mais aussi pour en faciliter son pilotage.

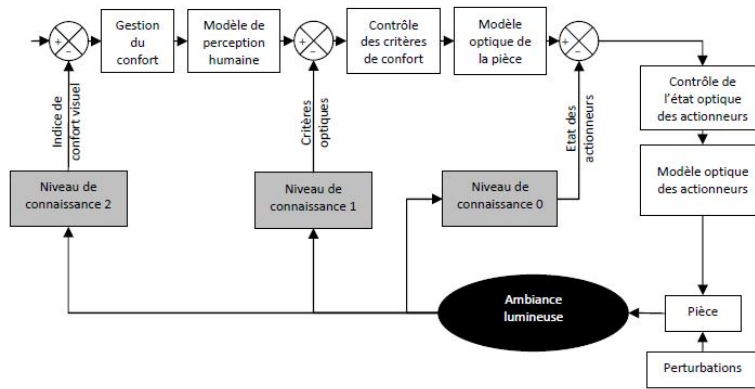


FIGURE 3.15 – Commande hiérarchisée

La structure de commande proposée reprend 3 niveaux de connaissance numérotés de 0 à 2 au regard du confort visuel qui représente le plus haut niveau gérant l’ambiance lumineuse (Fig.3.15). Le niveau 0 décrit l’état optique des actionneurs, tandis que le niveau 1 s’attache à piloter les grandeurs optiques dans la pièce qui seront interprétées en confort visuel par le dernier niveau.

3.5.1 Consignes et contraintes

Pour être correctement accepté par les occupants (ce qui est très délicat au regard de la diversité des ressentis), le système automatique doit proposer :

- un **mode automatique** pour s’asservir sur les exigences utilisateurs en respectant les règles de bon sens en termes d’économie d’énergie (favoriser l’éclairage naturel),
- un **mode semi-autonome** permettant aux occupants de décrire l’ambiance visuelle désirée,
- un **mode manuel** pour reprendre la main sur les actionneurs et forcer leur état à volonté.

Les différentes études sur l’usage des stores en bureau tertiaire montrent que lors d’un mode manuel, les occupants agissent sur les stores que pour rompre des situations d’inconfort (éblouissement, rayonnement thermique) dans un laps de temps très long sans connaître la configuration optimale et souvent au détriment du bon sens énergétique (fermer les stores pour allumer les lumières).

Nous proposons ici une commande automatique suivant 3 profils de consigne correspondant à :

- une ambiance de **vidéo-projection** (barycentre lumineux excentré avec niveau d’éclairage moyen désiré),
- une ambiance de **réunion** (forts contrastes entre les participants réduits),
- une ambiance de **lecture / écriture** (distribution d’éclairage équilibré et niveau moyen d’éclairage naturel élevé).

Les **règles et contraintes** qui s’appliquent sur l’ensemble des commandes imposent de :

- favoriser l’éclairage extérieur naturel en modulant uniquement l’angle des lamelles des stores,
- bannir les éblouissements souvent synonymes d’éclairage direct,
- limiter les déplacements répétés des stores qui peuvent être bruyants, provoquer des scintillements lumineux gênants et apparaître donc comme une cause de rejet de la solution par l’utilisateur.

Pour tendre vers un maximum de confort visuel en pilotant les 2 critères optiques que sont l’éclairage moyen et le barycentre, nous faisons des coupes de l’indice de confort en 2D en supposant les 2 autres critères nuls (points gênants et éblouissants) et le troisième constant comme illustré sur la figure 3.16.

3.5.2 Commandes par niveau

Afin de valider les fonctionnalités complètes du système et d’en déterminer également les limites, nous abordons la commande hiérarchisée niveau par niveau.

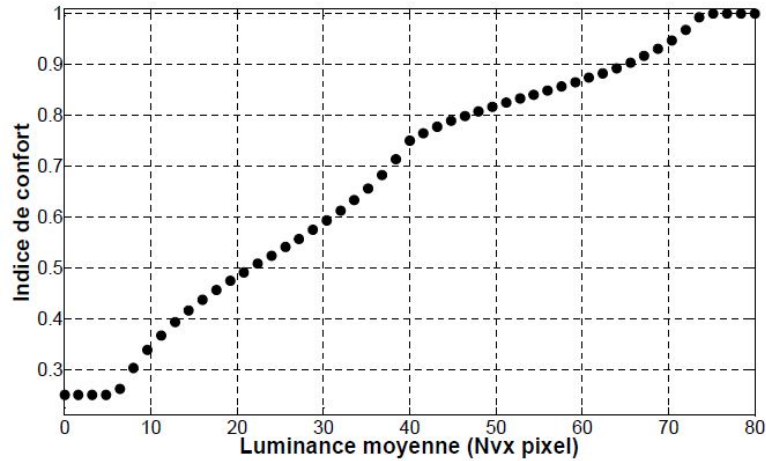


FIGURE 3.16 – Indice de confort en coupe selon la luminance moyenne

Niveau 0 - Le store comme actionneur lumineux

La commande des stores en tant qu'actionneur lumineux exige de piloter sa transmittance et donc l'angle de lamelle (Θ_m). Ce dernier revient à piloter un système avec un intégrateur pur via la tension moteur, $U(s)$, sous forme :

$$\Theta_m(s) = \frac{A}{s \cdot (1 + \tau \cdot s) \times U(s)}$$

Il a été décidé d'appliquer un correcteur de type Proportionnel Dérivée pour obtenir un temps de réponse à 5% de l'ordre de 0,5 s et un amortissement de 1. Des saturations en vitesse et courant sont appliquées pour garantir un comportement constant.

Pour suivre une consigne d'éclairement du store, nous traduisons son éclairement actuel via sa transmittance et l'éclairement disponible extérieur comme illustré sur la figure 3.14.

Le suivi de consigne en éclairement d'un store est illustré sur la figure 3.17.

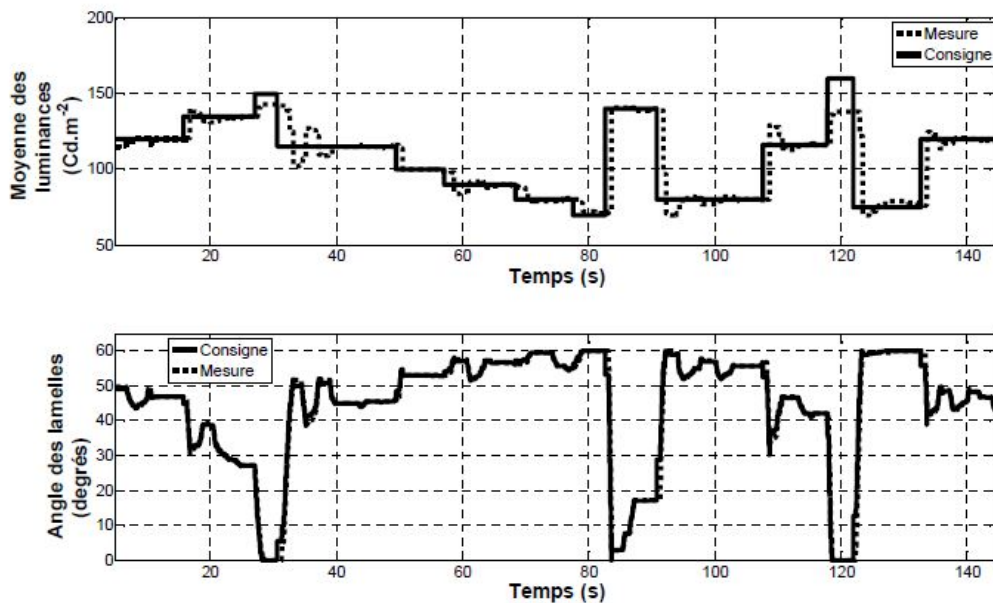


FIGURE 3.17 – Suivi de consigne d'éclairement d'un store

Malgré quelques non-linéarités dues aux frottements secs (seuil de démarrage non-constant) et au jeu de transmission, l'angle des lamelles suit convenablement la consigne demandée. Il subsiste néanmoins quelques oscillations sur la réponse en éclairement dues aux incertitudes de modèle de transmittance. Ceci engendre quelques rebonds en angle qui seront corrigés par la suite.

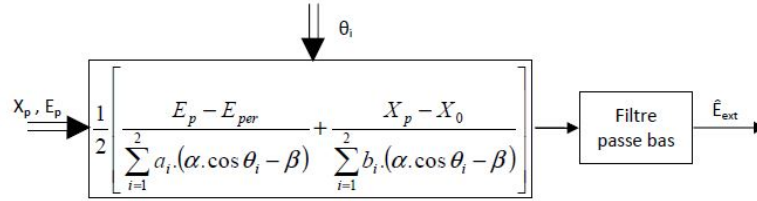


FIGURE 3.18 – Reconstruction de l'éclairage extérieur

Le pilotage en éclairage des stores impose de connaître l'éclairage extérieur, ce qui nous a guidé à réaliser une reconstruction de celui-ci à partir des mesures d'éclairage moyen et de position du barycentre lumineux (Fig.3.18). En inversant les relations (3.1) et (3.2) et en appliquant un filtre passe-bas de 0,5 Hz pour limiter les variations trop brutales, on obtient une estimation de l'éclairage extérieur utile pour l'ensemble de la commande schématisée sur la figure 3.19. On note que le store est asservi en angle par un retour codeur et un correcteur de type Proportionnel-Dérivée décrit plus haut, l'estimation de l'éclairage extérieur est filtrée à 0,5 Hz, tandis que la commande en éclairage est composée d'une structure *feedforward* associée à un correcteur de type Proportionnel-Intégral.

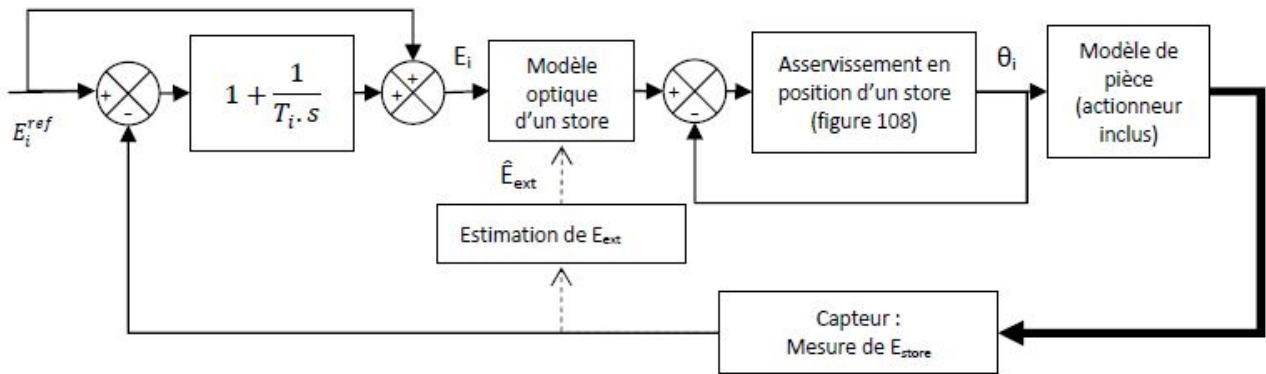


FIGURE 3.19 – Structure de commande d'un store en luminance

Niveau 1 - Luminance moyenne et barycentre lumineux de la pièce

Le pilotage au niveau 1, c'est à dire en grandeurs optiques, impose d'appliquer une loi de découplage qui se fait simplement à partir des équations (3.1) et (3.2) pour trouver une solution unique (Fig.3.20). La commande en boucle ouverte sur chaque critère (*feedforward*) est une fois encore associée à un petit bouclage stabilisant qui assure un rejet asymptotique des perturbations [Leclercq et al., 2008a][Leclercq et al., 2011]. La priorité en termes de rapidité étant donnée à l'éclairage moyen, sa constante d'intégration est 10 fois plus brève que celle du barycentre lumineux ($T_{i_{E_p}} < T_{i_{X_o}}$).

Testée sur un suivi de consigne d'éclairage moyen à barycentre constant, la commande choisie montre de belles performances au niveau du suivi de consigne unitaire des stores. Néanmoins, bien que la consigne appliquée au niveau de la salle soit particulièrement saccadée, la réponse en luminance moyenne présente par moment quelques imperfections sous forme de dépassement, d'erreur statique ou de temps de réponse un peu long (Fig.3.21).

Le même test effectué sur une variation de barycentre lumineux à luminance moyenne constante montre une efficacité plus importante quand toutefois la valeur désirée est accessible (Fig.3.22).

Le pilotage en angle des lamelles est très fidèle et juste, et n'est pas à remettre en cause ici, en revanche, le modèle en luminance moyenne de la salle serait à peaufiner. En effet, l'apport des stores dans la salle en luminance moyenne a été modélisé sous forme algébrique or la nature de l'éclairage extérieur supposé totalement diffus n'est pas forcément garanti selon les conditions d'ensoleillement. Ainsi on peut supposer que selon la quantité de luminance extérieure, le store ne fasse pas que filtrer

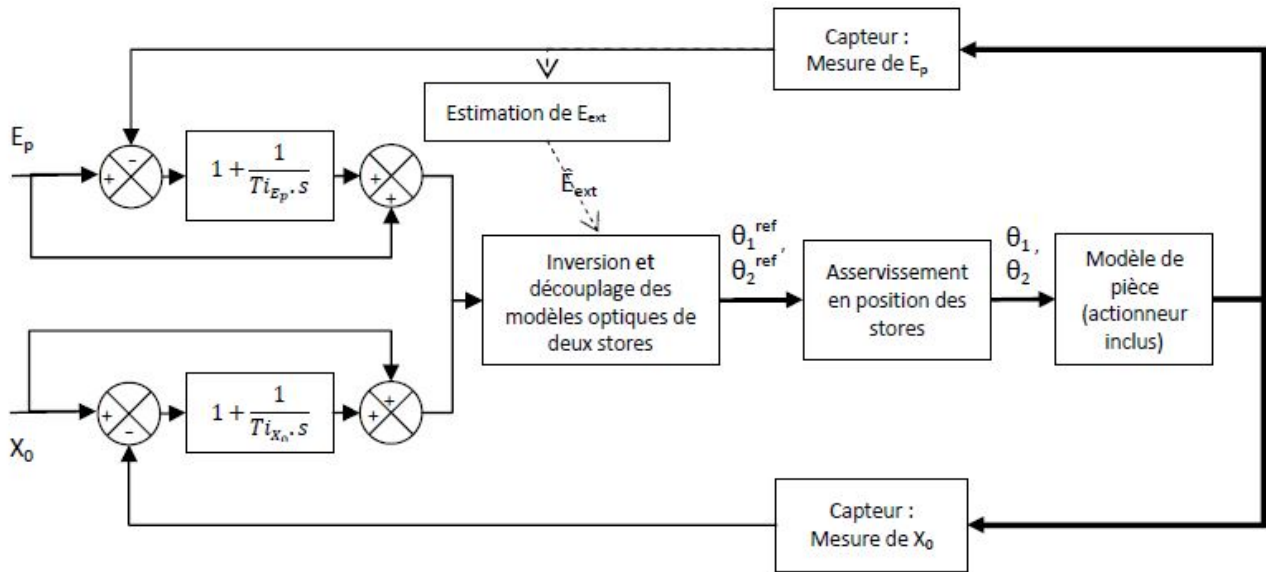


FIGURE 3.20 – Structure de commande en grandeurs optiques

avec une transmittance donnée mais réfléchit une partie de l'éclairement sur des obstacles voisins comme un mur ou le plafond.

La commande au niveau 2 n'existe pas car ce niveau est celui d'observation du confort actuel. De plus, les suivis réalisés au niveau 1 imposent d'eux mêmes par le choix des ambiances fonctionnelles choisies les valeurs de consigne en luminance moyenne et en position de barycentre. Enfin, si celles-ci ne sont pas explicitées, on sous-entend le confort visuel désiré comme étant maximal (luminance moyenne maximale, barycentre centré ou totalement décentré). Dès lors qu'on exploite uniquement les ressources gratuites naturelles en termes d'éclairement, il n'est pas de justification pour choisir un niveau de confort autre que maximal (ce qui ne serait pas le cas en ayant recours à l'éclairage électrique qui amènerait un compromis possible entre économie et confort).

3.6 Conclusion sur la gestion du confort visuel

Les travaux présentés ici sont le fruit des travaux de thèse de Maximilien Leclercq [Leclercq, 2009] que j'ai eu le plaisir de co-encadrer avec Eric Bideaux. Ils ont initié une étude menée avec Sherpa Engineering dans le cadre d'un financement de thèse CIFRE.

Les originalités majeures tiennent dans l'étude et l'analyse de la perception visuelle et l'objectivation d'un indice de confort visuel à des fins de commande, alors que la communauté scientifique se focalise principalement sur la création d'indice d'éblouissement.

L'objectif étant de chasser les comportements aberrants dans le pilotage des ressources lumineuses au sein d'un open-space, la conception d'un système complet de régulation de conditions visuelles a été proposé. Les usages classiques des occupants et des critères de non-acceptation d'un système de régulation d'ambiance lumineuse ont été pris en compte.

Le modèle et le pilotage efficaces des stores vénitiens intérieurs en qualité d'actionneurs lumineux ont été montrés. Ils appartiennent à une commande hiérarchisée qui permet le contrôle des grandeurs optiques influentes dans la salle.

Le capteur à base de logique floue, les stores vénitiens et la commande complète du système proposés ici ont été implémentés et ont montré les progressions encore envisageables :

- Ainsi la régulation de confort est démontrée au niveau de la salle mais demande à être étendue à l'échelle du bâtiment.
- Les apports naturels en termes de luminance s'accompagnent d'apport thermique également qui contribuent au confort de l'occupant.

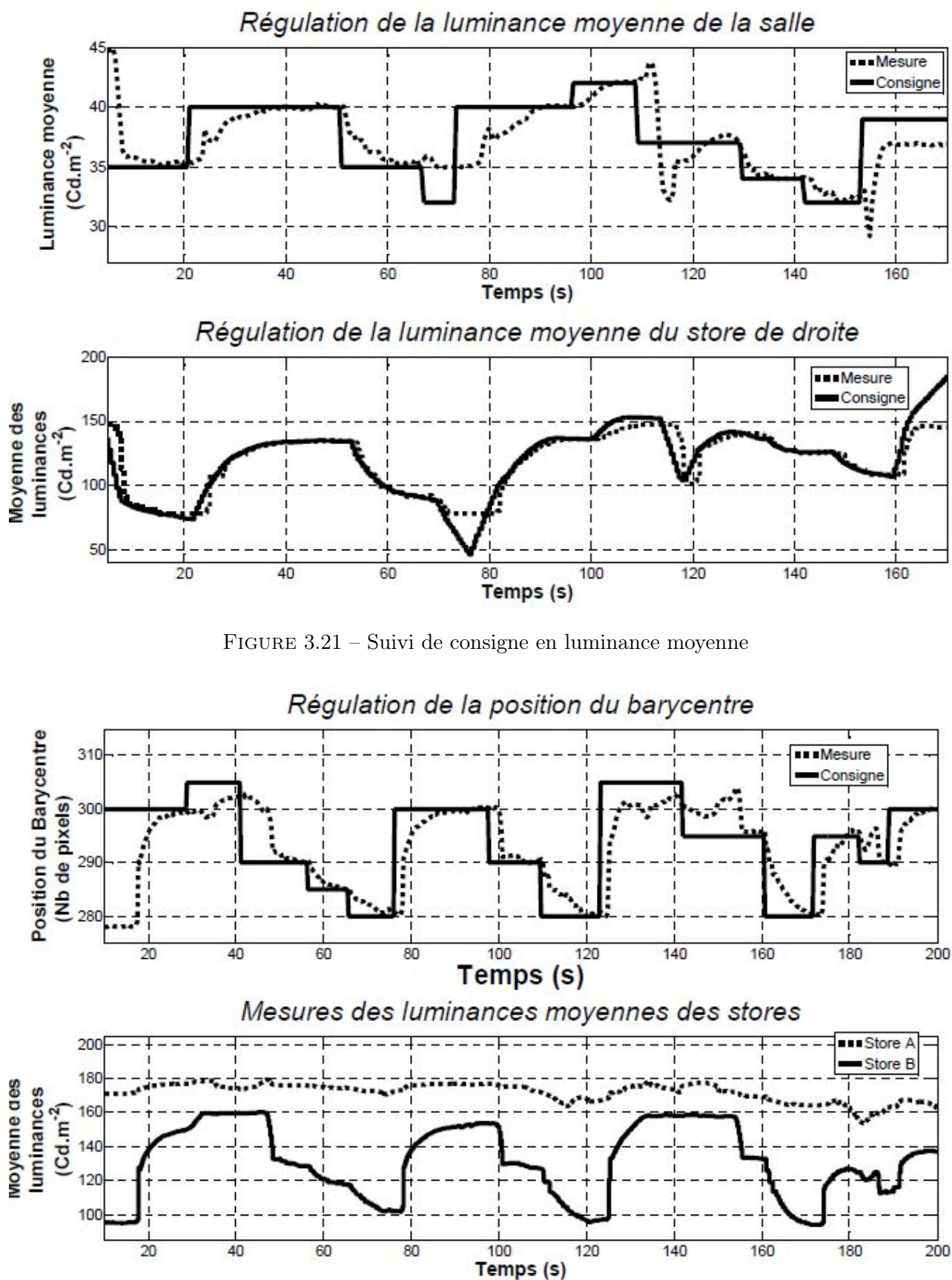


FIGURE 3.21 – Suivi de consigne en luminance moyenne

FIGURE 3.22 – Suivi de consigne en barycentre lumineux

- Le store vénitien peut jouer un rôle également sur le plan thermique, qu'il serait utile d'investiguer.

- La gestion des points éblouissants et gênants n’a pas été traitée ici en termes de commande.
- Le pilotage des stores n’a été fait que par variation d’angle de lamelle sans modification contrôlée de l’altitude, ce qui laisse encore une marge d’amélioration.

Fort de ces constats et enthousiaste par l’important travail mené par Maximilien Leclercq, la société Sherpa Engineering a décidé de poursuivre ces travaux en domotique avec le laboratoire Ampère de l’INSA de Lyon et SUPMECA Toulon. Ainsi une seconde thèse CIFRE a permis à Etienne Arnal, sous la responsabilité d’Eric Bideaux et moi-même, de prolonger les travaux engagés en adressant la problématique de la gestion de l’énergie à l’échelle du bâtiment tertiaire en intégrant les performances thermiques et optiques.

3.7 Communications produites sur le domaine

Journaux /revues

[Anthierens et al., 2008b] Anthierens, C. and Leclercq, M. and Bideaux, E. and Flambard, L. *A smart sensor to evaluate visual comfort of daylight into buildings. International Journal of Optomechatronics*, 2008, Vol.2, N°4, pp413-434.

[Leclercq et al., 2011] Leclercq, M. and Arnal, E. and Anthierens, C. and Bideaux, E., *Control of visual conditions for open-plan offices, Mechatronics*, 2011, Vol.21, N°3.

Communications avec comité de lecture

[Leclercq et al., 2008a] Leclercq, M. and Anthierens, C. and Bideaux, E. and Flambard, L. *Control of optic comfort in an experimental room. Mechatronics’08*, 2008, n°194, 6p.

[Leclercq et al., 2008b] Leclercq, M., Anthierens, C., Bideaux, E., Flambard, L. *Design of a Visual Comfort Sensor for Daylighting Devices. IFAC World Congress*, 2008, Seoul, Korea, pp6873-8.

Communications nationales

[Leclercq et al., 2007] Leclercq, M., Anthierens, C., Bideaux, E., Flambard, L. *Régulation du confort visuel dans une pièce : Analyse pour la mise en œuvre. Journées Doctorales MACS, JDMACS’07*, 2007, n°49, 6p.

[Leclercq et al., 2009] Leclercq, M., Arnal, E., Anthierens, C., Bideaux, E. *Capteurs de confort visuel : Application aux bâtiments tertiaires. 7^{ème} Colloque CAPTEURS*, Bourges, France, 2009, 6p.

[Leclercq, 2009] Leclercq, Maximilien, *Conception et intégration d’un système de vision pour la gestion du confort visuel dans le bâtiment*, 2009, Thèse de doctorat, Lyon, INSA, 184p.

A l’issue de sa thèse, Maximilien LECLERCQ, ingénieur Supméca de formation, est devenu enseignant-chercheur au sein de école d’ingénieurs ESIEE d’Amiens.

Chapitre 4

Energétique du bâtiment



FIGURE 4.1 – Moucharabieh traditionnel issu de
<http://www.allureetbois.com/blog/moucharabieh-moderne-bois/>

4.1 Introduction

Le bâtiment, qui sert en premier lieu d'abri, n'a eu de cesse de tout temps de progresser pour tenter d'améliorer le confort des occupants en termes de chauffage et de lumière. Ainsi dès le IV^{ème} siècle avant JC, les romains inventèrent le chauffage par hypocauste (murs chauffés par canalisations d'air chaud) et les arabes au XVII^{ème} siècle mirent au point le moucharabieh (Fig.4.1) pour favoriser l'aération, réduire les risques d'éblouissement et permettre de voir sans être vu (ces préoccupations restent d'actualité).

L'exploitation au XIX^{ème} siècle des énergies fossiles a permis d'initier les grandes révolutions industrielles mais au prix d'un constat de réchauffement climatique qui nécessite la réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES). Au cours des 40 dernières années, la consommation d'énergie en France a augmenté de 25% (160 Millions de Tonnes équivalent Pétrole) en suivant l'accroissement de la population. Suite au Grenelle de l'environnement, la France vise à réduire sa consommation d'énergie globale en oeuvrant sur le bâti qui pèse 42,5% de celle-ci.

Les constructions du XX^{ème} siècle, se voulant modernes, ont été conçues sans tenir compte de leur environnement et sont pilotées par leurs occupants selon leurs critères individuels ce qui engendre d'importantes surconsommations. Ce constat a guidé les ingénieurs et architectes à modifier la conception des bâtiments pour exploiter au mieux les apports naturels et gratuits (solaire, géothermie, ...). Ceci est applicable aux nouvelles constructions alors que le parc immobilier concerné par les améliorations énergétiques potentielles est très vaste et encore largement composé de constructions anciennes.

Originalités de cette recherche

Cette recherche vise à améliorer le confort des occupants d'un bâtiment ancien en exploitant au mieux les apports solaires tant pour l'éclairage que pour la régulation de température intérieure. Elle se distingue néanmoins de bon nombre de travaux sur le domaine en étudiant le confort au niveau de l'occupant mais la consommation énergétique à l'échelle complète du bâtiment.

Pour cela, elle se base sur un découpage fonctionnel du bâtiment pour en réaliser une modélisation des échanges énergétiques avec l'environnement. Ce modèle est par la suite le point de départ de la création de lois de commande des différents apports énergétiques sous contraintes de confort de l'occupant.

Ces travaux font suite à ceux abordés précédemment (chapitre 3) en associant désormais les confort visuel et thermique, et en étendant le cadre d'étude de la pièce au bâtiment complet.

4.2 Le système bâtiment

Comme pour les recherches précédentes sur la réalité virtuelle et le confort visuel, avant de proposer des avancées basées sur des solutions mécatroniques, nous devons prendre le temps de définir, décomposer, modéliser et analyser les ressentis et modes d'usage des occupants au sein d'un bâtiment. Malgré la relation forte qui lie l'homme à son habitat, le contrôle d'un bâtiment est complexe à concevoir du fait notamment de la subjectivité du confort et de la notion de bien-être.

Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons aux bâtiments en exploitation et non en conception. On note que les occupants recherchent toujours plus de confort et de services, tandis que l'exploitant vise une rentabilité qui passe entre autres par une efficacité énergétique reconnue. Ces deux critères sont liés en grande partie à la conception du bâtiment. En effet, bien que les études préalables à la construction d'un bâtiment permettent d'en évaluer à l'avance le potentiel pour répondre aux contraintes énergétiques, lors de son exploitation, les pratiques des occupants tendent souvent à générer d'importants gaspillages et pertes énergétiques par manque de connaissance sur le pilotage du système bâtiment et par excès de recherche de confort.

Pour éviter ces biais qui réduisent à néant les efforts consentis pendant la conception, nous abordons le bâtiment comme un **système** à part entière en prenant en compte les **relations cause/effet** entre

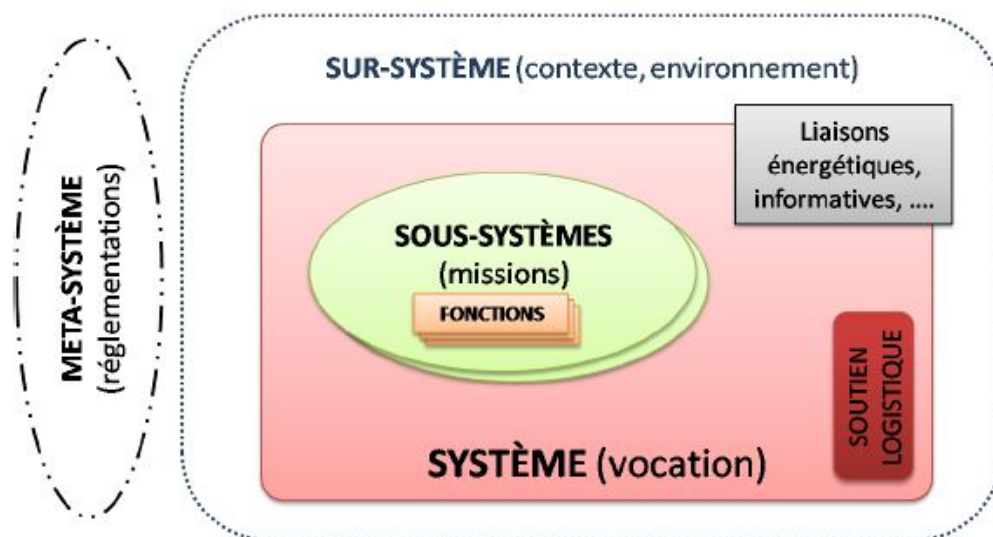


FIGURE 4.2 – Architecture globale du système bâtiment

chaque composant, la **globalité** de son fonctionnement, les **organisations** structurelle et fonctionnelle qui le définissent et sa **complexité** relative notamment à ses contraintes d’usage.

La prédiction des modes de vie et fonctionnement d’un bâtiment est si délicate, qu’elle ne peut s’envisager que par simulation. Afin de mettre en oeuvre un modèle complet, nous décomposons d’un point de vue structurel et fonctionnel le bâtiment tout d’abord vis à vis de tout ce qui l’entoure (sur-système), puis de ce qui le compose (sous-systèmes), et enfin en s’attachant à ses sous-systèmes porteur de missions (Fig.4.2).

Pour cette étude, nous nous focalisons sur le bâtiment et à ses relations avec son sur-système, à savoir principalement les apports naturels d’énergie produits par son environnement. Notre intérêt se porte sur la vivabilité du lieu d’étude (confort thermique et optique) sans interférer avec la notion de sur-vivabilité qui vise à protéger l’occupant des intrusions, de la pollution, des incendies, etc.

4.2.1 La notion de confort

Sans généraliser, et de façon indépendante à la mission du bâtiment (logement individuel, hôpital, école, atelier...), on peut ajouter au confort visuel fonctionnel déjà abordé dans le chapitre 3, le confort thermique ressenti par l’occupant. Cette notion de confort peut se baser sur de multiples critères comme la température de l’air, la température radiative moyenne, la température opérative (moyenne pondérée des deux précédentes), l’humidité relative et la charge thermique qui décrit l’écart entre la chaleur produite par le corps et la chaleur dissipée [Jung, 2009].

A des fins de commande, et sans garantir pouvoir contrôler la totalité des grandeurs listées selon l’équipement du bâtiment étudié, on peut définir des zones de confort qui intègrent déjà plusieurs critères physiques [Fauconnier, 1992] (Fig.4.3). Nous nous basons sur ce référentiel commun pour définir des zones objectif en termes de confort thermique.

4.2.2 L’architecture de contrôle

La description systémique a montré le grand nombre de relations en présence entre les fonctions et multiples strates du bâtiment. Au-delà de cette complexité comportementale, le pilotage du bâtiment se doit d’intégrer les interactions entre les **phénomènes physiques** (thermiques et optiques) issus d’un environnement sans cesse en changement (d’où la nécessité d’avoir des modèles de représentations de l’environnement climatique), la diversité des **équipements de confort** pouvant avoir des impacts sur l’évolution des états thermiques et optiques d’une pièce (comme les stores vénitiens par exemple), et les **utilisateurs** dont la variabilité en termes d’action et la subjectivité des ressentis en termes de confort constituent la plus grande part d’incertitude.

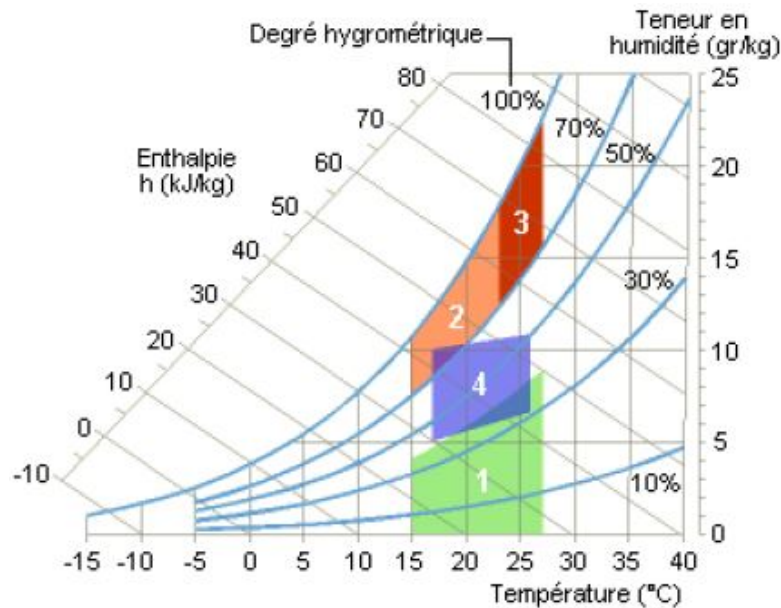


FIGURE 4.3 – Zone 4 : Confort hygrothermique - Zone 1 : Sécheresse - Zones 2 et 3 : Développement bactérien

De nombreuses études ont montré qu'il était possible de satisfaire localement l'occupant relativement à la qualité de l'air [Kolokotsa D., 2009] ou à la quantité de lumière naturelle [Guillemin A., 2001] en ayant recours à des commandes simples, basées sur des réseaux de neurones ou de la logique floue. Cependant ces commandes égocentrées sont faites pour satisfaire les exigences locales des occupants sans s'intégrer à une architecture globale, ce qui pourrait créer des surconsommations intempestives (pas de prise en compte des phénomènes globaux sur les pièces voisines et l'ensemble du bâtiment).

Nous allons donc proposer ici une architecture de contrôle la plus générique possible qui se base sur les différents systèmes identifiés lors de l'étude systémique du bâtiment.

Dans un immeuble d'habitation (Fig.4.4), on retient 3 niveaux de contrôle possibles à l'échelle du bâtiment, du logement et de la pièce qui ont nécessité d'échanger d'un point de vue informationnel sachant qu'ils sont en interaction physique. Afin d'appliquer l'architecture proposée et le modèle de contrôle associé, nous décidons de retenir comme cas d'étude, un bâtiment tertiaire R+3 de l'INSA de Lyon qui comporte des salles de cours et des laboratoires (Fig.4.5).

La mission de ce bâtiment étant liée à l'enseignement et la recherche, nous pouvons le considérer comme un seul et même logement, ce qui simplifie le schéma de son architecture (Fig.4.6).

Une pièce type de bâtiment est un bureau carré de 5 m de côté sous 3 m de plafond qui comprend une paroi vitrée sur l'extérieur avec deux ouvrants de 2 m de côté équipés de stores vénitiens intérieurs pilotés individuellement. Le bâtiment dispose du chauffage central (chaudière au niveau bâtiment) qui offre une solution modulable dans chaque pièce via des radiateurs thermostatés. Des luminaires de type plafonnier à pilotage unique sont présents dans chaque pièce également.

Au regard de l'architecture proposée sur la figure 4.6, nous allons mettre en place une commande hiérarchisée qui au niveau du bâtiment va piloter :

- La température moyenne de l'air,
 - La consommation du chauffage central,
- et au niveau de la pièce en intégrant les grandeurs caractérisant le confort :
- La température opérative moyenne,
 - La quantité et répartition de lumière,
 - La consommation des luminaires, stores et radiateurs.

Les conditions environnementales retenues sont fournies par l'ADEME. Le climat est considéré comme tempéré avec une influence de la mer Méditerranée. La température en hiver est comprise entre

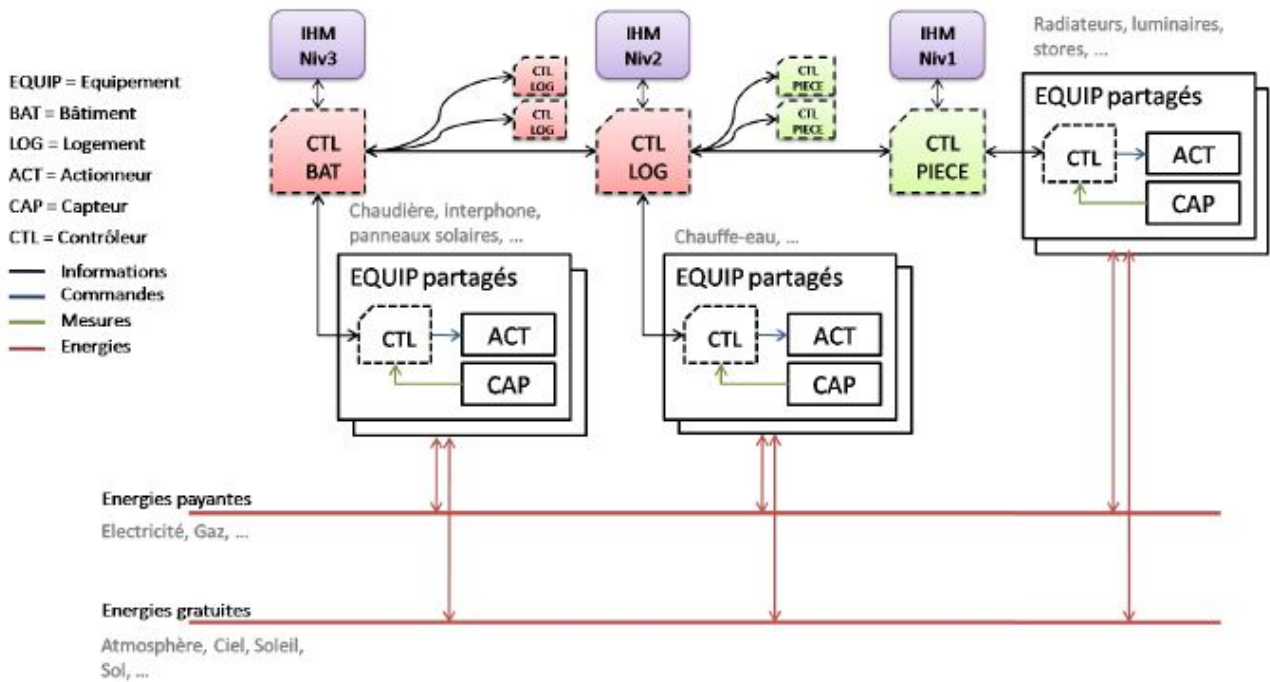


FIGURE 4.4 – Architecture de contrôle du bâtiment

1°C et 6°C et entre 16°C et 26°C en été. La durée moyenne d'ensoleillement est d'environ 2100 h/an et le potentiel énergétique est de 1400 kWh/m²/an.

4.3 Modélisation et simulation du bâtiment

Les frontières de notre système étant maintenant bien définies, nous pouvons faire un choix de méthode de simulation des phénomènes optiques et thermiques, retenir des modèles comportementaux pour les équipements de confort optiques et thermiques, et adopter un modèle pour l'ensemble du bâtiment.

4.3.1 Méthodes de simulation

Les principales **méthodes de simulation thermiques** qui existent dans le bâtiment sont l'approche **nodale** et l'approche **zonale**. La première décompose le bâtiment en noeuds thermiques où les grandeurs physiques sont supposées homogènes, ce qui interdit de voir des gradients de température au sein d'un même noeud (dans une pièce). La seconde approche découpe les noeuds en zones, ce qui permet d'observer le mouvement d'air dû aux convections forcées par exemple. Des solutions logicielles telles que TRNSYS ou SIMBAD existent déjà pour étudier les performances thermiques d'un bâtiment et le dimensionnement de ses équipements.

Dans notre cas, pour expérimenter des stratégies de commande, il est préférable de retenir un modèle nodale qui va offrir une meilleure réactivité de simulation.

De leur côté, les **méthodes de modélisation optique** peuvent être macroscopiques comme le modèle de Facteur de Lumière du jour (FLJ) proposée par la Commission Internationale de l'Eclairage, ou bien des modèles numériques de rendu par radiativité ou lancé de rayons. Des solutions logicielles pour le rendu optiques telles que RADIANCE ou DIALUX sont disponibles mais ne semblent pas adaptées à nos objectifs car elles ne séparent pas la contribution des différentes sources et ne peuvent pas prendre facilement les critères de confort tels qu'exprimés dans le chapitre 3.

On retiendra donc les modèles mathématiques décrivant le confort optique dans une pièce en fonction de l'ambiance visuelle courante modulée par les luminaires et les apports naturels produits par les fenêtres équipées de stores vénitiens.

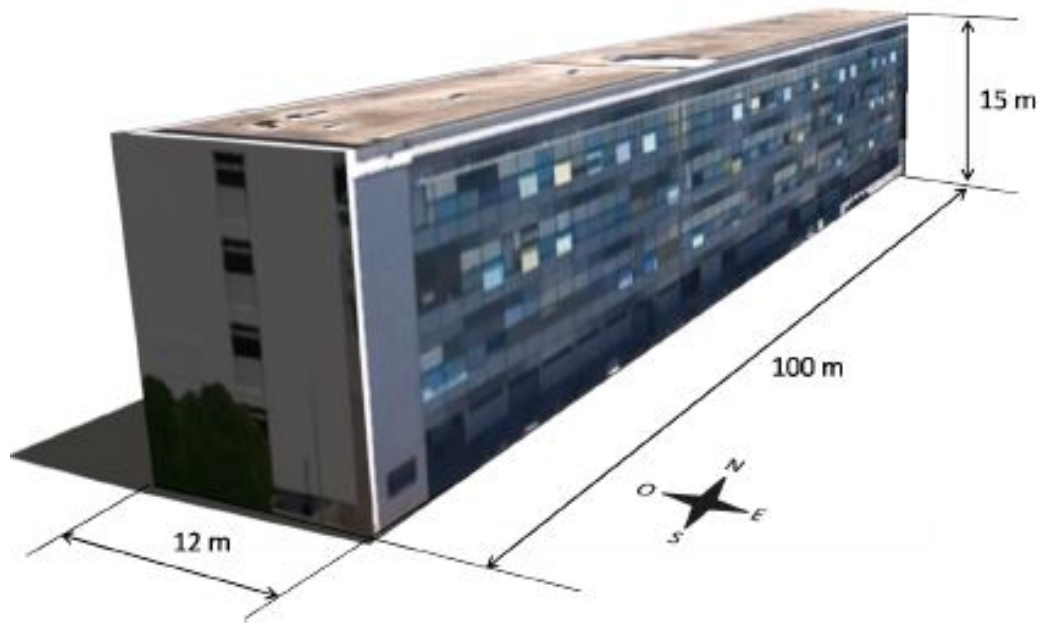


FIGURE 4.5 – Bâtiment d'étude

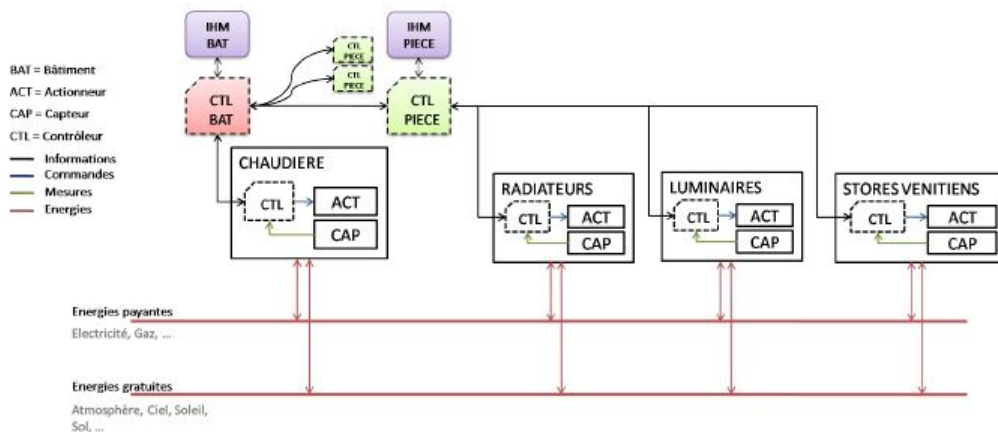


FIGURE 4.6 – Architecture de contrôle du bâtiment d'étude

4.3.2 Modèle climatique

La finalité de commande nous invite à retenir un modèle d'environnement extérieur thermique et optique hors atmosphère moyenné qui nous donnera des tendances globales sur l'efficacité énergétique des lois de commande choisies. Ainsi, on note que la constante solaire énergétique, $E_{esc} = 1367 \text{ W/m}^2$, et la constante solaire lumineuse, $E_{vsc} = 133800 \text{ Lux}$ sont susceptibles de varier de $\pm 3,34\%$.

Par ailleurs, la présence de nébulosité longuement décrite selon les types de ciel référencés par la CIE ne sera pas modélisée, car nous utiliserons pour la simulation directement les mesures issues de la station météorologique IDMP de l'ENTPE de Vaux en Velin [Dumortier, 2011].

4.3.3 Spécifications du modèle de simulation

Nous nous basons sur des modèles physiques optique et thermique adaptés au contexte de commande (Fig.4.7).

La structure choisie doit permettre à chaque organe d'avoir une contribution optique et/ou thermique sur les états du bâtiment. Pour ne pas rendre les temps de calcul trop importants, nous considérerons les couplages les plus forts aux dépens des moins importants.

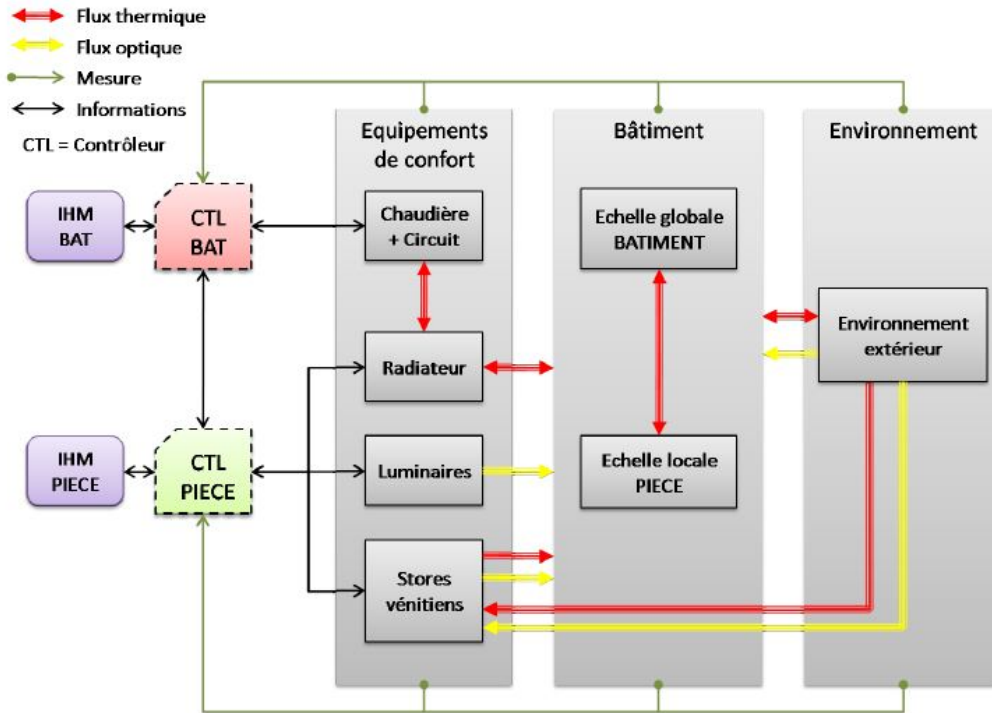


FIGURE 4.7 – Structure de simulation du bâtiment

Par ailleurs, nous ne retiendrons pas, comme souvent, un découpage du bâtiment en pièces élémentaires d'où se déduit le comportement global du bâtiment (cette méthode proche des éléments finis est très consommatrice de temps de calcul et pas forcément appropriée pour la commande). Notre approche s'appuie sur un modèle global de bâtiment (aux faibles dynamiques) et d'un modèle de pièce d'étude qui localement contribue tout de même à l'évolution des états du bâtiment.

Enfin, l'aspect énergétique étant sous-jacent à toute cette étude, les modèles de consommation de chaque organe seront considérés.

4.3.4 Modèles des équipements de confort

Le **chauffage central** au niveau bâtiment est composé d'une chaudière régulant la température du fluide (T_{chaud}) et d'une vanne trois voies qui module le débit de fluide chaud (q) apporté (Fig.4.8). Un circulateur fixe le débit Q pour alimenter les radiateurs dans les pièces à travers un robinet thermostaté qui régule le débit q_i selon la température ambiante.

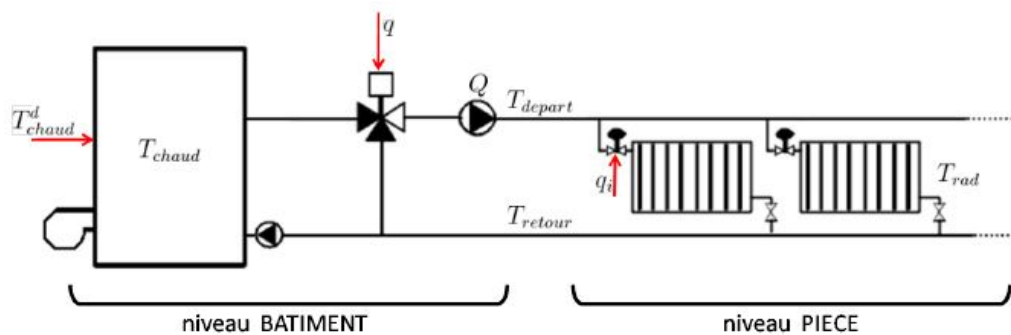


FIGURE 4.8 – Chauffage central

La montée en température de la chaudière est considérée comme un système du premier ordre avec τ_{chaud} comme constante de temps. On considère les températures T_{depart} , T_{retour} et T_{rad} comme indiquées sur la figure 4.8. L'apport thermique à l'air de la pièce, Φ_{rad} , est fonction du coefficient

d'échange, K_{rad} , entre les températures des radiateurs et de l'air. La capacité calorifique du fluide, C_p , et sa masse volumique, ρ , permettent de calculer les températures de retour et l'énergie échangée.

Les **stores vénitiens** motorisés font varier leur descente et l'angle de leurs lamelles ce qui module leur filtrage vis à vis de l'éclairage direct, E_{dir} , provenant du soleil et de l'éclairage diffus, E_{dif} . Une approche géométrique permet de définir un coefficient d'occultation diffus, occ_{dif} , et direct, occ_{dir} liés au cosinus de l'angle des lamelles, Θ , et à l'incidence horizontale des rayons du soleil, γ_s (Fig.4.9).

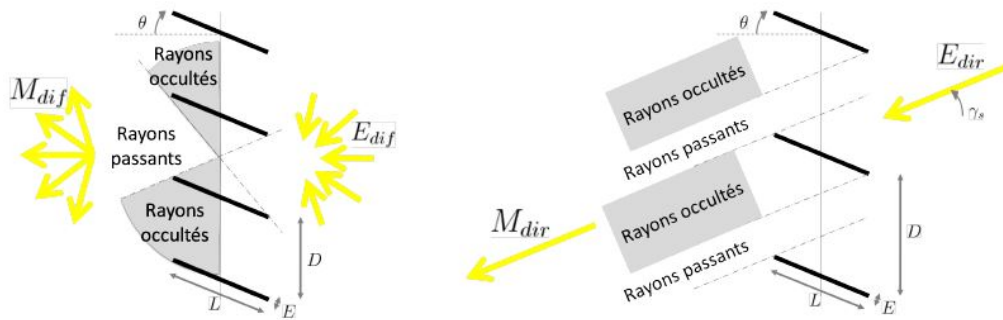


FIGURE 4.9 – Occultation des stores

En intégrant la descente des stores (hauteur de la barre de lesté par rapport au bas de la fenêtre) et les coefficients de transmission des éclairagements diffus et direct fonction de l'angle des lamelles, on établit une transmittance optique diffuse (To_{dif}^{sv}) et directe (To_{dir}^{sv}) des stores qui dépend de γ_s (Fig.4.10).

On note que lorsque les stores sont totalement fermés la transmittance est encore de 30%, l'occultation n'est pas totale.

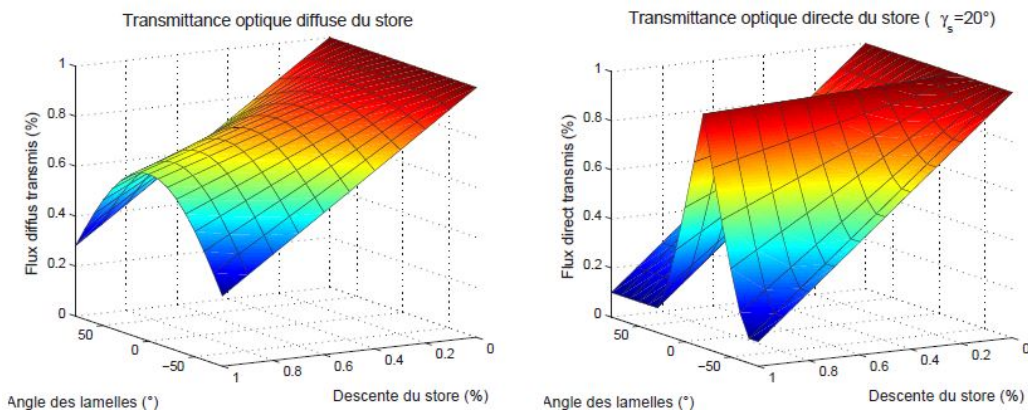


FIGURE 4.10 – Transmittances optiques des stores

Comme évoqué précédemment, les stores vénitiens internes ont une contribution thermique notable qu'il faut modéliser en parallèle de leur comportement optique. Nous ne retenons pas les modèles physiques complexes basés sur les échanges radiatifs entre lamelles du fait de leur complexité. En revanche, nous adoptons des hypothèses simplificatrices (capacité thermique des lamelles négligeable) pour définir une transmittance thermique directe (Tt_{dir}^{sv}) qui est fonction de la quantité de rayons pénétrant la pièce par la fenêtre, et une transmittance thermique diffuse (Tt_{dif}^{sv}) représentant l'échange convectif du store avec l'air de la pièce. Bloquer les rayons solaires via les stores chauffe rapidement l'air d'une pièce tandis que les laisser pénétrer permet d'emmagasiner de la chaleur dans le bâti.

Les **luminaires** sont souvent des plafonniers équipés de tubes fluorescents pilotés en tout ou rien au gré des occupants. Leur puissance lumineuse est proche de leur puissance électrique donc leur flux lumineux diffus sera égale à cette puissance affecté du rendement lumineux (fonction des miroirs employés et des tubes). Pour la simulation, on utilisera un luminaire composé de 4 tubes de 50 W produisant 16000 lm.

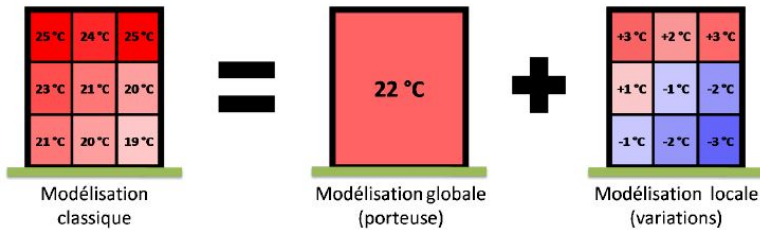


FIGURE 4.11 – Modélisation par décomposition fréquentielle

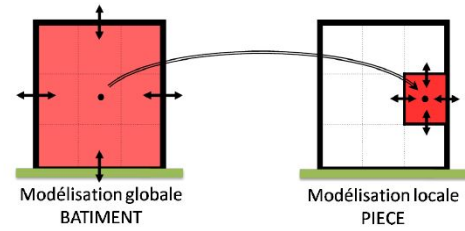


FIGURE 4.12 – Principe de modélisation retenue

4.3.5 Modèle thermique de bâtiment et de la pièce

Les modèles et la méthode de simulation doivent permettre de retranscrire l'évolution des états du bâtiment et de la pièce d'étude qui ne sont pas au même niveau. D'un point de vue thermique, au regard des constantes de temps de ces deux niveaux, nous pouvons raisonnablement opter pour un découplage en admettant que les pièces subissent des variations autour de la température moyenne du bâtiment (Fig.4.11) qui donne les conditions aux limites de la pièce (Fig.4.12). On suppose que les pièces voisines suivent l'évolution moyenne du bâtiment ce qui permet de ne pas avoir à toutes les simuler pour connaître le comportement de la pièce d'étude.

Le bâtiment n'ayant pas de grandeur optique moyenne, les **comportements optiques** seront simulés localement au niveau de chaque pièce. Les hypothèses majeures de modélisation et de simulation concernent le découplage fréquentiel des différents niveaux d'un point de vue thermique et le fait que les actionneurs n'influent pas sur des grandeurs autres qu'optiques ou thermiques. L'acoustique, l'aéraulique et la qualité de l'air par exemple, ne seront pas pris en compte.

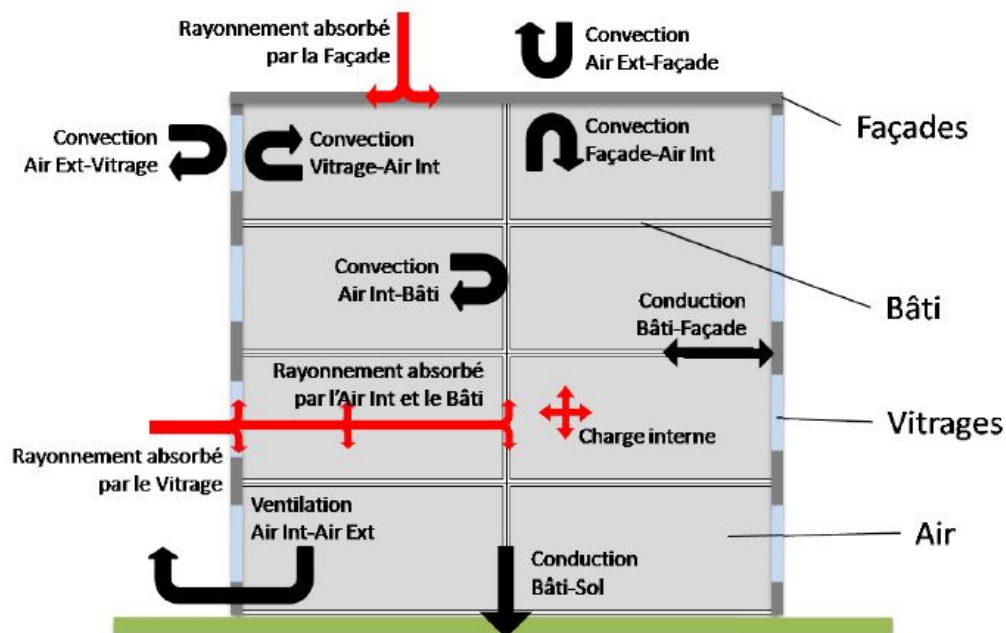


FIGURE 4.13 – Echanges thermiques

Les échanges thermiques entre le bâtiment et son environnement sont importants et nous séparons son modèle en deux parties pour distinguer son enveloppe en contact avec l'extérieur et l'intérieur de celui-ci qui est composé de parois et de mouvement d'air (Fig.4.13). On classe les échanges thermiques comme des apports (rayonnement solaire et sources internes) et des pertes (ventilation et transmission via le sol et l'enveloppe). On limite la quantité de noeuds pour simplifier le modèle de simulation en adoptant (en °C) :

- 1 noeud de température moyenne de l'air intérieur, $\overline{T_a}$,

- 1 noeud de température moyenne du bâti, \overline{T}_b ,
- 5 noeuds pour les températures moyennes des 4 façades et du toit, \overline{T}_{fi} ,
- 4 noeuds pour les températures moyennes des vitrages de chaque façade, \overline{T}_v .

Les conditions aux limites sont données par (en °C) :

- La température de l'air extérieur, T_e ,
- La température du sol, T_g

Les différents noeuds reçoivent comme apports énergétiques solaires (W) :

- Le flux radiatif absorbé par l'air intérieur, Φ_a ,
- Le flux radiatif absorbé par le bâti, Φ_b ,
- Le flux radiatif absorbé par les façades, Φ_f ,
- Le flux radiatif absorbé pas les vitrages, Φ_v .

Le modèle thermique global est écrit en exploitant l'outil pseudo-Bond Graph qui utilise les températures comme variable d'effort et les débits de chaleur comme variable de flux (et non les débits entropiques comme le ferait le Bond Graph). Les équations de bilan à chaque noeud se basent sur la loi de conservation de l'énergie (4.1) :

$$C \times \frac{dT}{dt} = \sum_{voisins} \Phi \quad (4.1)$$

Au niveau des **vitrages**, le bilan énergétique intègre la capacité thermique du vitrage (en J/K), C_v , ainsi que les conductances thermiques du vitrage (en W/K) avec l'air extérieur, K_{ve} , et avec l'air intérieur, K_{va} . Le flux radiatif du vitrage est fonction de la puissance solaire incidente, de la superficie de vitrage et du coefficient d'absorption du vitrage.

Il en est de même au niveau des **façades** où l'on retient comme caractéristiques la capacité thermique de la façade (en J/K), C_f , et les coefficients de conductance thermique de celle-ci avec l'air intérieur, K_{fa} , l'air extérieur, K_{fe} , et le bâti, K_{fb} . Le flux radiatif sur la façade dépend de ces dimensions, de la puissance des rayons solaires incidents et du coefficient d'absorption de l'énergie solaire par la façade.

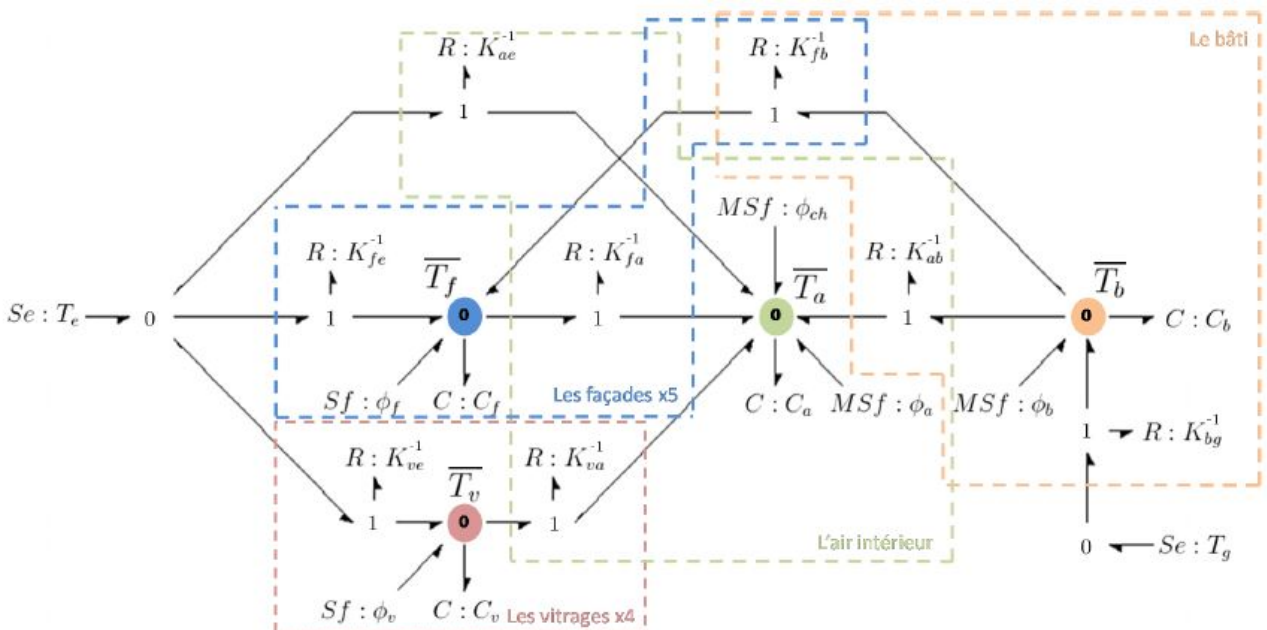


FIGURE 4.14 – Représentation Bond Graph du modèle thermique global

Le **bâti** suit la même modélisation en considérant la capacité thermique du bâti (en J/K), C_b , et les coefficients de conductance thermique du bâti avec l'air intérieur (en W/K), K_{ab} , le sol, K_{bg} , et la façade comme précédemment cité, K_{fb} . On note que les échanges entre les façades et le bâti se font au niveau des 5 noeuds de façade. Par ailleurs, le flux radiatif solaire qui impacte le bâti en traversant le vitrage et le store via sa transmittance thermique, $T_{o_{dir}^{sv}}$ (Fig.4.10), est moyenné en considérant une occultation moyenne des stores sur une même façade.

Enfin la température de l'**air intérieur** est calculée en prenant en compte les échanges convectifs avec le bâti, les façades, le vitrage, d'une part, puis les échanges par ventilation d'air intérieur/extérieur, et les flux thermiques solaire direct ou transmis par les stores, et le flux issu des sources internes.

En associant les modèles de ces 4 éléments, on peut représenter un modèle Bond Graph de l'ensemble comme sur la figure 4.14.

A l'**échelle de la pièce**, les évolutions thermiques vont être plus rapides du fait des volumes et surfaces plus faibles et de la présence d'actionneurs locaux. On considère les échanges thermiques de l'air ambiant avec la structure du bâtiment qui régit les conditions aux limites. L'hypothèse de découplage signifie que les grandeurs thermiques de la pièce ne vont pas faire varier ces conditions limite imposées par le bâtiment. Les échanges considérés sont similaires à ceux énumérés plus haut et intègrent désormais la charge interne représentant le chauffage, et l'échange d'air dans le bâtiment (Fig.4.15).

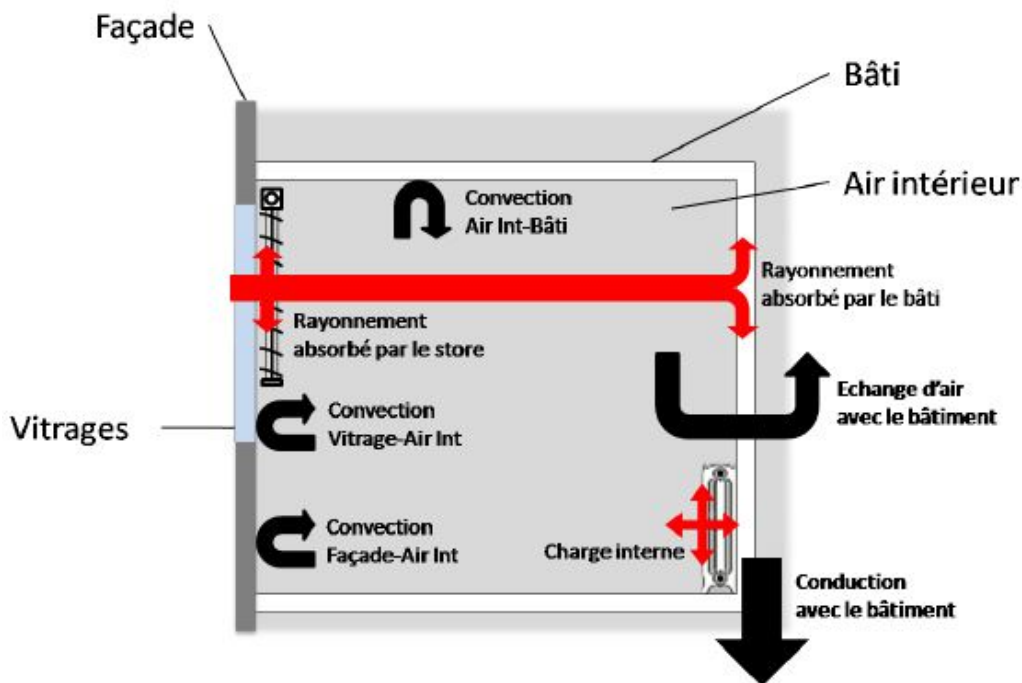


FIGURE 4.15 – Echanges thermiques d'une pièce

Le bilan thermique au niveau de la pièce introduit de nouvelles variables qui sont la température de l'air de la pièce, T_a (en °C), la température des parois internes de la pièce, T_b (en °C), et le flux émis par les radiateurs, Φ_{ch} (en W). Par ailleurs, les échanges imposent de considérer les conductances thermiques (en W/K) entre :

- le bâti et l'air intérieur (K_{ab})
- le bâti global et le bâti local (K_{bb})
- l'air intérieur et la façade (K_{fa})
- l'air intérieur et le vitrage (K_{va})
- l'air intérieur et l'air bâtiment par ventilation ($K_{a\bar{a}}$)

Avec ces hypothèses, le modèle thermique de la pièce peut se représenter en Bond Graph comme sur la figure 4.16

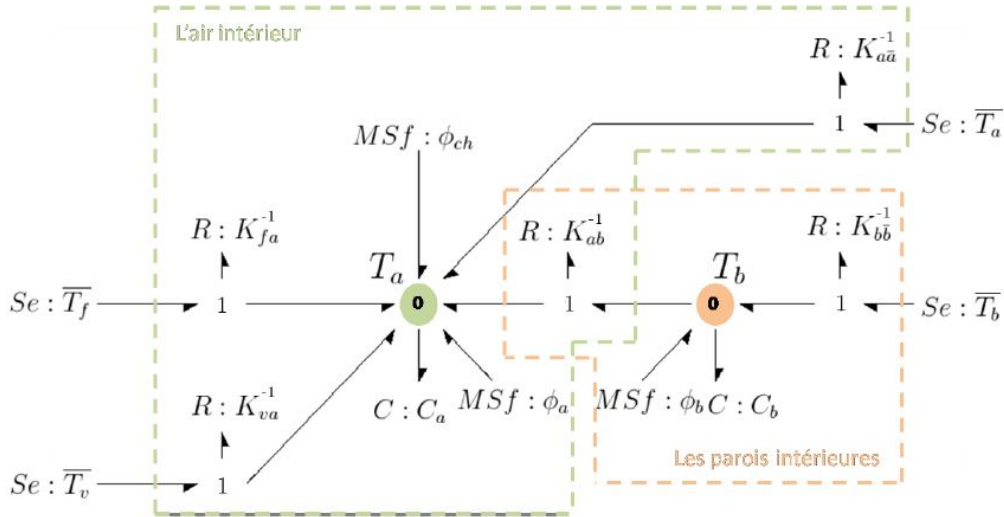


FIGURE 4.16 – Bond Graph du modèle thermique d'une pièce

4.3.6 Modèle optique de la pièce

N'ayant pas d'actionneurs optiques partagés au niveau du bâtiment, nous ne modélisons que l'ambiance lumineuse au sein d'une pièce en considérant algébriquement les flux lumineux naturel et électrique (Fig.4.17). En faisant raisonnablement l'hypothèse que toutes les surfaces en présence dans la pièce sont diffusantes (mâtes plutôt que brillantes), nous pouvons calculer l'éclairement moyen (E) comme étant la somme des flux issus des sources (Φ_{dif}) rapportée à la surface des parois (S) (4.2).

$$E = \frac{1}{S} \sum_{sources} \Phi_{dif} \quad (4.2)$$

Les flux sont calculés en prenant en compte les éclaircissements extérieurs diffus et directs reçus par la façade et les transmittances de stores abordés à la page 76.

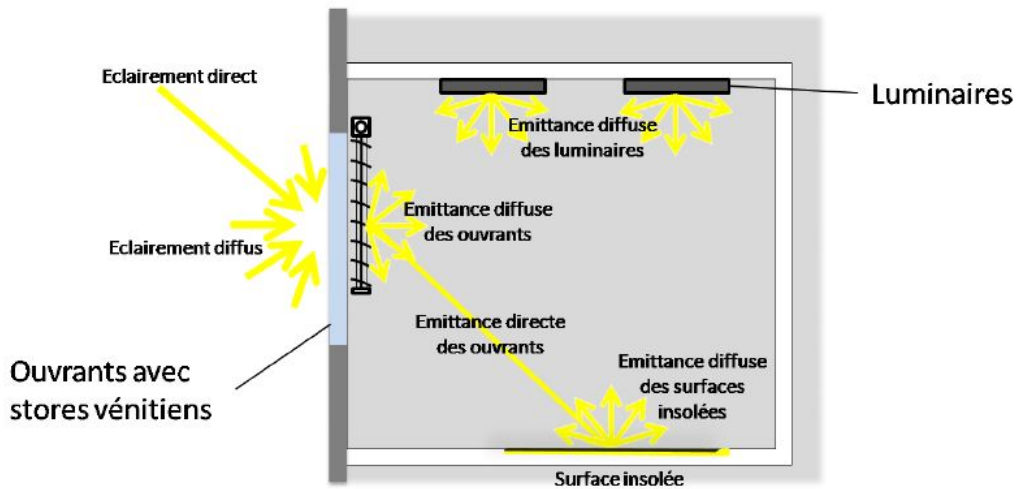


FIGURE 4.17 – Apports optiques dans la pièce

Le choix de ce modèle est guidé par l'utilisation de ces grandeurs optiques pour traduire et piloter le niveau de confort comme décrit précédemment (3.3.2 p56).

4.3.7 Résultats de simulation

A partir des données collectées chaque minute par la station météorologique de l'ENTPE de Vaulx en Velin (Réseau : *International Daylight Measurement Programme*), nous retenons 4 journées type (hiver ciel couvert, hiver ensoleillé, été ciel couvert, été ensoleillé) de l'année 2009 pour évaluer la cohérence des modèles de simulation et dans un second temps, la commande. Après reconstruction, nous disposons de l'éclairement global, l'éclairement diffus, l'éclairement direct, la puissance énergétique solaire et de la température sèche.

En considérant, dans le bâtiment de référence, une pièce dont les ouvrants sont orientés au sud, nous observons l'**évolution des températures** de l'air de la pièce, de l'air du bâtiment, des bâtis global et local, ainsi que de la façade concernée (sud). Le bâtiment est ici considéré non piloté (aucun chauffage sur l'ensemble de l'année test) et les stores sont entièrement relevés. On observe sur la figure 4.18 que l'air de la pièce atteint une température maximale alors que le soleil est au zénith pour la journée ensoleillée, tandis que pour la journée où le ciel est couvert, l'apport de chaleur vers l'air de la pièce vient en priorité de l'énergie emmagasinée dans le bâti.

Ces mêmes journées ont été de nouveau simulées en considérant les stores complètement fermés, et on observe que lorsqu'il y a ensoleillement, l'énergie radiative est stoppée par les stores, ce qui permet d'élever très rapidement et de façon importante la température de l'air de la pièce (32,5°C soit une augmentation de pratiquement 3°C). Ceci illustre l'intérêt des stores pour orienter les apports solaires thermiques vers l'air de la pièce ou bien le stockage de chaleur au sein du bâti.

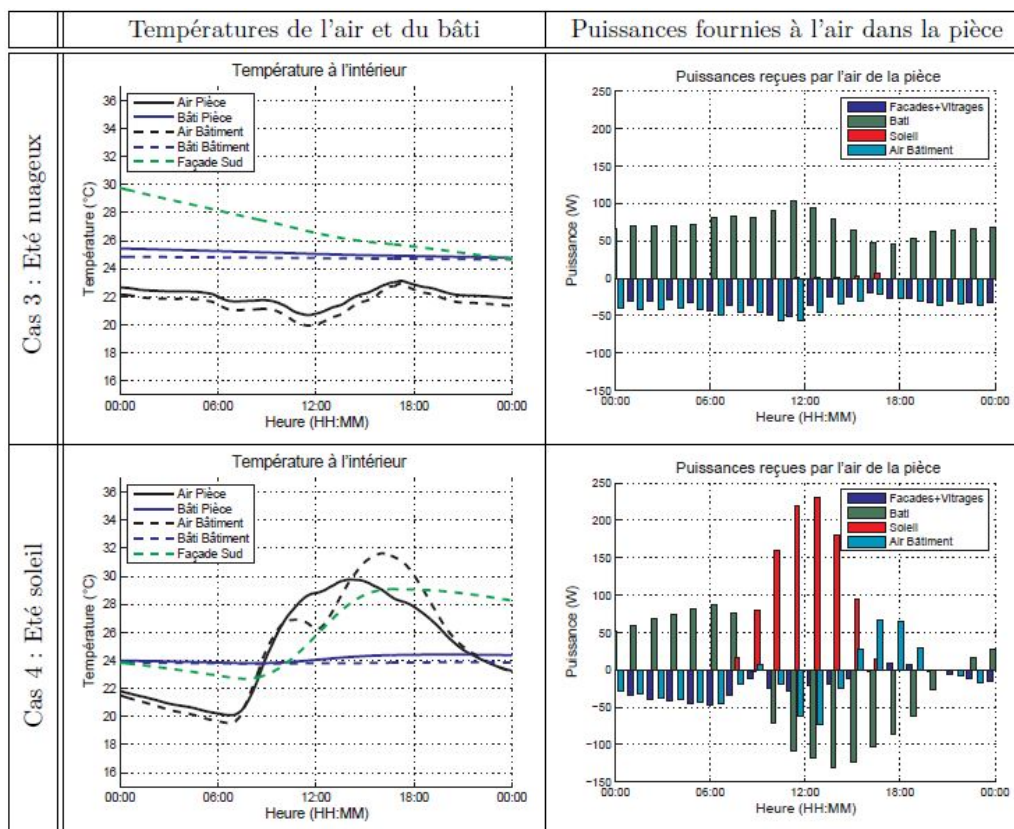


FIGURE 4.18 – Simulation thermique en été

Le **comportement optique** de la pièce est principalement dicté par la quantité de lumière pénétrant la pièce (à l'image de l'aspect thermique, nous évaluons notre modèle exempt de toute source artificielle). En fin d'année, nous observons d'importantes baisses de luminosité dues à la présence fréquente de nébulosité. Au niveau des 4 journées type, on constate qu'en présence de nuage, le potentiel lumineux (aire en jaune comprise entre les courbes d'éclairement tous stores fermés et tous stores ouverts) suit les variations perturbées de l'éclairement extérieur (Fig.4.19) . D'autre part au niveau des journées ensoleillées, on remarque que l'éclairement maximal est plus important en hiver qu'en été dû à

l'altitude du soleil irradiant la façade sud et que les stores ont un pouvoir de modulation d'éclairage de la pièce fluctuant de 65% à 80%.

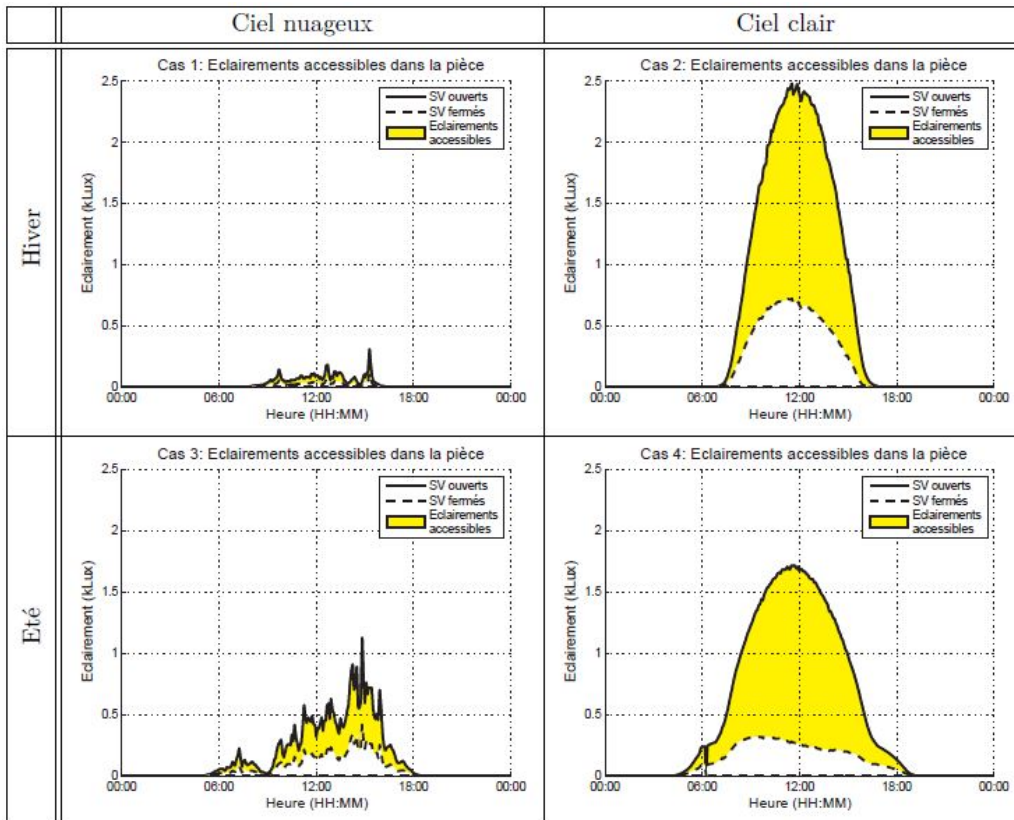


FIGURE 4.19 – Simulation d'éclairage

Le simulateur est construit suivant la décomposition systémique réalisée au préalable en favorisant des hypothèses de découplage de fréquentiel. La traduction des modèles de bilan thermique en Bond Graph permet l'écriture rigoureuse du modèle global tout en ayant accès aux grandeurs caractéristiques de confort et de consommation énergétique. Les simulations menées sur les données réelles d'une année et plus spécifiquement autour de 4 journées type (conditions climatiques variées) montrent d'une part la cohérence du simulateur et d'autre part, la possibilité de moduler l'impact des flux naturels thermiques et optiques que reçoit le bâtiment via les organes de confort (chauffage, éclairage électrique et surtout les stores vénitiens).

Ce constat guide notre investigation en termes de développement de loi de commande pour contrôler le bâtiment.

4.4 Contrôle du bâtiment

Le contrôle du bâtiment est abordé depuis le début de cette recherche en prenant en compte des données rationnelles et facilement quantifiables, que sont l'énergie consommée pour se chauffer et s'éclairer, mais aussi des critères plus subjectifs liés au confort ou à l'absence d'inconfort. Piloter ces deux aspects simultanément met en évidence la présence d'antagonismes (le confort coûte que coûte) et de subjectivité dans la notion de confort, ce qui incite à viser le maintien d'une ambiance de confort. On note que les grandeurs optiques et thermiques sont couplées par l'action du soleil et leur modulation via les stores vénitiens.

En considérant ces contraintes et les objectifs à l'échelle du bâtiment (gestion thermique) et à celle de la pièce (confort optique et thermique), nous proposons une architecture de contrôle hiérarchisée qui se compose d'un contrôleur bâtiment en lien avec la chaudière et le contrôleur pièce, qui, lui, communique avec les contrôleurs locaux des radiateurs, luminaires et stores (Fig.4.20).

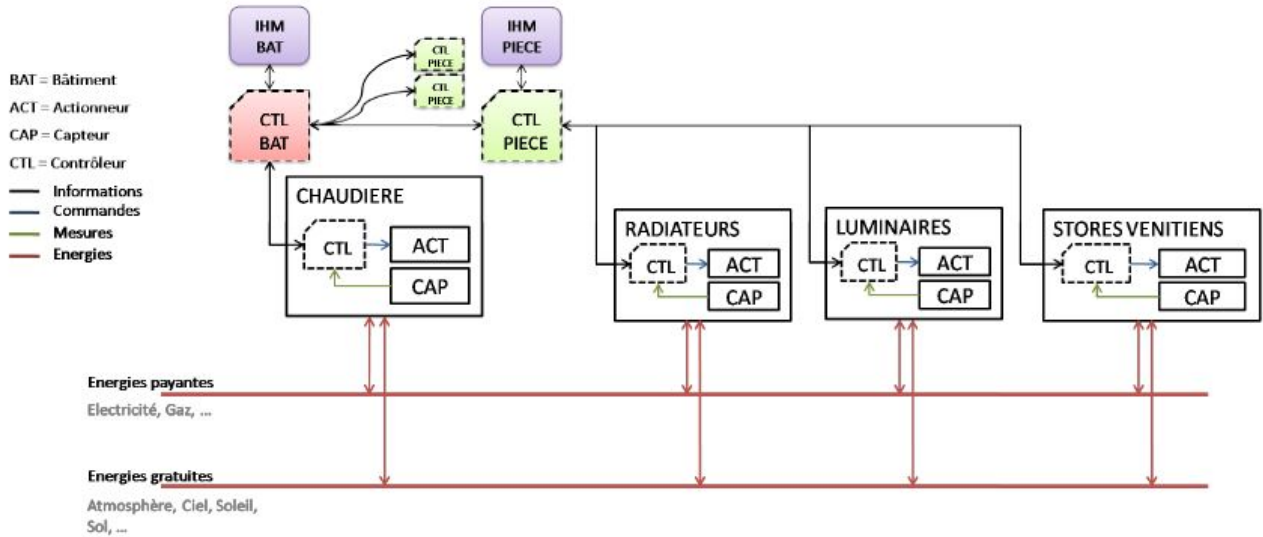


FIGURE 4.20 – Architecture de contrôle

4.4.1 Contrôle des actionneurs

Au **niveau du bâtiment**, nous pilotons le débit, q , de la vanne 3 voies de la **chaudière** et nous utilisons les informations de température d'eau de la chaudière, T_{chaud} , la température de retour d'eau, T_{retour} , et la température des radiateurs, T_{rad} (Fig.4.8, page 75).

Au **niveau de la pièce**, d'un point de vue thermique, nous pilotons essentiellement la **température opérative** qui contribue très majoritairement au confort ressenti. D'un point de vue optique, il est délicat de se baser sur les capteurs de confort qui nécessitent des mesures réparties et offrent souvent des points de vue individuels ne garantissant pas le même ressenti pour l'ensemble des occupants d'une même pièce [Dubois, 2001, Mahdavi et al., 2005, Guillemain A., 2001, Anthierens et al., 2008b, Leclercq et al., 2009]. Par conséquent, nous cherchons à favoriser le potentiel lumineux extérieur (économie d'énergie et confort du large spectre solaire) en **bannissant les éblouissements dus aux rayons directs** et en modulant la **répartition et la quantité de lumière** dans la pièce via les **stores vénitiens**.

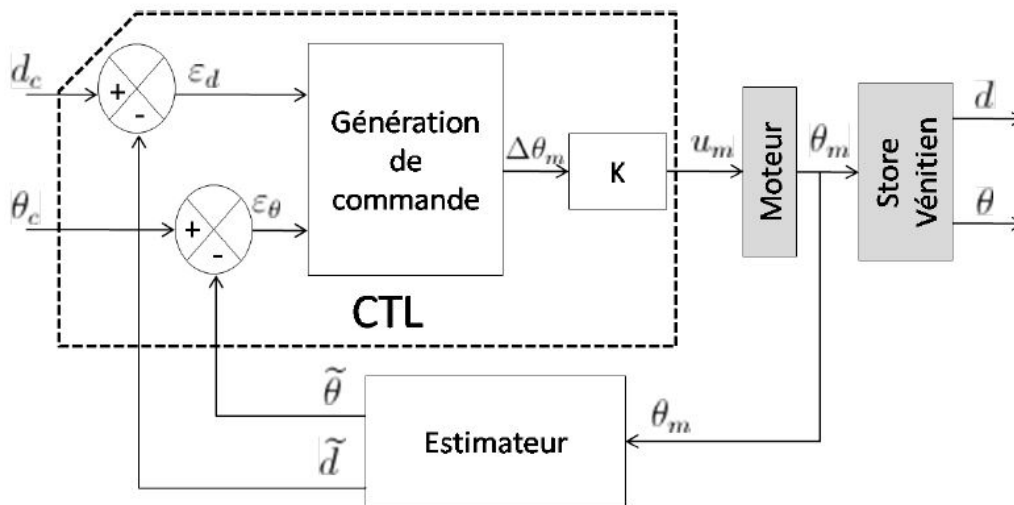


FIGURE 4.21 – Contrôle du store

Pour cela, nous agissons sur la descente et l'angle des lamelles qui sont couplés et actionnés par le moteur à courant continu. Dans la littérature, les stores, bien que souvent employés, sont toujours considérés comme parfaits sans que leur fonctionnement et commande fine ne soient abordés. C'est

pourquoi, nous avons consacré une partie de notre étude au contrôle précis de cet actionneur versatile [Arnal et al., 2011b].

A partir de l'angle de rotation du moteur des stores, θ_m , des dimensions des éléments de transmission et des angles de butée des lamelles, on peut estimer la descente actuelle, d , par \tilde{d} , et l'angle des lamelles actuel, θ , par $\tilde{\theta}$ (Fig.4.21).

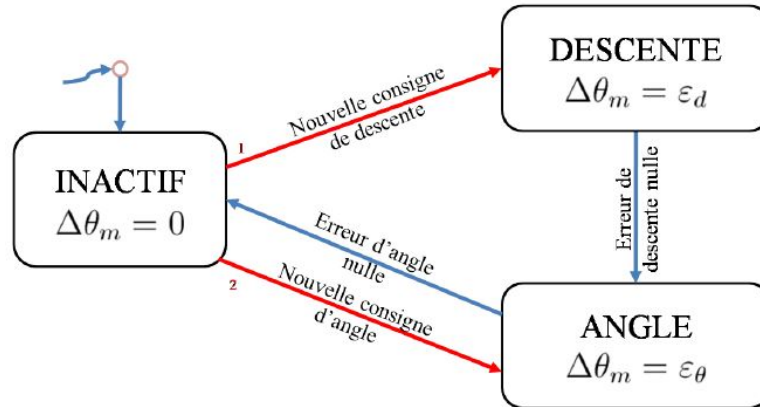


FIGURE 4.22 – États de commande du store

Le pilotage hybride comprend 3 phases pour satisfaire une consigne d'angle et de descente. Tout d'abord, on quitte le mode inactif pour réaliser la consigne en descente à ϵ_d près, puis on asservit l'angle moteur à ϵ_θ près avant de rejoindre le mode inactif (Fig.4.22).

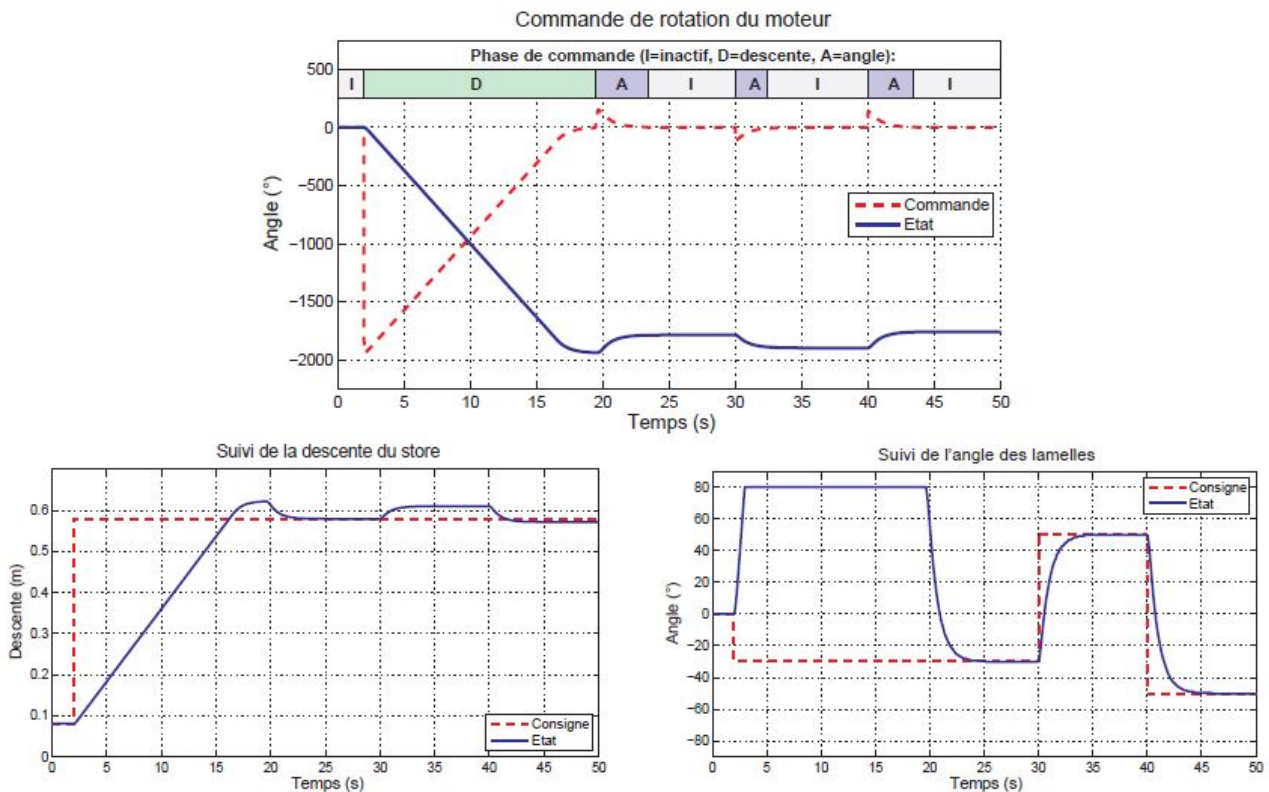


FIGURE 4.23 – Suivi de position du store

L'expérimentation confirme le bon fonctionnement du store qui satisfait ses 2 consignes. L'essai qui illustre cela sur la figure 4.23 montre le temps nécessaire pour descendre le store de 58 cm (16 s) et le dépassement de consigne anticipée pour atteindre la descente et l'angle souhaité des lamelles (les 2 paramètres sont couplés). Lorsqu'une simple variation d'angle des lamelles est demandée (à $t = 30$ s puis $t = 40$ s), on tolère de ne pas modifier la consigne de descente et on accepte une erreur sur cette

grandeur en conséquence. Cela est fait de sorte à ne pas avoir recours aux modifications de descente trop fréquemment car celles-ci engendrent des occultations complètes sur la hauteur de store déroulé, ce qui peut être cause de gênes visuelle et sonore.

On peut ainsi discrétiser la descente selon 5 niveaux par exemple de sorte à exploiter au maximum les variations d'angle des lamelles qui sont plus discrètes, fines et économiques (Fig.4.24).

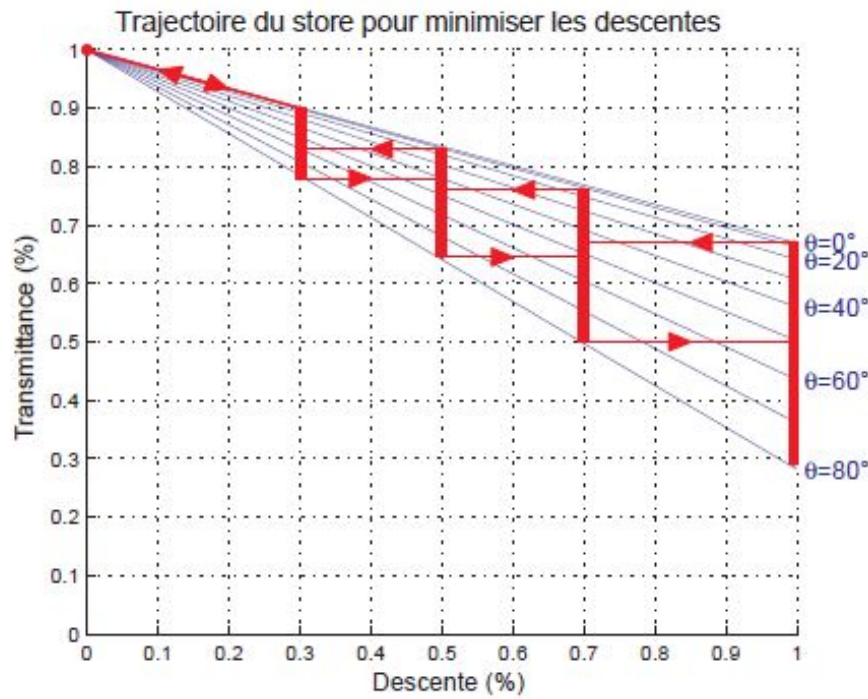


FIGURE 4.24 – Quantification de la descente du store

Le pilotage des **luminaires** est assuré en boucle ouverte avec une variation de puissance lumineuse de 0 à 100%.

4.4.2 Contrôle thermique du bâtiment

Au niveau du bâtiment, on pilote la chaudière pour satisfaire au mieux la consigne de température moyenne d'air dans le bâtiment ($\overline{T_a}$) afin de contribuer au confort dans les pièces. On se base donc sur les 11 noeuds de température à l'échelle du bâtiment donnés par les relations de bilan thermique (4.3.5, p77). Ces variables sont :

- Les 4 températures de vitrage, $\overline{T_v}^{n,s,e,o}$
- Les 4 températures de façade et celle de toit, $\overline{T_f}^{n,s,e,o,t}$
- La température de bâti, $\overline{T_b}$
- La température d'air du bâtiment, $\overline{T_a}$

En représentation d'état, on note ces 10 noeuds comme variables d'état (X) et $\overline{T_a}$ comme sortie (Y). Les perturbations, W , sont la température de l'air extérieur (T_e), la température du sol (T_g) et les 5 densités de puissance solaire sur chacune des façades et toit. Enfin les variables de commande sont les transmittances directes et diffuses des stores sur chacune des façades vitrées et la puissance apportée par les radiateurs.

On note que la contribution des stores via leur transmittance est fonction de la densité de puissance solaire sur chaque façade donc il convient de prendre en compte cette non-linéarité pour écrire le modèle sous la forme suivante (4.3) :

$$\begin{aligned}\dot{X} &= AX + \underline{b}(W, U) \\ Y &= CX\end{aligned}$$

$$W = \begin{pmatrix} T_e \\ T_g \\ P_s^n \\ P_s^s \\ P_s^e \\ P_s^o \\ P_s^t \end{pmatrix}, \quad U = \begin{pmatrix} \overline{Tt^{sv} dif^n} \\ \overline{Tt^{sv} dif^s} \\ \overline{Tt^{sv} dif^e} \\ \overline{Tt^{sv} dif^o} \\ \overline{Tt^{sv} dir^n} \\ \overline{Tt^{sv} dir^s} \\ \overline{Tt^{sv} dir^e} \\ \overline{Tt^{sv} dir^o} \\ \Phi_{rad} \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Si on se centre que sur la commande des radiateurs, on peut estimer que les stores vont rester fixes lors du calcul de cette commande, ce qui permet de dissocier la fonction \underline{b} en 2 matrices B_w et B_u , respectivement dédiées à l'action des stores vénitiens et à celle des radiateurs. Par ailleurs, les transmittances étant considérées comme fixes, elles quittent le vecteur de commande pour simplifier l'expression comme suit (4.4) :

$$\begin{aligned}\dot{X} &= AX + B_w W + B_u U \quad \text{avec } U = \Phi_{rad} \\ Y &= CX\end{aligned} \quad (4.4)$$

La matrice A comporte deux blocs diagonaux pour les vitrages, d'une part, et les façades, de l'autre. Nous réduisons le modèle en regroupant les différents termes liés aux orientations cardinales. Nous obtenons ainsi un nouveau vecteur d'états (4.5).

$$X = \begin{pmatrix} \overline{T_a} \\ \overline{T_b} \\ \overline{T_f^n} \\ \vdots \\ \overline{T_f^t} \\ \overline{T_v^n} \\ \vdots \\ \overline{T_v^s} \end{pmatrix} \Rightarrow X = \begin{pmatrix} \overline{T_a} \\ \overline{T_b} \\ \frac{\sum_i (S_f^i \overline{T_f^i})}{S_f^i} \\ \frac{\sum_j (S_v^j \overline{T_v^j})}{S_v^j} \end{pmatrix} \quad \forall i = N, S, E, O, T \quad \forall j = N, S, E, O \quad (4.5)$$

$$Y = (1 \quad 0 \quad 0 \quad 0)$$

En calculant les coefficients de la matrice A qui s'appliquent sur les 4 nouvelles variables d'état, on remarque que les valeurs propres de celle-ci mettent en évidence 3 constantes de temps très différentes à partir de 13 minutes jusqu'à un peu moins d'un mois. Les variables d'état étant toutes des températures, en normant la matrice A par rapport à ses termes diagonaux (4.6), on met en évidence que les températures de l'air bâti, $\overline{T_a}$, et du bâti, $\overline{T_b}$, ont une influence négligeable sur les températures d'enveloppe des vitrages, $\overline{T_v}$, et des fenêtres, $\overline{T_f}$.

$$\begin{pmatrix} 1 & -0.32 & -0.16 & -0.34 \\ -0.66 & 1 & -0.19 & 0 \\ \boxed{-0.08} & \boxed{-0.04} & 1 & 0 \\ \boxed{-0.09} & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Ces températures d'enveloppe sont donc des variables exogènes qui s'expriment en fonction des perturbations. Ceci permet de réduire de nouveau notre modèle dès lors qu'elles intègrent le nouveau vecteur

de commande U' . On note X' le vecteur d'état réduit et A' , B' , respectivement les nouvelles matrices d'évolution et de commande (4.7).

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \dot{\bar{T}}_a \\ \dot{\bar{T}}_b \end{pmatrix}}_{\dot{X}} = \underbrace{\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}}_{A'X'} \underbrace{\begin{pmatrix} \bar{T}_a \\ \bar{T}_b \end{pmatrix}}_{X'} + \underbrace{\begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & b_{18} & a_{13} & a_{14} \\ b_{21} & \cdots & b_{28} & a_{23} & 0 \end{pmatrix}}_{B'U'} \underbrace{\begin{pmatrix} T_e \\ \vdots \\ \Phi_{rad} \\ \bar{T}_f \\ \bar{T}_v \end{pmatrix}}_{U'} \quad (4.7)$$

Désormais le modèle peut être écrit sous forme de fonction de transfert (avec s , la variable de Laplace) dont le dénominateur, $s^2 - (a_{11} + a_{22}).s + a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$, possède deux pôles réels négatifs. Les constantes de temps de $\tau_1 = 40 \text{ minutes}$ et de $\tau_2 = 29 \text{ jours}$ sont proches des pôles identifiés.

Commande type PI

Pour piloter ce système naturellement stable, nous pouvons opter pour un contrôleur de type Proportionnel Intégrale dont les gains proportionnel, K_p , et intégrale, K_i , permettent de régler la pulsation naturelle et l'amortissement du système en boucle fermée (4.8)[Arnal, 2013].

$$\begin{cases} \omega_0 &= \sqrt{\frac{a_{11}\tau_1}{b_{18}K_i}} \\ \xi &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{a_{11}\tau_1}{b_{18}K_i}} \left(\frac{K_p}{K_i} + \frac{a_{11}}{b_{18}K_i} \right) \end{cases} \quad (4.8)$$

Malgré l'aptitude de ce genre de correcteur pour contrôler la température du bâtiment, on note que celui-ci risque d'engendrer une consommation énergétique excessive car il n'intègre pas de connaissance sur les perturbations extérieures largement influentes sur le système. Or bien que pas totalement prévisibles, on peut anticiper l'évolution des conditions environnementales du bâtiment, ce qui nous incite à investiguer la commande prédictive.

Commande prédictive

Cette commande utilise la mesure de la variable comme un contrôleur PI, mais en plus intègre un modèle interne du système, un modèle de prédiction des perturbations (la puissance solaire, P_{sun} , et la température extérieure, T_{ext}) et un calculateur d'optimisation de commande. L'optimisation se fait en minimisant l'écart entre la température de l'air désirée et sa prédiction. On régule ainsi comme seule variable de sortie la température moyenne de l'air dans le bâtiment, \bar{T}_a , à partir de la température de départ du fluide caloporteur des radiateurs, T_{rad}^d (Fig.4.25).

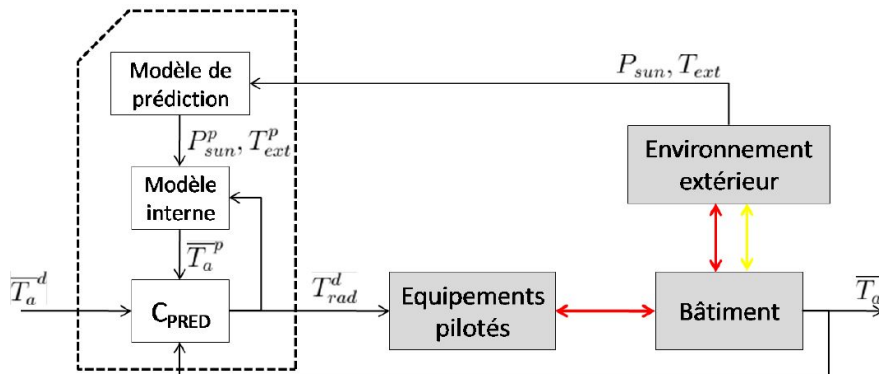


FIGURE 4.25 – Schéma bloc de la commande prédictive du chauffage central

Les réponses de la **température de l'air du bâtiment** soumis à un échelon de **température extérieure**, de **température de radiateur**, et de **puissance thermique solaire** ont révélé des relations du 1^{er} ordre pour les deux premiers, et une relation de type 1^{er} ordre additionné d'un intégrateur pour le 3^{ème}. Ces modèles sont utilisés au sein du modèle interne pour prédire la réponse du bâtiment face aux différentes sollicitations. Ils contribuent donc à ajuster la commande à appliquer afin que la valeur prédite de la sortie rejoigne celle de la trajectoire de référence au point de coïncidence. Au regard des fluctuations des conditions climatiques, l'horizon de prédiction (modèle interne et conditions extérieures), h , est fixé à environ 1 heure, ce qui s'approche de la constante de temps la plus longue du modèle interne du bâtiment.

$$J = \int_{t_0}^{t_0+h} (|\overline{T}_a^d(t) - \overline{T}_a(t)| + P_{conso}) dt \quad (4.9)$$

Un autre critère d'optimisation peut-être utilisé afin de minimiser la fonction de coût, J , qui intègre l'écart entre les sorties prédite et réelle, mais aussi la consommation d'énergie (4.9).

4.4.3 Contrôle au niveau de la pièce

L'objectif ici est de faire coopérer les luminaires, les stores et les radiateurs de sorte à satisfaire une ambiance confortable au sein de la pièce. Les commandes classiques découplent les aspects thermiques et optiques, et optent pour une commande proportionnelle classique des radiateurs par le biais d'une vanne thermostatique. L'efficacité énergétique d'une commande multi-critère sera comparée à celle-ci.

Le **confort dans la pièce** est régulé selon la **température opérative**, T_o , l'éclairement moyen, E_m , et la distribution spatiale de la lumière représentée par la **position d'une source équivalente** (abscisse horizontale), X_E .

Le vecteur de commande est composé des descentes et angles de lamelles des 2 stores, de la puissance des radiateurs et de l'apport optique des luminaires.

$$u^T = (d_{sv1} \quad \theta_{sv1} \quad d_{sv2} \quad \theta_{sv2} \quad \Phi_{rad} \quad \phi_{lum}) \quad (4.10)$$

L'espace de variation de ces grandeurs est borné par des contraintes physiques auxquelles nous pouvons ajouter une contrainte fonctionnelle qui vise à bannir tout rayon direct afin d'éviter les risques d'éblouissement. On retient dans ce cas, que tous les stores de vitrages insolés ont un angle de lamelles bridé comme défini par l'équation (4.11) (Fig.4.26).

$$\begin{cases} d_{vs1} = 1 \\ \gamma_s + \arcsin\left(\frac{E}{L \cdot \cos(\gamma_s)}\right) \leq \theta_{sv_i} \leq \theta_{max} \end{cases} \quad (4.11)$$

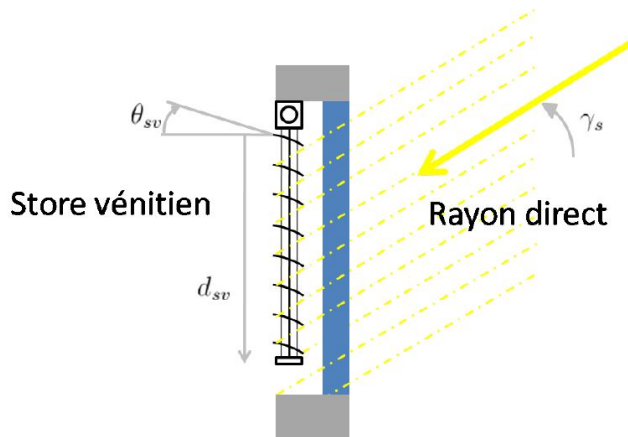


FIGURE 4.26 – Bannissement des rayons directs

On peut retenir une **fonction objectif** qui combine linéairement les objectifs thermique, optique et énergétique (4.12).

$$f(u) = \alpha_{th} \cdot f_{th}(u) + \alpha_{opt} \cdot f_{opt}(u) + \alpha_{ener} \cdot f_{ener}(u) \quad (4.12)$$

Pour être comparables, ces fonctions objectifs élémentaires doivent être normées.

Ainsi nous retenons pour la **fonction objectif thermique**, l'écart relatif de la température opérative moyenne de la pièce, T_0 , et de la température opérative de consigne, T_0^d (4.13).

$$f_{th} = \left| \frac{T_0(u) - T_0^d}{T_0^d} \right| \quad (4.13)$$

La température opérative est une composition des températures radiatives des vitrages, bâti et façade, et de la température de l'air. Le niveau d'ouverture des stores a la possibilité de modifier l'impact de la température radiative du vitrage en faisant écran à cette paroi froide en hiver en absence de soleil par exemple. Par ailleurs, en cas d'enseulement, le store joue le rôle de diffuseur thermique en chauffant directement l'air de la pièce. On voit ainsi que la contribution des stores prend de l'ampleur dans ce second cas, car l'état des stores impacte de façon notable la consommation énergétique de la pièce au point d'assurer un gain jusqu'à 30% (Fig.4.27).

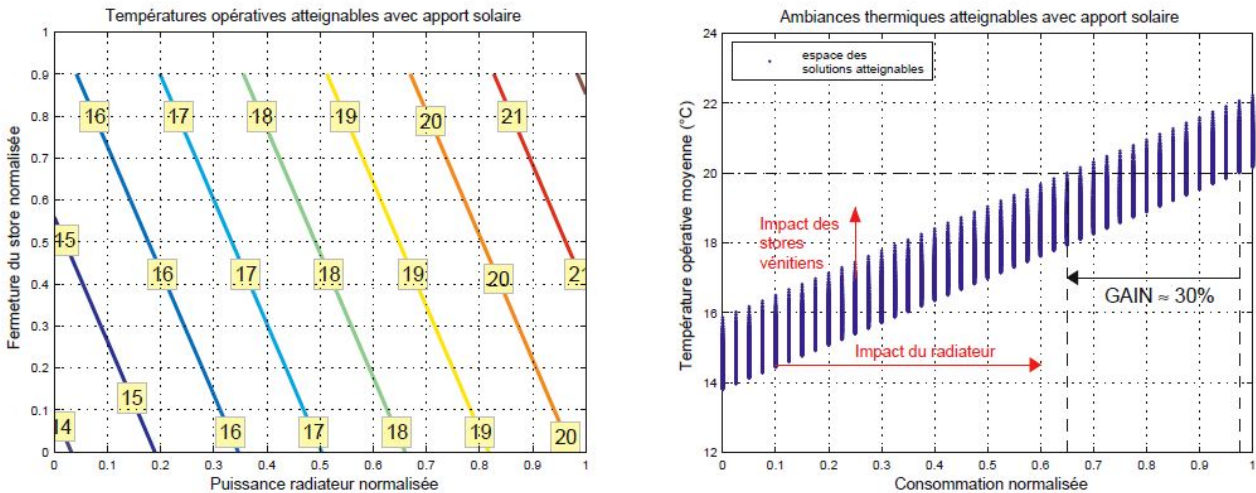


FIGURE 4.27 – Espace des ambiances thermiques accessibles dans une pièce insulée

La **fonction objectif de confort optique** agrège les grandeurs optiques liées à la quantité de lumière (E_m , l'éclairement moyen) et la position de la source équivalente ($\vec{X}\vec{E}$, position du barycentre lumineux). Ces deux grandeurs sont pilotables directement par les stores en prenant en compte leur position dans la pièce, l'angle des lamelles et le niveau de descente (ces deux derniers paramètres définissent les transmittances diffuse, $T_{o_{dif}}$ et directe, $T_{o_{dir}}$ abordées page 76). Ainsi nous notons la fonction objectif de confort optique comme étant une moyenne des écarts relatifs des 2 grandeurs par rapport à leur consigne (4.14).

$$f_{opt} = \frac{1}{2} \left(\left| \frac{E_m(u) - E_m^d}{E_m^d} \right| + \left\| \frac{\vec{X}\vec{E}(u) - \vec{X}\vec{E}^d}{l} \right\| \right) \quad (4.14)$$

Avec l , la longueur parallèle à la façade.

La **fonction objectif de consommation énergétique** vise à traduire la minimisation de la consommation des énergies telles que l'énergie stockée dans le fluide caloporteur, l'énergie des luminaires et l'énergie d'actionnement des stores vénitiens durant un laps de temps donné (4.15). Cette somme énergétique est normée par rapport à une valeur seuil de consommation maximale, E_{conso}^{max} .

$$f_{ener} = \left| \frac{E_{conso}}{E_{conso}^{max}} \right| \quad (4.15)$$

Bien que sans doute dérisoire par rapport à la consommation énergétique totale, la consommation des stores vénitiens est prise en compte de sorte à minimiser également l'occurrence de leur actionnements qui est une potentielle source d'inconfort.

4.5 Résultats de commande

A travers la simulation des 4 situations choisies préalablement (journées d'hiver et d'été avec ensoleillement varié), nous testons l'efficacité énergétique des commandes PID et prédictive au niveau du bâtiment. D'autre part, on évalue l'efficacité du contrôleur de pièce en termes de confort.

4.5.1 Commande thermique du bâtiment

La comparaison des deux modes de commande montre qu'annuellement on peut espérer les avantages de la commande prédictive sur un correcteur PI par un **gain énergétique de 22,8%**, un **gain sur l'erreur moyenne de suivi de 39,8 %** et un gain sur l'écart-type de l'erreur de **57,4%**.

Sur les journées caractéristiques (Tab.4.1), on note que la commande prédictive en hiver permet de satisfaire la consigne dès 8h du matin (avant 8h la température de consigne est libre avec 4° autour de 19°) alors qu'il faut attendre 9h10 pour le contrôleur PI. Par ailleurs, lors de ce transitoire en début de journée la commande des actionneurs est beaucoup plus lisse en la faveur de la commande prédictive. La fluctuation de température de chauffe est également plus réduite sur la journée (3° pour la commande prédictive et 9° pour le PI). Le contrôle est moins efficace pour l'été car le refroidissement via un modèle similaire au chauffage impose de la ventilation forcée pour augmenter les coefficients d'échange.

Avec le contrôleur PI, la consommation totale annuelle est de 221 $kWh/m^2/an$ contre 171 $kWh/m^2/an$ avec la commande prédictive. Ceci constitue 70 % du gain énergétique requis pour atteindre les 150 $kWh/m^2/an$ exigés par les Hautes Performances Énergétiques sans nécessiter de modifications de l'installation.

La contribution d'un thermostat d'ambiance dans la pièce est positive sur le suivi de consigne thermique mais ne garantit pas l'optimisation de la notion de confort qui se base sur la température opérative (moyenne et radiative) et non essentiellement sur la température de l'air.

On retient donc l'avantage de la commande prédictive de la chaudière qui apporte un gain énergétique d'environ 20% tout en améliorant les conditions d'usage des locaux en termes de température.

4.5.2 Contrôle du confort au sein des pièces

Le contrôle du confort se base sur les fonctions objectifs thermiques, optiques et énergétiques. Pour mettre en évidence les apports d'un contrôle couplé, on prend le cas d'une pièce donnant sur façade sud, donc soumis aux forts rayonnements solaires, et qui dispose de 2 stores vénitiens, d'un radiateur et de luminaires. En retenant les 4 journées type, on évalue l'aptitude des stores à moduler les apports thermiques et optiques, naturels et gratuits tout en réduisant l'énergie consommée.

La consigne thermique est de 21°C la journée (de 8h à 20h) tandis que la consigne optique fixe un éclairage moyen de 600 Lux centré dans la pièce pour cette même durée du jour.

Les profils de commande sont personnalisables et en retenant $\alpha_{th} = 0.3$, $\alpha_{opt} = 0.3$ et $\alpha_{ener} = 0.4$, on voit que la commande manage un compromis entre les différentes grandeurs de sorte à minimiser la fonction objectif globale selon les priorités et pondérations que l'on peut accorder à chacun des 3 critères (optique, thermique et énergétique).

Le tableau 4.2 montre une régulation satisfaisante de la température en hiver bien qu'une forte augmentation apparaisse dès la présence de rayons directs. Les stores bloquent ici les rayons lumineux cause d'éblouissement mais se comportent comme des diffuseurs thermiques. C'est également le cas en été où le niveau d'éclairage issu des stores est plus facilement régulé du fait de la hauteur plus

| | Contrôleur PI | Contrôleur Prédicatif |
|-----------------------|---------------|-----------------------|
| Cas 1 : Hiver nuageux | | |
| Cas 2 : Hiver soleil | | |
| Cas 3 : Été nuageux | | |
| Cas 4 : Été soleil | | |

TABLE 4.1 – Contrôle de la température du bâtiment durant 4 journées caractéristiques

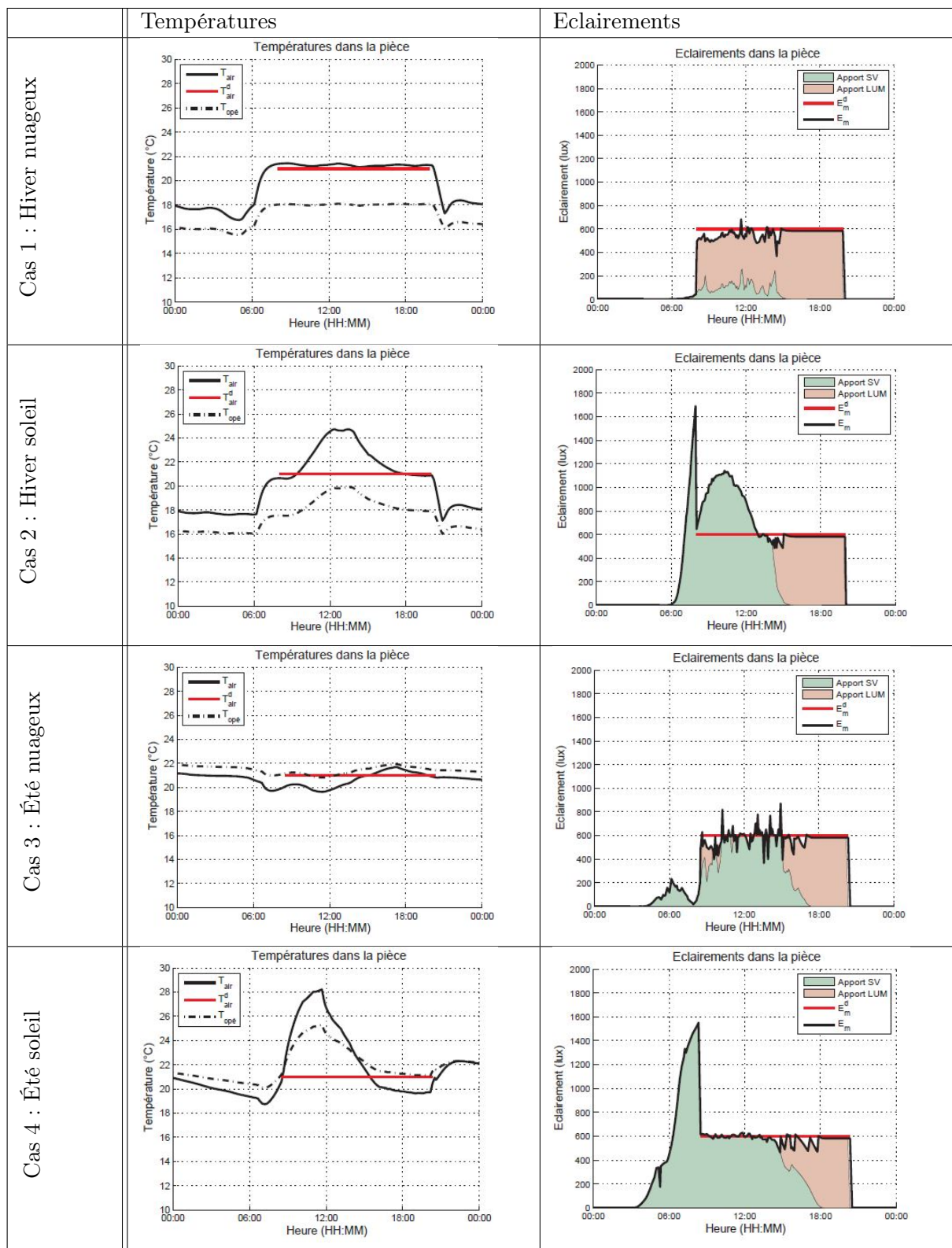


TABLE 4.2 – Contrôle des critères de confort dans une pièce Sud durant 4 journées caractéristiques

importante du soleil. Les fluctuations sur le niveau d'éclairage sont dues aux passages de nébulosités plus ou moins denses.

Les gains de la gestion du confort thermique par rapport au thermostat d'ambiance représentent près de 21% sur l'erreur moyenne et 40% sur l'écart-type de l'erreur. En ce qui concerne la gestion du confort optique par rapport au contrôle des luminaires (allumage automatique si la luminosité est inférieure à un seuil donné), les gains sont de 75% sur l'erreur moyenne et 65% sur l'écart-type de l'erreur.

Pour une pièce au Nord, les gains bien que moins importants du fait de l'absence de rayons directs, donc de contribution des stores optiquement et thermiquement, sont tout de même de 5% en thermique et de 53% sur le confort optique en écart-type de l'erreur.

On remarque l'intérêt du pilotage graduel des luminaires plutôt que Tout Ou Rien, mais on voit aussi que la fonction objectif énergétique privilégie l'apport lumineux solaire maîtrisé (sans éblouissement) à l'apport électrique. Les objectifs de confort et de consommation énergétique peuvent donc être compatibles et intégrés au sein d'une commande unique qui favorise l'exploitation du bâtiment tertiaire ancien sans même opérer de modifications structurelles de celui-ci.

La pondération des critères d'optimisation issus des 3 fonctions objectif permet d'envisager une personnalisation du contrôle du bâtiment selon son exploitation et sa configuration géographique.

4.6 Conclusions sur la gestion énergétique sous contrainte de confort

L'approche multidisciplinaire de ce travail en étudiant la perception humaine et les facteurs humains, les bâtiments, les phénomènes thermiques et optiques, et les évolutions climatiques permet à la mécatronique de jouer un rôle qui facilite l'évolution de l'humain dans son environnement au sein d'un bâtiment. C'est ainsi qu'en tenant compte du ressenti naturel des occupants, on propose une gestion de l'énergie qui se veut raisonnée (efficace et économe). **Les apports principaux de ce travail se situent au niveau de la modélisation du bâtiment d'un point de vue structurel, optique et thermique en prenant en compte très tôt les expériences utilisateurs (souvent distinctes de celles des concepteurs).** Le découpage systémique et l'approche *Bond Graph* sont au coeur de cette modélisation comportementale et de commande.

Pour faire suite aux travaux de thèse de Maximilien Leclercq sur l'objectivation du confort optique et la modélisation fine des actionneurs de type stores vénitiens, une commande hiérarchisée et découplée au niveau du bâtiment et des pièces a montré l'intérêt de la commande prédictive tant sur le plan énergétique que sur celui des satisfactions des contraintes utilisateurs.

Plusieurs limitations du travail présenté existent notamment par le fait que celui-ci, bien qu'utilisant des données réelles climatiques et architecturales au niveau du bâtiment, n'a pas été confronté à une expérimentation annuelle (plus d'une année serait même à envisager pour conclure sur l'efficacité des mesures proposées).

Néanmoins **cette étude montre que sans modification physique du bâtiment ancien (détecteur de présence, isolation renforcée, installation de brise rayons extérieurs ...), il est raisonnable et envisageable de proposer des modes de gestion et pilotage énergétique du bâtiment qui contribuent à satisfaire simultanément le confort des occupants et la réduction de consommation d'énergie.**

4.7 Communications produites sur le domaine

Journaux /revues

[Leclercq et al., 2011] Leclercq, M. and Arnal, E. and Anthierens, C. and Bideaux, E., *Control of visual conditions for open-plan offices*, *Mechatronics*, 2011, Vol.21, N°3.

Communications internationales

[Arnal et al., 2011a] Arnal, E., Anthierens, C., Bideaux, E. *Consideration of glare from daylight in the control of the luminous atmosphere in buildings, IEEE/ASME International Conference on Advance Intelligent Mechatronics*, Budapest, Hungary, 3-7 July, 2011, pp 1070-5.

Communications nationales

[Leclercq et al., 2009] Leclercq, M., Arnal, E., Anthierens, C., Bideaux, E. *Capteurs de confort visuel : Application aux bâtiments tertiaires. 7^{ème} Colloque CAPTEURS*, Bourges, France, 2009, 6p.

[Arnal et al., 2011b] Arnal, E., Anthierens, C., Bideaux, E. Contrôle de l'ambiance lumineuse d'une pièce. Application au pilotage de stores vénitiens. 4^{èmes} Journées Doctorales /Journées Nationales MACS, Marseille, France, 6-10 juin, 2011, 6 pages.

A l'issue de sa thèse Etienne Arnal a intégré en qualité d'ingénieur chargé de projet la société OPTIS à Toulon qui conçoit et programme des ateliers de rendus optiques pour les plus grands logiciels de CAO.

Chapitre 5

La conception mécatronique de systèmes marins



FIGURE 5.1 – Guide Sensoriel de Navigation pour kayakiste non-voyant

5.1 Introduction

Mes activités en robotique marine et sous-marine ont débuté bien avant les créations du laboratoire COSMER et de Seatech en concevant et pilotant de toutes pièces *Babysub (2008)* [Supméca and ISEN., 2008] et *MARIUS (2012)* [Anthierens et al., 2013], qui sont respectivement des mini ROV et robot voilier présentés au paragraphe 1.2.3 p13.

Cet intérêt pour les activités nautiques et la mécatronique s’est poursuivi en 2013 avec un nouveau projet qui a pour objectif la création d’un **Guide Sensoriel de Navigation** pour kayakistes à déficience visuelle. Ce projet porteur du fait de la participation de la Fédération Française de Canoë-Kayak, de l’EDF, du Club de Kayak du Pradet et de sa section handisport, a naturellement intégré l’axe de recherche en robotique du laboratoire COSMER dès sa création.

Plus récemment et pour compléter les recherches sur la cordée de robots sous-marins (thèse de Matheus Laranjeira - soutenue au laboratoire COSMER le 26 avril 2019), nous avons décidé de nous investir dans la gestion d’ombilical pour ROV en concevant notamment un enrouleur de câble actif officiant de façon intelligente entre un ROV et un USV (*Unmanned Surface Vehicle*). Cet axe est alimenté par les travaux d’un projet d’élèves ingénieurs de SEATECH de 2017 et par ceux de la thèse d’Ornella Tortorici (co-encadrée par Cédric Anthierens, sous la direction d’Hervé Barthélémy et de Vincent Hugel).

Ce chapitre présente tout d’abord la mécatronique interactive pour des applications nautiques à travers la conception du **Guide Sensoriel de Navigation**, puis la conception pour la robotique marine à travers la **gestion d’ombilical de ROV** et le pilotage distribué d’actionneurs.

5.2 Assistant de guidage pour personne à déficience visuelle

En adéquation avec la conception de systèmes mécatroniques en interaction avec l’humain, ce projet adresse une problématique de navigation navale et s’intègre bien dans les thématiques marines mises en avant par l’Université de Toulon et le laboratoire COSMER.

Dans le prolongement des études menées en réalité virtuelle et domotique présentées aux chapitres précédents, la création d’un Guide Sensoriel de Navigation (GSN) implique de concevoir un système d’instrumentation interfacé avec un utilisateur pour lui permettre de percevoir son environnement réel de façon virtuelle. Cette définition se rapproche des préoccupations de la réalité augmentée et associe, une fois encore, la conception de systèmes mécatroniques à la perception et l’interprétation humaines.

La problématique visée ici est de créer un système permettant aux kayakistes à déficience visuelle d’atteindre une certaine autonomie et un sentiment de liberté lors de sorties encadrées en mer. Le club de kayak du Pradet (CKP) offre la possibilité aux mal/non-voyants d’exercer leur activité nautique de façon régulière et en toute sécurité. L’ensemble des participants et encadrants a été moteur dans la partie expérimentale in-situ de ce projet.

Sans remplacer les encadrants, obligatoires pour toutes sorties avec un groupe de kayakistes mal-voyants, le GSN a pour objet de produire des informations individualisées à son porteur et de l’assister dans la progression de son parcours.

Depuis la conception jusqu’à la validation du système, les essais expérimentaux in-situ se sont multipliés et se sont avérés déterminants pour appréhender cette nouvelle problématique.

Au quotidien, bon nombre de personnes à déficience visuelle ne peuvent pas compter sur des assistants de guidage tel qu’un chien-guide, et leur quête d’autonomie pour dépasser le handicap les invitent à pratiquer des activités physiques au même titre que les personnes valides. La plupart du temps, elles sont assistées par des personnes valides qui les encadrent, comme c’est le cas pour le kayak de mer.

Lors d’une sortie en petit groupe, les encadrants guident oralement les participants avec des consignes de navigation très basiques (direction, allure). En cas de dispersion du groupe (il est prévu que les participants restent groupés), un signal sonore est adressé aux participants les plus éloignés. Ceux-ci ne savent pas forcément s’ils sont concernés par ce rappel et encore moins quelle est la consigne à suivre (faire demi-tour, changer de cap, rester sur place, ...). Outre l’inconfort de la situation (la sortie

en kayak de mer est initialement prévue à des fins de détente et d'activité de plein air en balade), la manoeuvre ne s'avère pas être très efficace.

Les systèmes d'assistance visant à accroître l'autonomie des personnes à déficience visuelle sont nombreux et se répartissent suivant 4 grandes catégories.

- Des systèmes de type cane blanche ou lunettes instrumentées avec des GPS, détecteurs à ultrasons, ou caméra pour renseigner le piéton sur la présence éventuelle d'obstacles dans son environnement proche [Yelamathi et al., 2014, Pradeep et al., 2010]. Ainsi l'utilisateur peut aménager sa trajectoire seul ou même de façon conseillée par le détecteur [Lee et al., 2014].
- Des guides pour piétons basés sur des cartes d'environnements intérieurs [Chaccour and Badr, 2015] ou extérieurs avec un repérage GPS possiblement couplé à des capteurs inertiels [Amanatiadis et al., 2010] et de reconnaissance sémantique de l'environnement (feu rouge, passage piéton, bâtiments, ...) [Seo et al., 2016]. Ces systèmes de navigation peuvent être associés à ceux d'évitement d'obstacles proches évoqués plus haut.
- Des retours sensoriels adaptés aux personnes à déficience visuelle en utilisant le toucher sans réduire la perception auditive qui est majeure dans le repérage de l'environnement en l'absence de la vue. Des systèmes vibro-tactiles tels que des ceintures [Cosgun et al., 2014], des vestes, des bracelets [Scheggi et al., 2014] ou encore des semelles [Velázquez et al., 2011] ont montré leur efficacité pour traduire une consigne de suivi de trajectoire pour les piétons ou la présence d'un obstacle.
- Des systèmes basés sur des smartphones de sorte à être le plus portables et le plus démocratisés possible [Tapu et al., 2014, Mocanu et al., 2015]. Ainsi ils exploitent les capacités de calcul et d'interfaçage de l'appareil sans ajouter autre chose que d'éventuels périphériques (podomètre par exemple).

Originalités de cette recherche

Sans remplacer ce que serait la vue pour la pratique du kayak, la système mécatronique GSN stimule de façon discrète les sens fonctionnels du pratiquant de sorte à pouvoir le guider le long d'un itinéraire prévu. Il relève le défi d'être **accepté et efficace pour les utilisateurs**.

Contrairement aux environnements urbains, l'absence de points de repère en eau libre implique la génération de carte et de repères avant toute navigation suivant un itinéraire préconçu.

Enfin de conception ajustable pour s'adapter à la sensibilité du sujet et à ses objectifs, le GSN s'adresse aux débutants et sportifs de haut niveau aussi bien voyants que non-voyants.

5.3 Besoins pour le kayakiste et spécifications du GSN

Comme peuvent le montrer les études précédentes, la majorité des systèmes d'aide à la mobilité des personnes à déficience visuelle se focalisent sur leurs déplacements quotidiens et plus rarement à ceux effectués lors de la pratique d'activités physiques ou sportives, bien que cela accroisse considérablement leur sentiment d'autonomie. C'est pourquoi s'intéresser à la pratique du kayak qui est en plein essor (introduit comme discipline handisport aux Jeux Olympiques 2016 de Rio) répond à une véritable attente tant en loisir qu'en compétition.

Ainsi la conception d'un guide de navigation à destination des kayakistes non-voyants s'adresse aussi bien aux débutants qu'aux personnes confirmées. Augmenter le sentiment de liberté et d'autonomie doit permettre aux pratiquants de pagayer librement à proximité du groupe dans le but de suivre un itinéraire défini sans réduire la sécurité de chacun.

Pour palier l'absence de perception visuelle, le Guide de Sensoriel de Navigation doit produire des informations :

- **précises** quant aux directions à suivre,
- **adéquates** en termes de rendu sensoriel (ne pas monopoliser l'ouïe) et de fréquence,

- **déterministes** en étant individualisées et adaptées à la progression de chacun.

Il a donc été retenu que le GSN équipe discrètement, et sans enfreindre leurs mouvements, les participants de sortie en kayak de mer en assurant leur **localisation** et leur **guidage** durant un parcours prédéfini. De telles sorties nécessitent l'édition du parcours et le chargement de celui-ci sur l'assistant de chaque kayakiste. Une fois en mer, les participants progressent en suivant les instructions de leur GSN tout en étant encadrés par des moniteurs prêts à intervenir si nécessaire. Toutes les informations de navigation durant la sortie sont enregistrées dans le guide pour être analysées hors ligne. Cela permet d'évaluer l'ergonomie du système mais également les performances ou progression sensorimotrices du pratiquant (anticipation des trajectoires, ou rejet de perturbations liées aux conditions climatiques notamment).

5.4 Conception mécatronique

Pour satisfaire ces fonctions, la partie opérative du GSN comporte 4 grandes parties, à savoir les cartes électroniques (carte mère et d'actionnement), les batteries, une interface de réglage (boite à boutons) et deux bracelets vibrants, qui sont des interfaces sensorielles adaptées aux rendus lors d'un mouvement de pagaie en kayak (Fig.5.2). En effet, les systèmes vibro-tactiles sous forme de ceinture comme le *FeelSpace*¹ par exemple ne sont pas souhaitables pour le kayak car l'abdomen est recouvert de textile et d'un gilet de sauvetage, et les muscles abdominaux sont en exercice permanent lors de la pratique.



FIGURE 5.2 – Boîtier étanche du GSN et bracelets vibrants.

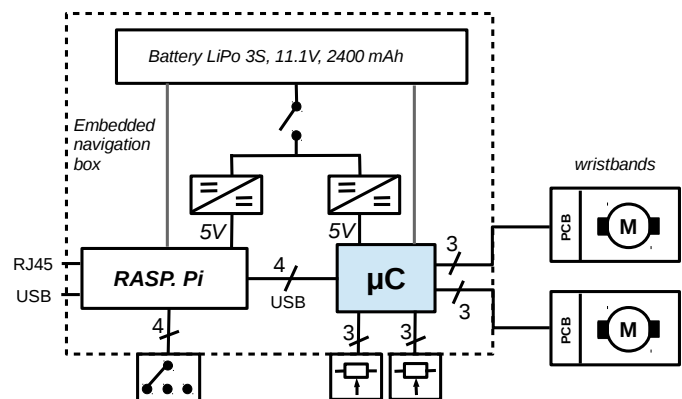


FIGURE 5.3 – Architecture électronique du GSN avec bracelets vibrants filaires.

La carte mère est une Raspberry PI sous Linux pour exécuter le middleware *ROS (Robot Operating System)* (Fig.5.3). La carte micro-contrôleur communique en UART avec la carte mère et a pour rôle de recueillir les informations issues du GPS et de piloter les bracelets vibrants sur demande via un signal de type PWM (*Pulse Width Modulation*). La boîte à boutons sert aux tests et aux réglages avant le départ pour ajuster l'amplitude des vibrations à l'utilisateur en fonction de sa sensibilité et de son habillement. Le boîtier est placé dans un compartiment étanche derrière l'hiloire tandis que les bracelets y sont reliés par fils en passant par le gilet du kayakiste.

Les bracelets conçus au laboratoire COSMER sont basés sur les boîtiers de montres classiques qui ont été équipés de moteur de vibration alimentés par carte à transistors. Les câbles des bracelets transportent tant l'alimentation que le signal PWM de commande.

Les batteries LiPo de 2400 mAh sous 11,1 V pour la carte micro-contrôleur et les bracelets, et un convertisseur abaisseur de tension sous 5 V pour la carte mère se sont avérées largement suffisantes pour assurer 2 heures de parcours sans craindre de défaillance d'autonomie. On sait naturellement que les algorithmes de guidage sont cruciaux en termes de consommation d'énergie de ce système embarqué

1. <http://www.feelspace.de/navibelt/>

du fait d'un nombre de corrections sensorielles très variable en fonction des réponses du kayakiste aux consignes de guidage.

5.5 Algorithmes de navigation

Les algorithmes de navigation étant à destination de l'humain, comme c'était le cas pour l'interface de marche en réalité virtuelle ou les commandes de variables thermiques et optiques en domotique, sont déterminants au niveau de l'acceptation du système mécatronique par l'utilisateur. La pertinence de l'information, la nature de son rendu et son adaptation à l'utilisateur sont à prendre en compte en premier lieu pour éviter tout rejet. Nous souhaitons donc laisser le kayakiste le plus libre possible sans lui imposer la réception de consigne quand cela n'est pas nécessaire. Il est important en conséquence de définir les caractéristiques du parcours permettant cela.

Description du parcours

Le parcours est défini sur une interface telle que Google EarthTM de sorte à lister les points de passage initiaux (*waypoints*) dans un fichier de type kml et tracer géométriquement l'itinéraire sur une carte. Par la suite, le programme du GSN exploite ce fichier pour créer un couloir de largeur choisie (20 m) (Fig.5.4) ainsi que des points de passage intermédiaires tous les 50 m. Ceci permet que chaque segment soit discrétisé spatialement de façon identique pour faciliter l'algorithme de guidage par la suite.

Les coordonnées GPS sont aplaties sur un plan tangent au globe au point de départ. Dès lors que les distances entre points de passage initiaux sont faibles, les incertitudes de direction et de coordonnées planaires peuvent être négligées.



FIGURE 5.4 – Parcours en triangle au Pradet

Données du GPS et de la boussole

La boussole, qu'elle soit intégrée à la carte micro-contrôleur ou rapportée comme composant indépendant, ne fournit pas d'information fiable permettant d'alimenter la navigation en temps réel. A défaut de cela, nous utilisons les données de position GPS dérivées pour produire un vecteur vitesse de l'embarcation mais surtout un cap. Le programme réalise ce calcul sur un historique de 3 secondes de sorte à produire au programme de guidage une position et un cap actualisés toutes les 4 secondes.

Algorithme de guidage

Rafraîchi toutes les 4 secondes, cet algorithme envoie au programme de gestion des bracelets vibrants un ordre de vibration et un angle de déviation du bateau par rapport à la direction à suivre

pour rejoindre le milieu du couloir (milieu des portes fictives décrivant le couloir - le point E sur la Fig.5.5).

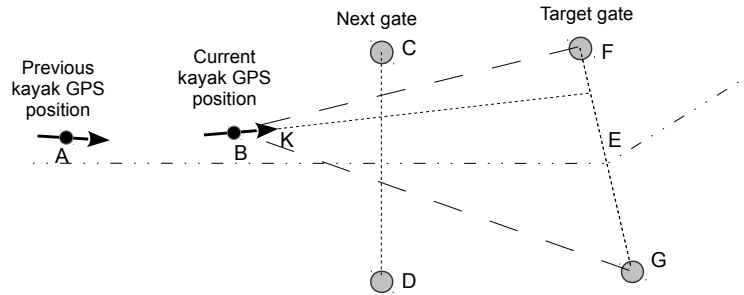


FIGURE 5.5 – Les positions GPS précédente et courante du kayak sont respectivement notées A et B . Les points C et D définissent la prochaine porte à franchir tandis que F et G définissent la porte visée (E , son milieu) pour la correction de cap.

L’algorithme de guidage regarde si A et B sont dans le même demi-plan défini par la droite (CD) . Il est autorisé de passer la porte par l’extérieur sans fermement forcer le kayakiste à la franchir correctement afin de favoriser le confort d’utilisation. Bien entendu, en cas de régates les exigences seraient bien différentes et l’édition du parcours également.

Un filtre fréquentiel passe bas (fréquence de coupure de 0,3 Hz) se charge de recalculer le cap actuel. Pour cela, il teste si les points position durant les 3 dernières secondes sont globalement alignés ou bien s’ils décrivent une trajectoire courbe imposant de retenir le vecteur tangent de sortie comme cap courant (vecteur \overrightarrow{BK} sur la Fig.5.5).

Une correction de cap, donc un envoi de message aux bracelets vibrants, est nécessaire si le vecteur \overrightarrow{BK} ne pointe pas vers le segment $[FG]$.

Gestion des bracelets vibrants

Le signe de l’angle de correction détermine le bracelet auquel l’ordre de vibration est donné. Après une correction de cap, si la direction du bateau vient à pointer vers le point milieu du segment visé (point E), une double vibration de confirmation est envoyée aux deux bracelets. En l’absence de correction de cap, les bracelets ne sont pas excités. Par ailleurs, les corrections n’ont pas lieu plus fréquemment que toutes les 4 secondes pour laisser le temps au kayakiste d’adapter sa trajectoire et ne pas risquer un rejet de l’interface.

Architecture logicielle

Programmée sous ROS (Fig.5.6), l’informatique embarquée du GSN est basée sur 4 noeuds pour collecter les informations des capteurs (mavros), décider des corrections selon l’évolution dans le parcours (navigation_guiding), assigner un ordre aux bracelets (vibration_manager) et générer un signal PWM en conséquence (pilot_kayak).

5.6 Essais de navigation en mer

Après une phase de tests élémentaires des différentes sous-parties du GSN à terre (suivi de trajectoire réalisé en vélo), le système a été expérimenté en kayak de mer au printemps et été 2016 au Pradet. Pour débiter, trois kayakistes expérimentés (deux voyants, un non-voyant) ont suivi grâce au GSN un parcours leur étant inconnu. Outre le parcours de forme triangulaire présenté précédemment (Fig.5.4), un second parcours plus long (3,2 km) en forme de B avec 6 virages a servi de parcours test (Fig.5.7).

Sur la figure 5.7 sont tracés les points de passage initiaux choisis sur l’éditeur de parcours (Google Earth TM) notés W_i ainsi que les portes fictives définissant le couloir et le tracé médian en trait continu

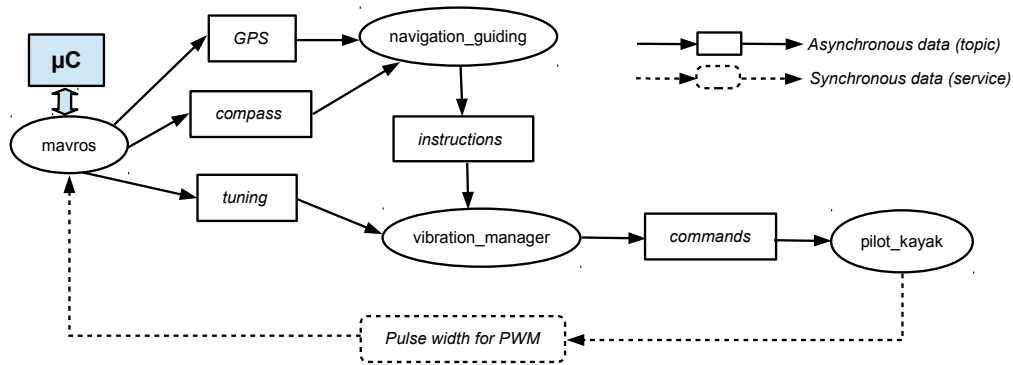


FIGURE 5.6 – Architecture logicielle sous ROS

rectiligne. Sur le tracé réel du kayakiste (plus sinuant) apparaissent des traits fins perpendiculaires à la trajectoire qui indiquent l'occurrence et le coté des consignes de correction de trajectoire émises par le GSN. Les traits symétriques de part et d'autre de la trajectoire représentent les confirmations de direction émises par le GSN suite à une demande de correction.

Aucune consigne de vitesse n'a été donnée pour réaliser le parcours et seul le kayakiste (bien que suivi par un moniteur à distance) a connaissance des retours du GSN qui représentent les uniques consignes pour tout le parcours. En fin de parcours, une triple vibration indique à l'utilisateur qu'il a accompli son tour.

On voit que les conditions de mer et de vent ne sont pas neutres dans l'aptitude du kayakiste à rester dans le couloir défini. Le 4^{ème} tronçon nécessite beaucoup de corrections de trajectoire alors qu'elles sont peu nombreuses sur d'autres tronçons bien plus longs. Le retour des pratiquants sur l'usage du GSN est positif bien qu'il faille apparemment multiplier les expériences de la sorte pour se sentir en confiance avec ce type de guidage inhabituel. L'ensemble des données sur les trajets et la collecte des réponses d'un questionnaire de satisfaction nous amène à évaluer qualitativement et quantitativement les performances du GSN.

5.7 Analyse des métriques de navigation

L'évaluation de la qualité de suivi de trajectoire par un kayakiste équipé du GSN prend en compte les aptitudes de l'humain, les incertitudes et imperfections du système de guidage, et les perturbations environnementales. Pour tenter de quantifier les apports du GSN en termes de guidage sur mer et d'amélioration du sentiment de liberté, nous avons étudié sur chaque tronçon :

- les temps de parcours,
- la distance parcourue à l'intérieur et à l'extérieur du couloir type,
- les dérives maximales hors couloir,
- la distribution statistique des consignes de correction des deux cotés,
- le pourcentage de temps sans demande de correction,
- la longueur d'onde des oscillations de trajectoire (godille),
- le taux de corrections demandées pour 10 m de parcours.

A l'issue de leur expérience, les 10 kayakistes voyants et 10 non-voyants ont témoigné d'un confort d'utilisation du GSN et d'un réel sentiment de liberté dans le fait de ne pas avoir à se soucier du parcours à suivre. Bien que 10% plus court que le trajet du kayakiste non-voyant, le parcours du kayakiste voyant a la même proportion de trajectoire dans le couloir (66%). En présence de houle défavorable, on constate que le kayakiste non-voyant est plus pénalisé et, ne se référant qu'au GSN, il a tendance à godiller davantage que le kayakiste voyant (longueur d'onde plus grande). La prise de repère visuel du kayakiste voyant lors des confirmations de direction l'aide à maintenir un cap surtout dans une zone perturbée. L'analyse des résultats, nous a amené à classer les participants non-voyants suivant

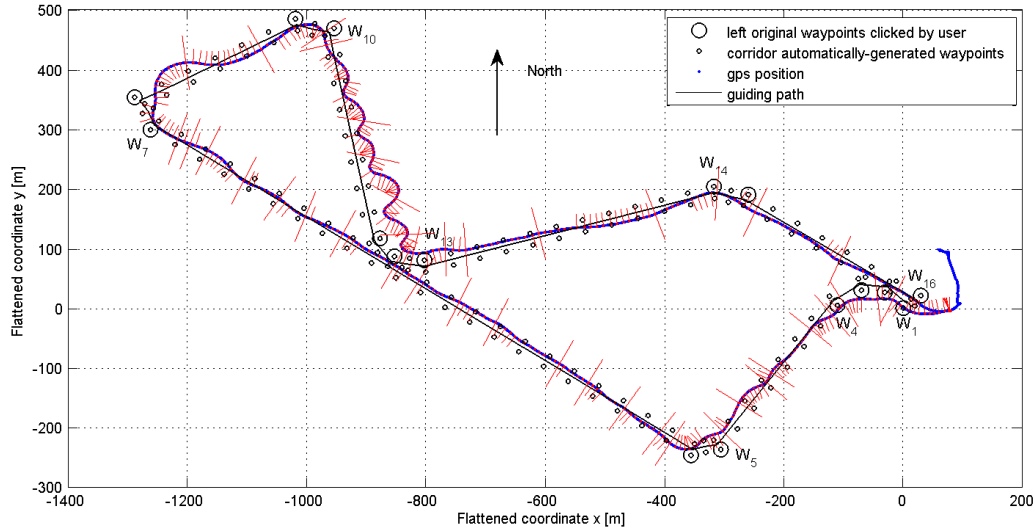


FIGURE 5.7 – Parcours test en forme de B

trois catégories selon leur facilité de pratique du kayak et leur rapidité de prise en main du système de guidage. Il est clair que celui-ci n'est pas intuitif pour quelques rares personnes tandis qu'il semble presque naturel pour d'autres. On constate que cela semble tenir de l'autonomie (désir d'autonomie) des sujets dans leur vie quotidienne et notamment de l'usage de leur nombreux périphériques d'aide de vie (cane blanche instrumentée, guidage par smartphone, communication dictée par ordinateur...).

Une enquête de satisfaction à destination des utilisateurs a complété cette étude pour évaluer l'utilité du système, la qualité de l'information, et la qualité de l'interface. L'ensemble des réponses est unanime de par un retour très positif et quelques pistes d'amélioration principalement sur la portabilité du système (avoir des bracelets sans fil et pouvoir éditer le parcours à souhait).

Un second questionnaire dédié aux moniteurs encadrants non-équipés de GSN a permis d'évaluer leur grande satisfaction de l'emploi du GSN, car ils n'ont plus qu'à suivre le groupe, profiter de la sortie toute en assurant une assistance si nécessaire (ce qui n'a jamais été le cas).

Enfin une dernière enquête à l'issue de chaque sortie a permis d'estimer l'emploi du GSN en terme de joie (ou tristesse) et d'excitation (ou passivité). Ceci quantifie la charge mentale associée à l'usage du système. Une fois encore, le retour est très positif car l'excitation et le plaisir sont élevés pour les kayakistes non-voyants qui souhaitent renouveler l'expérience à volonté, tandis que le stress est au plus bas pour les encadrants qui se sentent déchargés d'une pression quant à la responsabilité du guidage.

Conclusions sur le GSN

Les apports du système sont indéniables et ils montrent qu'ils répondent bien au besoin d'autonomie tant recherché par les personnes mal/non-voyantes lors de d'activités physiques et sportives. La conception mécatronique du GSN est basée sur l'analyse de ces besoins et sur les spécifications du système de navigation en mer pour kayakistes à déficience visuelle. Les retours positifs et critiques ainsi que l'engouement que suscite cette recherche nous poussent à la poursuivre en envisageant de

| | Stimuli | Environnement | Action humaine |
|----------------------------|----------|---------------|----------------|
| Interface de marche | Virtuels | Virtuel | Réelle |
| Domotique | Réels | Réel | Réelle |
| GSN | Virtuels | Réel | Réelle |

TABLE 5.1 – Applications des systèmes mécatroniques et leurs rendus

multiples pistes d'amélioration et de progression tant sur les aspects algorithmique, ergonomique que mécatronique.

Cette recherche apporte une nouvelle expérience en conception mécatronique pour l'interaction humaine. En effet, tandis que la conception de l'interface de marche pour la réalité virtuelle (Page 27) tentait de stimuler l'utilisateur virtuellement pour le voir évoluer le plus naturellement possible dans un environnement virtuel, les systèmes domotiques s'attachaient à stimuler au mieux la perception réelle de l'occupant pour accroître son confort en situation réelle (Page 49), le GSN, quant à lui, stimule virtuellement la perception de localisation et d'orientation de l'utilisateur pour le guider dans un environnement réel (Tab.5.1).

On note que l'interaction humaine est toujours réelle ce qui impose l'étude des modes de perception et d'action de l'utilisateur dès les premières phases de la conception mécatronique du système.

La mise en oeuvre du système d'exploitation *ROS (Robot Operating System)* pour la conception du GSN illustre un usage secondaire de ce *middleware* pour d'autres systèmes que les robots. Il sera très largement utilisé pour le reste des travaux sur la robotique sous-marine.

5.8 Gestion des ombilicaux de ROV

Le laboratoire COSMER étudie depuis 3 ans (thèse de Matheus Laranjeira) la cordée de robots sous-marins avec un intérêt particulier pour la génération de mouvement d'un robot suiveur selon un retour visuel de l'ombilical qui le relie au robot précédent. Les cordées sont intéressantes pour :

1. accroître les champs d'action des ROV,
2. conserver les avantages d'un câble de communication et d'approvisionnement énergétique,
3. paralléliser des tâches élémentaires telles que des mesures environnementales (salinité, Modèle Numérique de Terrain),
4. travailler en flottille à géométrie variable.

En parallèle, des travaux menés sur le repérage visuel et la génération de trajectoire d'une cordée de robots, nous avons développé en 2017 un enrouleur de câble actif instrumenté en vue de tirer profit d'une longueur de câble variable entre robots (sous-marin et/ou marin) ainsi que de l'apport de motricité généré par cet enrouleur. Ce projet prometteur a ouvert des perspectives en termes de commande, ce qui nous a incité à étudier de plus près la problématique de la gestion des ombilicaux des ROV à travers la thèse d'Ornella Tortorici.

Originalités de cette recherche

Souvent vu comme une contrainte à l'encontre des déplacements d'un ROV (trainée, tension) et comme cause potentielle de risques (noeuds, attache, frottement sur le sol), l'ombilical entre engins sous-marins ou marins peut-être aussi le sujet de fonctions intéressantes.

Outre ses fonctions primaires justifiant son usage, nous considérons qu'il peut servir de fil d'Ariane, être un moyen de repérage entre agents d'une cordée de robots [Laranjeira et al., 2017], participer au partage d'actions motrices, ou encore contribuer à la localisation du ROV par rapport à un engin de surface.

Pour tirer profit de ces potentiels avantages, nous envisageons de gérer l'ombilical en continu au cours de la mission de sorte à limiter les contraintes bridant la manoeuvrabilité du ROV, éviter l'occurrence d'incident et développer au mieux ces nouvelles fonctionnalités. Cela revient à fournir au ROV la juste longueur de câble à chaque instant de sa mission.

Nous avons décidé de créer un système d'inspection de zone côtière en eaux peu profondes et possiblement perturbées par des vagues ou courants. Celui-ci est composé d'un ROV de type *BlueRov 2* et d'un ombilical géré par un enrouleur de câble porté par un catamaran autonome (*Unmanned Surface Vehicle, USV*)(Fig.5.8). Ce bateau est en charge de centraliser les informations échangées avec le ROV, de faire le lien avec un opérateur à terre, et de convoier le ROV jusqu'à et depuis la zone à inspecter.

Les intérêts de ce système en 4 parties sont importants car il cumule la portée d'action, l'autonomie décisionnelle et énergétique, la facilité de mise en exploitation et le repérage global par GPS sur l'USV. L'élément central de notre système étant l'ombilical, il est normal de débiter par son étude d'un point de vue mécanique.

5.9 Modélisation mécanique de l'ombilical

Le choix d'un ombilical lors de la phase de conception d'un ROV répond souvent en premier lieu à des spécifications techniques issues du domaine de l'électronique (faible résistivité), de l'électrotechnique (champ magnétique et échauffement en étant enroulé), du traitement du signal (atténuation d'amplitude et bruit) et naturellement du coût. Par retour d'expérience, une fois conçu et livré, on peut constater des caractéristiques mécaniques peu favorables comme une raideur importante, un rayon de courbure minimal important, un amortissement voire une mémoire de forme suite à un enroulement par exemple, et même un aspect caoutchouteux de la gaine pouvant rendre le trancannage délicat.

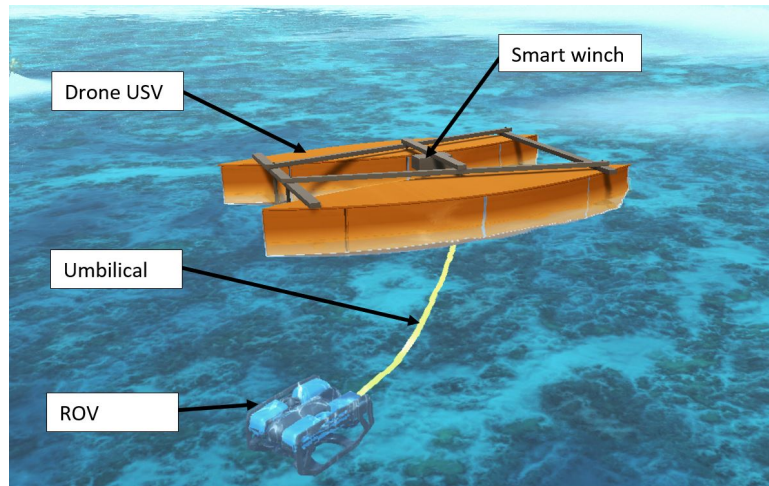


FIGURE 5.8 – Vue globale du système composé d’un ROV, d’un ombilical, d’un enrouleur et d’un USV

Des logiciels de simulation sont désormais disponibles sur le marché pour modéliser et tester virtuellement le comportement de solides souples comme les câbles en milieu sous-marin (Vortex, AGX, ...). Cette approche nous intéresse afin d’estimer les efforts que l’ombilical applique sur le ROV, ainsi que l’influence des perturbations environnementales. C’est pourquoi, nous avons porté notre étude dans un premier temps sur l’obtention des caractéristiques mécaniques d’ombilicaux réels.

Caractéristiques mécaniques de câbles

Le modèle mécanique que nous cherchons à renseigner concerne l’ombilical dans le cadre de fonctionnement tel que décrit plus haut, c’est à dire reliant le ROV et l’USV. Ainsi, le câble sera partiellement déroulé et enroulé par intermittence, totalement immergé, possiblement sous contrainte d’effort de traction mais aussi d’accroche ou de traînée (dans l’eau ou sur le relief sous-marin), à température et pression faiblement variables, car dans de faibles profondeurs.

Afin de caractériser la forme que peut prendre l’ombilical libre entre les 2 robots et les efforts qu’il applique sur eux, il est important d’identifier les paramètres suivants :

- la masse,
- le volume,
- la raideur de torsion,
- la raideur d’enroulement,
- la rémanence à l’enroulement.

Plusieurs protocoles expérimentaux ont été proposés pour quantifier ces différents paramètres (Fig.5.9 et 5.10).

Afin de confronter les valeurs obtenues à la réalité, nous avons créé un modèle de câble sous Matlab/Simulink en forme de solides finis qui exploite, au niveau des articulations, les paramètres identifiés expérimentalement. Réalisé hors de l’eau et en étant suspendu entre 2 points d’attache, on constate que le modèle produit une forme libre très proche de la réalité (confrontation réalisée par superposition de profils photo et de modèle simulé)(Fig.5.11).

Le simulateur simple ici (2D et 3D) permet d’obtenir les efforts au niveau des points d’attache selon la longueur de câble libre et la position relative des points extrémités. Néanmoins, le passage à un simulateur orienté métier produira sans doute des résultats plus pertinents en vue de construire diverses stratégies de commande.

Par ailleurs, la connaissance de la géométrie du câble est souvent très recherchée pour estimer la position courante sur ROV. Il existe plusieurs techniques d’instrumentation sur câble (systèmes à fibres optiques ou à centrales inertielles réparties sur la longueur), mais les mises en oeuvres et coûts sont clairement prohibitifs. De ce fait, la connaissance de la géométrie du câble (y compris de façon

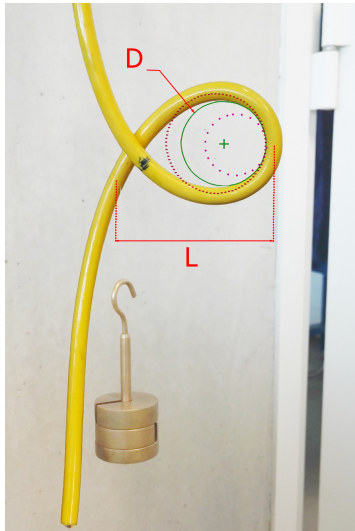


FIGURE 5.9 – Caractérisation de la raideur d'enroulement

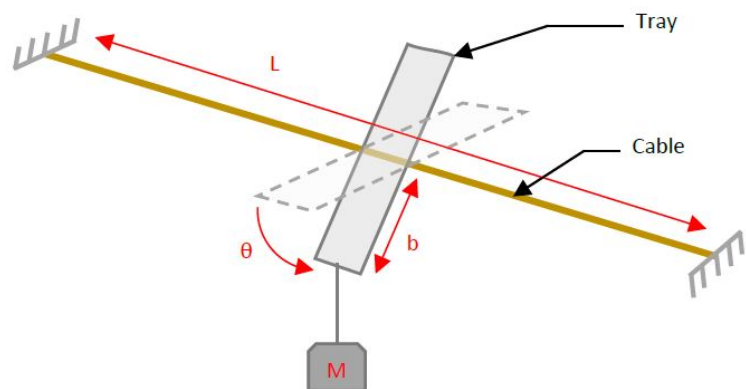


FIGURE 5.10 – Caractérisation de la raideur de torsion

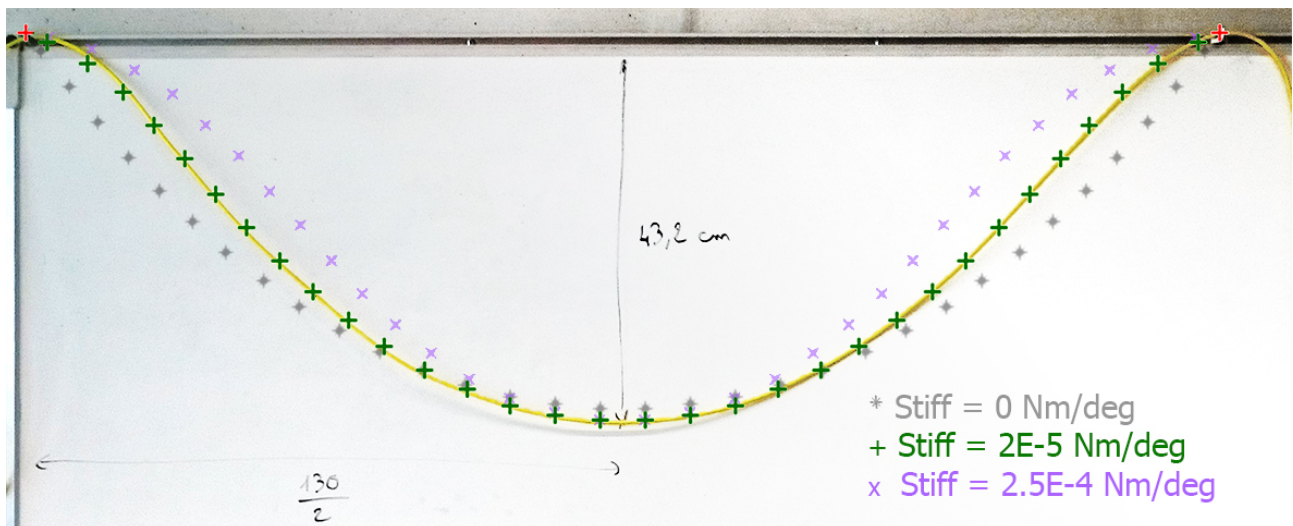


FIGURE 5.11 – Confrontation des profils réels et simulés selon la raideur d'enroulement.

intermittente lorsque le câble est presque tendu) est très intéressante. Les modèles que nous avons élaborés pourront être utiles notamment par détection des efforts aux extrémités. Ce sujet est encore en cours d'étude et sera abordé dans le prochain chapitre.

5.10 L'enrouleur de câble

L'enrouleur est un sous-système crucial qui doit apporter beaucoup de flexibilité au fonctionnement de la cordée en réduisant les contraintes dues au câble, en tirant profit des longueurs de câble variables et par le biais des actions motrices qu'il peut faire passer.

Une première preuve de concept a vu le jour en février 2017 (Fig.5.12). Ce système comporte un module de tension actionné par un moteur électrique et instrumenté par un codeur incrémental pour contrôler la longueur de câble libre. Monté sur un support équipé d'une jauge de déformation, il fournit une information en continu sur la tension du câble libre. Un module de tambour est également actionné par un moteur à courant continu intégré dans la bobine. Ce dernier est contrôlé en couple de sorte à maintenir une tension d'enroulement constante pour éviter les noeuds notamment. Enfin, un module de trancannage mis en mouvement par un servomoteur assure le déplacement latéral de la bobine pour ranger le câble sur cette dernière lors de l'enroulement.

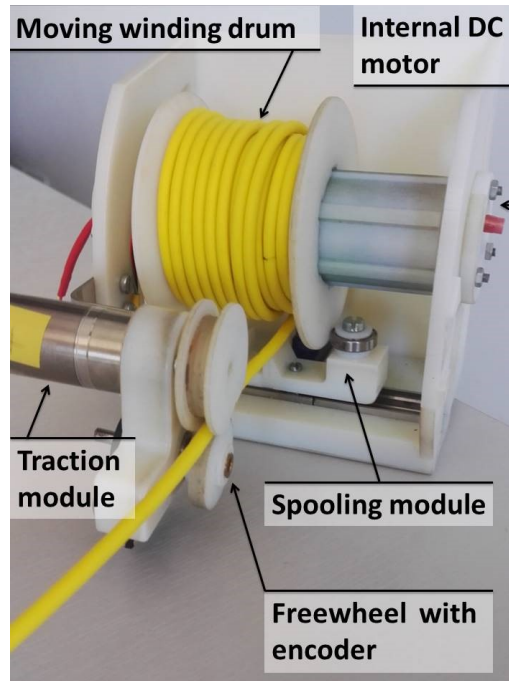


FIGURE 5.12 – Premier prototype d'enrouleur

Ce premier prototype initialement prévu pour être embarqué sur un ROV de type *BlueRov 2* (efforts de compacité importants) a permis de valider les 5 modes de fonctionnement qui lui étaient destinés. Ainsi l'enrouleur peut :

1. enrouler et trancanner rapidement une longueur souhaitée sous contrainte d'effort maximal,
2. dérouler rapidement une longueur souhaitée,
3. enrouler et trancanner régulièrement le trop de mou de câble,
4. libérer régulièrement du mou de câble selon sollicitation d'effort,
5. maintenir la longueur courante en s'opposant à tout effort de traction.

Ces modes de fonctionnement permettent d'envisager un large champs de possibilités en termes de distribution d'action visant à gérer l'ombilical selon les phases de mission (exploration, retour à l'USV, estimation de la position du ROV...).

Conclusions sur la gestion de l'ombilical

Bien que le développement des AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) soit un sujet d'étude très actuel, les missions opérées par des ROV ne manquent pas d'intérêt. En effet, pour les faibles profondeurs (et même pour les grandes pour le Victor 6000 par exemple) et dans la zone de surf par exemple, l'usage d'un ombilical permet d'entrevoir une plus grande sûreté de fonctionnement. C'est pourquoi nous constatons que la solution composée d'un ROV et d'un USV s'avère tout à fait pertinente.

Du fait de la proximité des fonds marins, de la légèreté des engins et des perturbations naturelles qu'impose cette zone de surf (vent et vagues en surface, courant en profondeur), il est important d'étudier le comportement de l'ombilical. Réduire les risques qui lui sont associés tout en tirant profit de son utilisation est une démarche originale qui a été saluée notamment lors du congrès IFAC CAMS où nos récents travaux ont été présentés en septembre 2019.

Plusieurs logiciels de simulation basés sur les éléments finis ou solides finis (tel VortexTM que nous utilisons) offrent la possibilité de simuler le comportement d'un câble sous l'eau, néanmoins ils ne peuvent produire un modèle de comportement orienté commande et nécessitent quoiqu'il en soit de connaître les caractéristiques physiques du câble concerné. Ceci confirme l'intérêt de l'évaluation des paramètres physiques d'un câble existant et de la validation de son comportement grâce à un modèle

mécanique édité sous Simulink qui prend en compte des paramètres nouveaux tels la rémanence à l'enroulement.

La maîtrise du comportement du câble sous l'eau en termes de classe de forme (spiralé, tendu, coulant, flottant, entre deux eaux, soumis à un courant...) et de l'effort au niveau du ROV est le point de départ de stratégie de gestion de celui-ci en fonction de la mission à réaliser. En effet, nous pourrions envisager actionner indépendamment l'enrouleur, les propulseurs de l'USV ou ceux du ROV pour agir sur la forme et le comportement du câble.

En parallèle des études sur l'ombilical, nous finalisons actuellement l'USV et continuons la conception marinisée de l'enrouleur embarqué sur l'USV afin de disposer du système complet pour faire des expérimentations et doter le laboratoire d'une plate-forme opérationnelle qui pourra soutenir d'autres travaux à venir.

5.11 Communications produites sur les domaines

Outre les nombreux rapports de projets étudiants (6 au total) qui ont été rédigés au cours du développement de ces 2 systèmes, la valorisation scientifique se résume pour l'heure à un article dans le journal **Field Robotics** pour le guide sensoriel de navigation et un article au congrès **CAMS IFAC 2019** pour la gestion de l'ombilical.

Journaux /revues

[Anthierens et al., 2018] Anthierens, C., Groux, D., Hugel, V. *Sensory navigation guide for visually impaired sea kayakers*, *Journal of Field Robotics*, 2018, Vol.35, N°5, pp 732-747.

Communications internationales

Tortorici, O., Anthierens, C., Barthelemy, H., Hugel, V. *Towards active self-management of umbilical linking ROV and USV for safer submarine missions*, *IFAC/CAMS Conference on Control Applications in Marine Systems, Robotics, and Vehicles*, Kaist, Korea, 18-20 September, 2019.

Chapitre 6

Perspectives de recherche

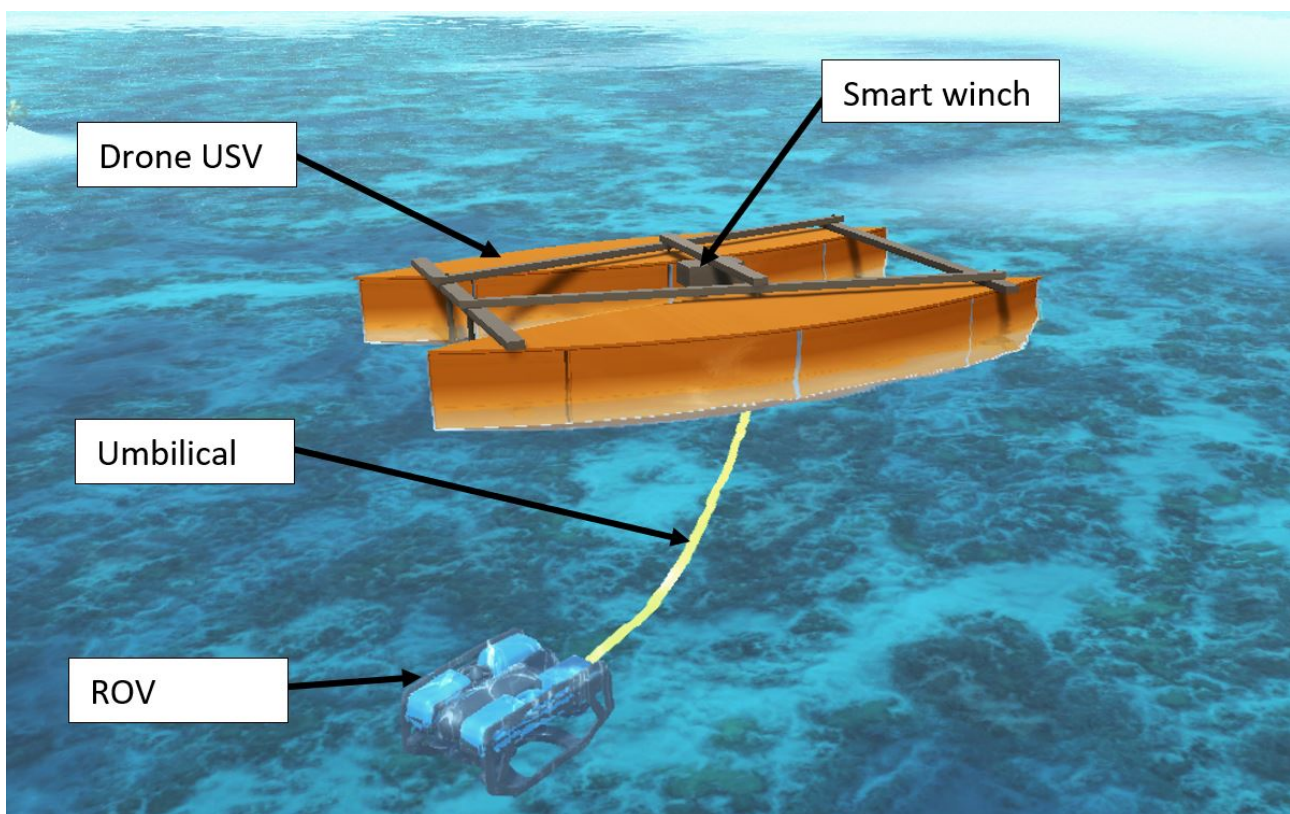


FIGURE 6.1 – Gestion de l'ombilical

6.1 En attendant le futur

L'ensemble de mon parcours en matière de recherche et d'enseignement depuis ma thèse a été très axé vers la conception de systèmes mécatroniques et le plus souvent en interaction avec l'humain. Les 3 grands thèmes détaillés précédemment ont ceci en commun qu'ils ont parmi leurs spécifications de conception l'adaptation (donc la compréhension) au comportement sensori-moteur de l'humain.

Fort de ces expériences, mon avenir en recherche s'oriente désormais vers la robotique sous-marine où la gestion automatique du câble apparaît comme une évidence pour faciliter le travail du pilote de ROV (souvent accompagné d'un scientifique pour l'étude du milieu marin). Les fonctions de gestion du câble et de localisation ont pour but d'accroître l'autonomie et la sûreté des missions.

Avant d'envisager des retours haptiques (comme abordés lors de la première étude décrite dans ce mémoire) ou de la réalité augmentée pour immerger le pilote virtuellement dans la scène, on note que l'ensemble USV / ROV / ombilical doit être doté d'instrumentation proprioceptive et extéroceptive à des fins de commande pour ce système mécatronique et d'aide à la génération de consigne. Un des objectifs in fine est de confier au pilote que les tâches de très au niveau en laissant le système gérer en majeure partie les missions.

C'est donc en continuant de travailler en **modélisation, conception simultanée, instrumentation et commande de systèmes** que je compte contribuer aux projets futurs au sein du laboratoire COSMER. Depuis sa création en 2014 alors fondé autour de 2 axes principaux (Eco-conception et Optimisation de Systèmes Mécaniques Durables d'un côté et Robotique Mobile Marine, Amphibie et Terrestre de l'autre), le laboratoire a bien progressé au gré de projets nouveaux et de son personnel évoluant (Fig.6.2). Extrêmement favorable à la richesse des échanges, j'apprécie de participer aux projets qui réunissent les compétences plurielles de notre laboratoire et au-delà. Ainsi même si mes efforts de recherche s'inscrivent principalement dans la robotique sous-marine (actuellement et pour quelques années encore dans la gestion de l'ombilical), je continue de participer à des projets où mes expériences passées (détaillées dans ce mémoire) restent une contribution d'intérêt.

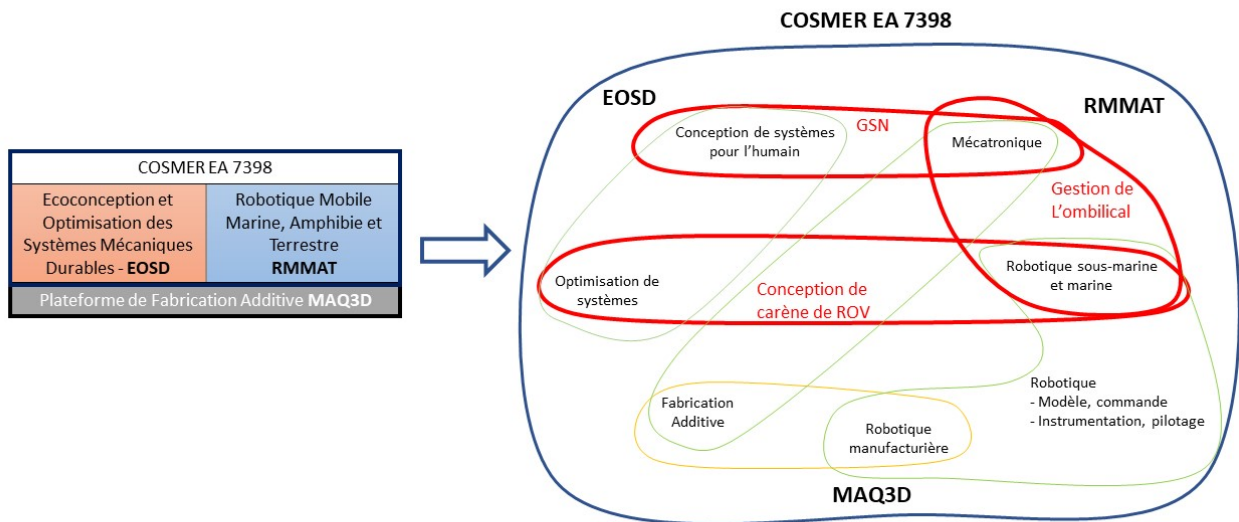


FIGURE 6.2 – Evolution du laboratoire

Ainsi en parallèle de la gestion des ombilicaux sous-marins, je participe à des projets dont le laboratoire a hérité, comme le GSN, ou des projets transversaux plus récents et en devenir, comme la conception de carène de ROV. Outre la diversité intellectuelle que cela procure, ces projets tendent à faire vivre le laboratoire et encourager le travail en équipe qui est crucial pour une petite structure (8 enseignants-chercheurs) comme la nôtre (complémentarité des compétences, taille critique comme

équipe projet, décloisonnement des sujets de recherche).

Ma mission d'enseignant-chercheur au sein de SEATECH m'offre l'opportunité d'encadrer de nombreux projets de 2^{ème} ou 3^{ème} année qui ont trait à mes activités de recherche. Ce partenariat gagnant-gagnant entre SEATECH et le COSMER (mutualisation de moyens, sujets actuels et innovants) est à pérenniser de toute évidence. Pour élargir ce passage de la recherche vers l'enseignement, nous avons créé en 2018 un parcours "Robotique et Objets Connectés" au sein du Master Ingénierie des Systèmes Complexes de l'Université de Toulon. Engagé dans les enseignements de ce parcours et en qualité de responsable de 2^{ème} année, j'encourage la diffusion des avancées issues de la recherche vers l'enseignement des étudiants. Le développement des activités de recherche du laboratoire tient aussi de l'implication des étudiants dans les projets qui leurs sont proposés. J'oeuvre régulièrement pour faciliter ce passage entre enseignement et recherche afin de dynamiser la vie du laboratoire tout en proposant des sujets d'étude ambitieux à nos étudiants.

L'université de Toulon et le laboratoire COSMER se sont investis dans la création d'un master international d'excellence en robotique marine et maritime intelligente (MIR) qui accueillera ses premiers étudiants à la rentrée 2020. Ce master s'adosse en grande partie à la formation dispensée par le parcours *Robotique et Objets Connectés* du Master *Ingénierie des Systèmes Complexes* dont je manage la seconde année de cursus. Il est monté en partenariat avec l'Université norvégienne des sciences et technologies (NTNU), l'Université espagnole Jaume I (UJI) ou l'Instituto Superior Técnico (IST) de l'Université de Lisbonne au Portugal.

Cette formation participe au développement du laboratoire COSMER et de ses projets partiellement présentés dans les axes de recherche de ce mémoire.

6.2 Futur à vue

6.2.1 Perspectives de recherche sur le GSN

Bien que très enthousiastes après avoir testé le GSN, les utilisateurs non-voyants n'en sont pas pour autant moins critiques et gourmands en termes de fonctionnalités. Le but de cette recherche n'est pas de développer un produit, mais de concevoir un système mécatronique à destination de l'humain tout en étant basé sur les aptitudes et sensibilités du pratiquant lors de l'utilisation d'un système jusqu'alors inexistant. Même si l'expression d'un besoin et la conceptualisation d'un cahier des charges relèvent du savoir-faire de l'ingénieur, il ne reste pas moins intéressant pour la recherche d'étudier le comportement **système/utilisateur**.

C'est dans ce cadre-là que nous souhaitons apporter quelques améliorations au GSN afin de mettre en avant l'apport de la mécatronique aux personnes à déficience visuelle, mais également la méthode de développement du dit-système.

6.2.2 Portabilité

Pour se voir proposer à tout utilisateur, qu'il soit voyant ou non, débutant ou expérimenté, le GSN doit être intégré au sein d'une solution portable facile à mettre en oeuvre. C'est pourquoi, nous travaillons actuellement sur le développement d'une application GSN qui fonctionnera sur smartphone avec *Android* TM et des montres ou bracelets connectés pour les retours tactiles (Moto 360). Le portage de la solution de guidage sur une cible Android nécessite des connaissances spécifiques qui ne sont pas le coeur du métier du laboratoire COSMER, c'est pourquoi pour cette phase est assez chronophage.

6.2.3 Retour sensoriel

Le retour vibro-tactile au niveau des poignets a été jugé confortable et efficace, car il n'altère pas la perception de l'environnement à travers les autres sens (essentiel pour les non-voyants). Cependant nous avons bien conscience au regard des analyses expérimentales que les utilisateurs ont des sensibilités et des réactivités très variables à la réception des mêmes stimuli. La question d'un retour sensoriel graduel est présente depuis le début de la conception du GSN et nous souhaitons désormais évaluer l'apport que celui-ci pourrait avoir sur la tenue de cap des utilisateurs.

En effet, s'il peut distinguer une consigne de modification de direction dans une courbe du parcours d'un simple maintien de cap, l'utilisateur saura que mieux adapter sa réaction. C'est d'ores et déjà ce que faisaient certains participants en anticipant l'aspect survireur de leur trajectoire en sortie de virage. L'humain s'est donc déjà adapté aux biais du système dès la seconde utilisation.

De même, dans le but d'apporter plus d'ergonomie, un signal lié à la progression dans le parcours sera intégré et ce, même malgré l'absence possible de consigne de correction de cap.

Ces fonctionnalités vont donner plus de richesses aux échanges entre le GSN et le kayakiste de sorte à augmenter la sémantique des messages échangés relatifs à la perception de l'environnement (localisation) et au guidage. De ce fait, l'algorithme de guidage et ses sorties peuvent être plus variées et graduelles.

6.2.4 Algorithme de guidage

L'algorithme de guidage est sans aucun doute le point sur lequel nous souhaitons progresser le plus. A la différence d'un déplacement dans un environnement construit et structuré (connu a priori ou non), il est plus délicat de suivre une route sur mer en intégrant les contraintes environnementales (zones dangereuses, bords avec vent de travers, présence de vagues, ...), géographiques (points de passage) et de fonctionnement (maintien d'un groupe plus ou moins dispersé sur la progression du parcours, mais également latéralement, éviter les collisions, assurer la sécurité).

Les zones à éviter sont jusqu'à maintenant bannies dès l'édition du parcours, mais il n'en reste pas moins qu'il faut anticiper toute dérive possible des participants. Les points de passage sont parcourus dès lors que le kayakiste franchit une porte fictive au large de la bouée (réelle ou fictive également). Cependant, l'algorithme de guidage autorise de passer cette porte (comme les autres) par l'extérieur, ce qui serait invalide en régate. Cette souplesse est accordée pour donner plus de flexibilité au guidage sans contraindre fermement le kayakiste jusqu'alors en sortie de loisir. On voit l'intérêt de cette flexibilité dans le suivi du parcours en couloir, mais cela devient plus dommageable au niveau des bouées de virement.

A l'image du kayakiste voyant qui prend la bouée de virement comme cap visuel (ne progressant pas ainsi en ligne droite au niveau de la projection de sa trajectoire sur le globe terrestre), il serait intéressant de guider le kayakiste non-voyant avec ce même objectif. Dans ce cas, on lui autorise à quitter le couloir de tolérance initialement défini dès lors qu'il maintient un **cap admissible**. Le cap ici ne peut pas être donné par la direction de l'étrave du bateau, car il ne prendrait pas en compte la dérive due au vent, vagues et courant. Pour cela, on souhaite peaufiner l'estimation de cap à partir des données GPS et de la centrale inertielle embarquée.

Par ailleurs, comme évoqué plus haut, prendre une bouée de virement comme amer de cap va nous faire croire que cette "ligne droite" représente le plus court des chemins (loxodromique). Or projeté sur le globe terrestre, la distance orthodromique est la plus courte. On peut donc envisager de guider le kayakiste (non-voyant et voyant si cela ne le perturbe pas trop) sur cet itinéraire le plus court. Comme en robotique, cela revient à faire du suivi de trajectoire (donc des corrections en continu) plutôt que du point-à-point (ce qui interdit de fait l'algorithme de suivi de cap évoqué précédemment).

La gestion des demandes de corrections suivant une tenue de cap ou un suivi de couloir, en plein segment (pas forcément rectiligne si **orthodromique**) ou en virement, en mode loisir ou régate nécessite donc encore largement de travailler sur le guidage à travers la conception d'algorithmes plus sophistiqués qui seront confrontés à l'expérimental.

Les campagnes d'essai menées avec des kayakistes non-voyants ont montré que certains savaient très bien s'adapter au mode de fonctionnement du GSN à mesure des sorties. D'autres en revanche, bien plus rares heureusement, peinent très lourdement pour exploiter le GSN car ils sur-correctent leur trajectoire à la réception de consignes issues des bracelets vibrants. Ceci provoque des godilles parfois même instables (augmentation des oscillations autour de la trajectoire visée). Par conséquent, nous allons rendre notre algorithme de guidage adaptable selon plusieurs paramètres (fréquence, discrétisation spatiale de la carte...) et analyser l'aptitude de l'utilisateur à tenir un cap. Les techniques d'**Intelligence Artificielle** nous aideront à modifier les comportements correcteurs du GSN à l'utilisateur pour lui rendre le trajet le plus agréable et sûr possible.

Enfin, lors des sorties de groupes, les participants équipés de GSN rappellent qu'ils aimeraient que ce guide leur permette d'**éviter les collisions**. Bon nombre d'études voient le jour sur l'évitement d'obstacles fixes ou mobiles en mer [Hagen et al., 2018]. Sans contraindre les participants en groupe à évoluer sous forme de flottille (suppression de l'individualisation de la trajectoire allant à l'encontre de la liberté de mouvement), nous pouvons envisager d'agir sur les consignes de trajectoire individuelle de sorte à éviter une collision entre deux bateaux instrumentés. Cette étude s'attachera à comparer les intérêts d'une commande centralisée ou déportée (individuelle) des agents qui ne sont pas des robots mais des humains (sans doute moins déterministes).

6.3 Perspectives de recherche sur la gestion de l'ombilical

Les perspectives sur la gestion de l'ombilical actif sont nombreuses et à plusieurs niveaux. Tout d'abord dans le cadre de la thèse d'Ornella Tortorici (soutenance prévue en décembre 2020) qui a débuté ce projet ambitieux, nous nous focalisons sur :

- les modèles mécaniques de câbles,
- les simulateurs permettant d'étudier les comportements sous-marins des câbles (géométrie, efforts aux extrémités),
- la conception d'un système de mesure d'effort entre l'ombilical et le ROV,
- la mise en oeuvre de commandes de mobilité intégrant ces efforts.

Un article au congrès IFAC CAMS 2019 a d'ores et déjà valorisé les deux premiers points, tandis qu'un article de revue est envisagé (Journal of Field Robotics par exemple) pour revendiquer l'ensemble de l'étude.

En parallèle de cela, nous avons depuis avancé sur l'emploi du logiciel Vortex pour simuler la dynamique du système complet (USV, câble, ROV) en environnement marin avec vagues et courant. Ceci dans le but de caractériser les stratégies les plus pertinentes pour satisfaire une mission donnée en fonction notamment des conditions de mer.

Par ailleurs, la fabrication de l'USV est toujours en cours d'achèvement. Sans révolutionner le monde des USV, ce catamaran aura la particularité d'être adapté et adaptable aux expérimentations que l'on souhaite mener. En effet, il peut accueillir un enrouleur de câble instrumenté ainsi qu'une station de docking pour le ROV. Son instrumentation embarquée fournira les solutions nécessaires pour communiquer jusqu'à terre, se repérer sur mer, mais il disposera également de capteurs inertiels permettant l'identification des conditions de mer (influant sur les stratégies de pilotage). Le choix de développer une solution complète d'USV en interne plutôt que se tourner vers une solution sur étagère est motivé par le moindre coût (nos moyens sont bien plus modestes que ceux de plusieurs autres universités européennes), la maîtrise des technologies employées, la capitalisation du savoir favorable à l'expérience du laboratoire et des étudiants, et la compatibilité avec les autres technologies mises en oeuvre au laboratoire et sur ce système (électronique à base de *Raspberry Pi*, ROS, ...).

Il en est de même pour l'enrouleur actif.

6.3.1 Conception de l'USV

L'USV a pour rôle d'être une base mobile suivant le ROV durant sa mission d'exploration. La mobilité de cette embarcation autonome détermine la motricité globale de l'ensemble. En effet, ses degrés de liberté, sa dynamique et sa tenue à la mer sont des paramètres influents pour la consommation énergétique globale du système, la finesse de pilotage face à un environnement plus ou moins perturbé.

Pour plus de robustesse, il a été choisi de concevoir l'USV sous forme d'un catamaran mû par deux propulseurs. Cette structure très stable ne doit pas craindre quelconque retournement. On imagine également que les missions d'exploration côtière ne soient pas assurées lorsque la mer est trop formée.

Outre le gain en stabilité de navigation, on attend également de l'USV qu'il puisse faire face aux vagues et aux courants. Muni d'une centrale inertielle intégrée, l'USV va fournir des mesures sur l'état de la mer en surface. En effet, en laissant l'USV dériver quelques temps, on va obtenir des informations

sur le vent (battage) ou l'influence des vagues. On pourra ainsi distinguer les facteurs de dérive qui vous nous guider quant au choix des algorithmes de commande sur le suivi de trajectoire ou sur la génération de consigne (placer l'USV sous ou sur le vent selon les déplacements requis en surface).

De plus, les oscillations subies en surface par l'USV peuvent nous renseigner sur la présence de houle relativement fréquente en méditerranée. Suite à plusieurs jours de vent, il est habituel d'avoir une mer houleuse sans la présence de vent sur l'instant. Dans ce cas, on sait selon la nature du relief sous-marin qu'il est possible d'être en présence de courants sous-marins qui viendront perturber les déplacements du ROV à certaines profondeurs. Des modèles bien connus sont à même d'évaluer les mouvements d'eau qui tendent à faire faseiller / osciller des solides souples comme des câbles. Sans obtenir d'information évaluée très déterministe, la détection de présence de houle va nous permettre d'adopter des modes de pilotage du ROV plus ou moins robustes selon les exigences de la mission en cours.

Par ailleurs, on n'oublie pas que l'USV a pour mission également de porter l'enrouleur d'ombilical à partir duquel nous devons au mieux répondre aux besoins de distribution sur demande de longueur de câble, de gestion de la tension et aussi de localisation. Cela sous-entend que l'enrouleur doit pouvoir trouver place sur la structure de l'USV à un endroit non-central longitudinalement (contre tout a priori de conception). Ceci afin qu'en cas de tension importante du câble, souhaitée ou non, l'USV, sans être piloté en direction, s'aligne dans le plan formé par l'ombilical. Le ROV fonctionnerait alors comme une ancre et naturellement l'étrave de l'USV indiquera la direction azimutale de l'ombilical. Ce fonctionnement d'ancre et de mouvement de trainée délibérée pourra s'opérer à plusieurs moments de la mission pour localiser le ROV par exemple ou détecter des courants sous-marins une fois le ROV mis en dérive.

Enfin, pour se rendre sur la zone d'exploration ou la quitter, on souhaite que le ROV soit en mesure de s'accrocher (*docking*) sur l'USV par l'intermédiaire d'un panier ad hoc. Outre cette simple fonctionnalité, ceci impose de se pencher sur le pilotage du ROV en mode d'appontage en étant filoguidé dans un environnement soumis aux mouvements parasites créés par les vagues.

En parallèle de la conception d'un USV sous forme de catamaran, nous avons le projet d'exploiter de nouveau MARIUS, le robot voilier, en qualité d'engin de surface autonome. Pour se faire, je manage un partenariat avec l'association de Seatech HydroSharks qui a pour objectif de participer à divers concours de drones marins. Dans le passé, la compétition choisie (Hydro Contest), à l'image de SAUC-E (*Student AUv Challenge Europe*), concernait les embarcations téléopérées mues par hydro-générateurs. Désormais, le sujet est celui des robots voiliers dans le but de traverser l'Atlantique. Bien que très ambitieux, ce projet nous invite à reconcevoir MARIUS pour ces nouveaux objectifs. Le laboratoire COSMER va soutenir cette initiative et apporter son expérience dans ce projet pour améliorer la maintenabilité et flexibilité d'usage du bateau. Ce dernier devrait donc hériter d'une architecture informatique embarquée proche de celles retenues pour les projets USV catamaran, GSN kayak et ROV.

Initialement prévu pour naviguer jusqu'en Corse, d'autres parties de MARIUS vont être renforcées et améliorées. La synergie avec le groupe d'étudiants volontaires (issus de différents parcours de Seatech et différentes années d'étude) a pour but de leur transmettre notre expérience afin qu'une version de robot voilier 100% nouvelle soit produite par HydroSharks. Le COSMER a intérêt également d'encourager et soutenir ce genre d'initiative pour faire rayonner l'Université de Toulon, Seatech et le laboratoire en lui-même.

Malgré les 6 ans d'inactivité sur les robots voiliers et les travaux de recherche qui n'ont cessé de progresser sur le sujet en France et à l'étranger, on n'exclut pas l'idée d'intégrer de nouveau ce thème dans nos axes de recherche prioritaires dans un avenir à moyen terme.

La problématique du robot voilier, et de l'USV au sens large, rejoint celle, très ambitieuse, des robots amphibies abordés page 115.

6.3.2 Enrouleur actif

L'enrouleur actif d'ombilical joue un rôle crucial pour satisfaire les différentes fonctions visées que nous avons listées en amont. Son intégration sur l'USV à proximité de la proue est prévue sur une liaison pivot instrumentée d'axe vertical bornée à $\pm 70^\circ$ autour de l'axe d'étrave. Cette instrumentation permet d'avoir une information sur la direction azimutale du câble et dès lors que celui-ci est tendu ou semi-tendu (décrit une forme connue dans un même plan), on peut estimer la position du ROV par intervalles. On envisage d'utiliser pour cela des méthodes ensemblistes pour produire une estimation de la position courante.

L'obtention de la configuration tendu ou semi-tendue se fait par l'actionnement de l'enrouleur et/ou de l'USV et/ou du ROV ce qui laisse un large choix d'action selon le déroulé ou la nature de la mission.

Le retour d'information sur la tension du câble se fait par le biais de capteurs placés sur un tronçon compliant de l'ombilical à proximité du ROV. Les capteurs de courbure, d'orientation et inertiels solidaires du câble fournissent une image de la tension par mesure de déplacement. Le ROV récolte en continu ces signaux pour adapter ses consignes de mouvement (commande compliant) et les transmet en surface pour moduler l'action de l'enrouleur de sorte à délivrer la longueur de câble juste nécessaire.

Cet ensemble enrouleur / capteur de tension est au coeur d'un axe de recherche liés à la gestion des ombilicaux en lac, mer mais également dans le cas d'exploration de grottes sous-marines (avec moins de flexibilité, l'enrouleur de câble se retrouve embarqué sur le ROV et doit faire face à d'importants risques d'accrochage et de forces de friction).

6.3.3 Modèles de mission

La robotique embarquée est souvent bridée par son autonomie. Qu'elle soit décisionnelle pour faire face à des imprévus environnementaux ou énergétiques par limite d'emport, la plupart de ces algorithmes de commande intègre cette préoccupation.

Le recours au simulateur de type *Gazebo* ou *Vortex* va pouvoir nous représenter virtuellement les comportements de nos systèmes sous certaines hypothèses fortes, mais il est toujours délicat d'estimer l'autonomie énergétique dont dispose un robot sans savoir précisément les aléas auxquels il sera confronté et comment il saura les surmonter (ou non!).

Dans le cas du pilotage de notre système USV / enrouleur / ROV, on peut néanmoins adopter différentes stratégies pour balayer une zone d'exploration sous contraintes (de temps, de discrétisation spatiale, de coût,...). Ainsi en fonction des conditions environnementales (présence de vague, vent, courant), on pourra choisir de demander à l'USV de se positionner à l'épicentre de la zone à explorer pendant toute la mission (moins de mouvement requis), ou de lui faire suivre le ROV avec un ombilical au plus court (moins de trainée), ou de lui proposer de trainer le ROV qui s'asservira en profondeur et mouvement latéral, etc.

Un des critères de choix de ces diverses stratégies peut être l'économie d'énergie sachant que le ROV et l'USV peuvent avoir des ressources indépendantes ou mutualisées. On se propose donc dans un premier temps de réaliser des modèles énergétiques macroscopiques des 3 ressources actionnées et du comportement physique (avec un point de vue énergétique) du câble dans l'eau.

Pour une mission donnée (balayage ou suivi de trajectoire), on devrait alors pouvoir choisir, parmi les différentes stratégies, celle qui est la moins énergivore suivant des critères de performance retenus (temps, coût, précision, ...).

Cette partie de l'étude en est au stade de la modélisation et d'étude de faisabilité en termes de simulation sans avoir recours à des logiciels métier très complexes.

6.4 Les robots amphibies

Le laboratoire s'est inscrit dans la robotique marine et sous-marine en faible profondeur et à proximité du littoral. De ce fait, nous étudions le comportement des engins en zone perturbée par les vagues

et courants, et où les fonds marins présentent souvent d'importantes variations de relief. Un des intérêts majeurs des cordées de robots est d'accroître la portée des ROV d'exploration de petite taille et notamment d'atteindre la plage depuis un bâtiment de surface situé à 1 km du rivage. La sécurisation d'un chenal peut-être une des missions pour ce genre de solution.

Au-delà de la navigation et du repérage dans cette zone marine possiblement à risque et perturbée, il serait même intéressant d'accéder et d'évoluer sur terre / la plage. Les fins militaires ne sont pas les seules motivations car l'Institut Méditerranéen d'Océanologie a prononcé le besoin d'avoir un robot qui peut se déplacer et aussi rester surplace en zone de surf (dans les vagues) pour faire des mesures fiables d'érosion sur du long terme. Donc sans complètement franchir le dioptré, ce genre de solution doit pouvoir naviguer entre deux eaux et également évoluer sur les fonds marins. Des problématiques de commandes de trajectoire, de dynamique, de conception optimisée, de repérage, d'autonomie, de robustesse notamment sont bien évidemment au coeur des préoccupations de conception mécatronique.

Il ne fait pas de doute que les modes locomotion amphibie vont être explorés activement dans les prochaines années au sein du laboratoire COSMER. Les solutions développées jusqu'à maintenant sont riches d'expérience pour envisager des robots modulaires, reconfigurables et collaborant pour tenter de répondre au mieux à ces défis technologiques et scientifiques.

Dans ce contexte d'évolution entre mer et plage, il est fort possible que certaines décisions soient encore prises par un pilote tandis que d'autres incomberont au robot en toute autonomie. Par conséquent, les problématiques sur lesquelles nous travaillons présentement (gestion des liens, localisation, répartition des actions motrices...) seront toujours d'actualité sur des systèmes encore plus complexes. Pour affirmer cet axe, j'ai récemment déposé une demande d'investissement pour 2020 auprès de l'Université de Toulon et de Toulon Provence Méditerranée pour équiper le bassin à houle présent au bâtiment X de l'Université (Seatech) d'un rail de traction instrumenté par un capteur d'effort 6 composantes afin d'étudier les caractéristiques hydrodynamiques des ROV, carènes et autres équipements proches de l'humain tels que les palmes ou bouteilles d'oxygène.

Il est très motivant d'imaginer travailler sur ce genre de projet où la conception mécatronique et la robotique sont centrales.

6.5 Conclusions sur ces perspectives

D'un point de vue **thématique**, en projection et sans absolue certitude, il est raisonnable de penser que mes travaux de recherche pour les 5 à 10 années à venir continueront à se placer dans le domaine de la conception mécatronique avec un regard particulier pour l'instrumentation et la relation entre l'humain et le système. Les thèmes devraient évoluer peu à peu vers la robotique amphibie qui se positionne aux côtés des problématiques des flottilles de ROV et de la hiérarchie décisionnelle entre le robot et l'opérateur (Fig.6.3).

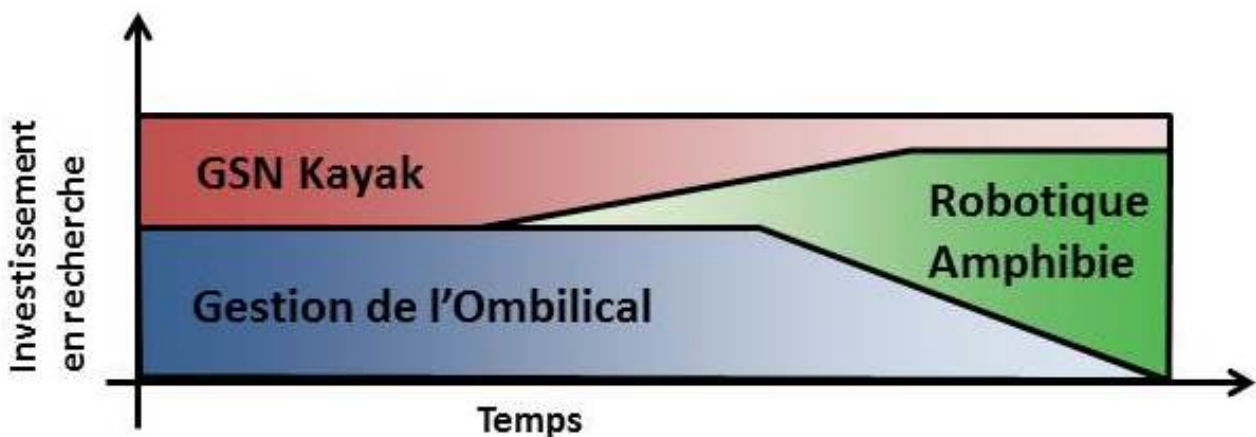


FIGURE 6.3 – Implication dans les thèmes de recherche sur les 5 prochaines années

Jusqu'à aujourd'hui, l'**animation des projets de recherche** s'appuie beaucoup sur des projets

étudiants et on va continuer de la sorte car c'est gagnant-gagnant pour le laboratoire et l'école depuis toujours. Il est par ailleurs appréciable que cette idée soit communément partagée par les directions de ces différentes entités issues d'une même université qui a besoin de cohérence de travail pour affirmer ses forces propres (intérêts d'une structure de taille raisonnable ouverte à la collaboration avec les autres universités nationales et internationales).

Le travail au sein du laboratoire se base sur des projets complémentaires qui convergent sur des problématiques partagées au sein de l'axe robotique du COSMER, mais également sur des thèmes communs abordés par les axes Robotique et Innovation/Conception Mécanique. On prend notamment pour exemple les conceptions de carènes de robots sous-marins par optimisation topologique pour faciliter l'identification de leurs paramètres dynamiques et leur pilotage (thème non-abordé dans ce mémoire mais qui est d'actualité). Les conceptions mécatronique et mécanique sont proches et ont l'avantage d'être vecteurs d'innovation via les moyens et connaissances mises en oeuvre au sein du laboratoire (Collaboration étroite avec la **plate-forme de fabrication additive MAQ 3D**).

Comme en témoigne ce mémoire, ma formation de concepteur mécanicien est encore largement prépondérante dans mon savoir-faire de mécatronicien, mais les innovations et les avancées que l'on vise et revendique adressent bel et bien la conception mécatronique au sens large avec le plus souvent un regard particulier aux systèmes appliqués à l'humain (Réalité Virtuelle, Domotique et Guide sensoriel de Navigation pour kayakiste non-voyants).

Ces thématiques de recherche ne sont pas toujours facilement identifiables auprès des différentes communautés scientifiques nationales et internationales (reconnaissance des travaux en domotique et gestion de l'énergie au niveau français, valorisation en journaux reconnus pour le GSN). C'est donc grâce à des **collègues bienveillants** et soucieux de défendre les missions de formation et de compagnonnage que comportent notre métier, que j'ai pu contribuer aux différents sujets de recherche abordés dans ce mémoire et dans ma carrière jusqu'ici par le biais de co-encadrements de thèses sous leur direction (merci à eux).

C'est dans ce même état d'esprit que se déroulent (et je l'espère, se dérouleront) les recherches que je mène actuellement au sein du laboratoire COSMER. En plein essor et majoritairement composé de membres de 60^{ème}, et 61^{ème} sections (28^{ème} également), ce laboratoire offre la possibilité de travailler sur divers projets d'envergure variable où chacun peut apporter une contribution plus ou moins importante dans son domaine de prédilection. La grande variété des projets sur lesquels je travaille me donne le plaisir de fréquenter de nouveau un atelier de mécanique en GMP mais aussi de participer à des campagnes expérimentales sur le terrain (la plage de la Garonne au Pradet reste un endroit assez idyllique pour cela).

Le **mode de collaboration** au sein du laboratoire COSMER me permet de trouver ma place dans la poursuite (kayak, robot voilier, humanoïde) et la **création de nouvelles activités de recherche** (gestion de l'ombilical, conception de solution amphibie).

Mon profil pluridisciplinaire traduit par la diversité des sujets traités jusqu'alors dans ma carrière (4 ou 5 reconversions de thématiques scientifiques) joue également un rôle important en **enseignement dans les formations d'ingénieurs et universitaires**. Je suis satisfait aujourd'hui de trouver ma place aux côtés d'automaticiens (de renom!) du LIS¹, d'expert d'Objets Connectés de l'IN2MP² et de spécialistes de robotique du laboratoire COSMER pour apporter mon savoir-faire, et faire part de mon expérience sur la robotique et la conception mécatronique au sein notamment du Master Ingénierie des Systèmes Complexes, parcours Robotique et Objets connectés ou des parcours d'ingénierie de SEATECH.

En termes de **valorisation**, la politique adoptée est de publier dans des revues, journaux et congrès de bonne renommée comme nous l'avons fait dernièrement dans le journal *Field of Robotics* ou le congrès IFAC CAMS 2019.

Sur le plan national, notre rayonnement se fait via des participations aux Groupes De Recherche (MACS et Robotique) ainsi qu'à des colloques ou salons où nous communiquons sur des recherches

1. Laboratoire d'Informatique et des Systèmes UMR 7020

2. Institut Matériaux Microélectronique et Nanosciences de Provence UMR 7334

spécifiques comme le *GSN (Electric days 2018 - EDF [Anthierens and Hugel, 2018], AFAPA 2018 [Anthierens and D. Hugel, 2018])*.

J'ai la volonté de participer à de nouveaux **encadrements et directions de thèse** pour contribuer au mieux à la formation de jeunes docteurs au sein de notre laboratoire. Dès maintenant, nous cherchons à maintenir une activité de recherche dynamique dans le domaine de la gestion d'ombilical via une nouvelle thèse. Les sujets plus émergents comme la robotique amphibie ou plus applicatif comme le GSN sont supportés par des études internes menées au sein du laboratoire avec la participation d'étudiants de Seatech ou de Master d'Ingénierie de Systèmes Complexes.

Mon implication pour l'excellence et le devenir de l'école Supméca Toulon dans mes premières années de carrière et l'absence d'une organisation structurée de laboratoire sur site ne m'ont pas laissé beaucoup d'opportunité pour consacrer le temps que j'aurais voulu à la recherche en étant plus présent (et surtout disponible) aux cotés des doctorants que j'ai co-encadrés (voir volume d'heures de cours et de responsabilité pédagogique, p19). L'arrivée dans cette nouvelle école a été l'occasion pour moi de changer mon implication en déclinant la responsabilité du parcours Mécatronique et en affirmant ma volonté de poursuivre la rédaction de la page 4 de ce manuscrit commencé 3 ans auparavant ! C'est aussi affirmer la volonté de redonner la part belle à la facette recherche de ce métier qui est toujours passée après l'enseignement depuis mon recrutement en école d'ingénieurs par souci d'engagement pour l'établissement. Cela signifie pouvoir travailler de concert avec les doctorants et c'est ce que j'ai le plaisir de faire présentement avec Ornella Tortorici qui a débuté sa thèse en novembre 2017.

Le **co-encadrement de sa thèse** est une priorité pour moi afin qu'elle puisse s'épanouir dans ce travail tout en ayant une formation (contenu scientifique, méthodes, valorisation, publications) qui favorise son début de carrière professionnelle académique comme souhaité.

Enfin je ne saurais envisager la poursuite de mes activités de recherche et de maître de conférences sans recherche de **partenariat**. Bien entendu l'aspect financier est un vecteur de motivation forcée (hormis pour ceux qui ont une fibre commerciale et mercantile), mais nécessaire au montage et déroulement de tous projets (ou presque car le GSN ne fait pas l'objet de soutien financier de la part d'extérieurs).

Cela signifie que je continue de m'investir dans cette recherche de financement auprès de l'université ou de la région pour les contrats doctoraux, de *Toulon Provence Méditerranée* pour les projets de développement en robotique, de la DGA pour des DGA RAPID...

Outre les contraintes financières, c'est par vocation que je m'engage pour trouver des partenaires, car sans parodier un vieux proverbe publicitaire de la SNCF, il me semble effectivement que *le progrès ne vaut que s'il est partagé par tous*. Loin de toutes ces convictions éthiques, je suis bien entendu favorable à la communication des connaissances et du savoir (sans que cela soit conditionnel) et de plus, j'attache une importance forte à l'application de mon travail au quotidien. C'est pourquoi que ce soit directement ou de façon différée, je souhaite que ce que nous produisons en recherche puisse être utile véritablement un jour (quand ce n'est pas le cas, heureusement que l'enseignement se charge de satisfaire cette mission). Ainsi que ce soit pour le GSN, où le contentement des utilisateurs non-voyants a été une rétribution très gratifiante, ou la gestion de l'ombilical, la recherche prend, on ne peut plus, le sens d'appliquée ce qui justifie d'avoir des partenaires en qualité d'utilisateurs finaux ou collaborateurs pour approcher des solutions exploitables.

La création du Master Erasmus Mundus MIR (<http://www.master-mir.eu/>) illustre bien la collaboration prometteuse entre une structure de formation académique tournée vers la recherche en robotique maritime et les industriels locaux, nationaux et internationaux. En effet, les partenariats avec AKKA autour de problématique de défense, la DGA pour la guerre des mines, Robopec / Subseatech / Notilo Plus / Alseamar / iXblue pour les ROV, AUV et gliders peuvent prendre une dimension internationale en étant le coeur des projets européens.

Les partenariats institutionnels d'ores et déjà effectifs avec l'IFREMER, le CNRS et l'INRIA via des enseignements au sein du Master 2 *Robotique et Objets Connectés* sont de qualité et à pérenniser tant sur le plan pédagogique qu'en collaboration dans des projets de recherche. La création de nouveaux projets ira dans ce sens.

Bibliographie

- [Cav, 2018] (2018). Le cave : L'expérience ultime de réalité virtuelle immersive en 3d. <https://www.realite-virtuelle.com/cave-realite-virtuelle-vr>.
- [A.I. and C., 2008] A.I., D. and C., C. (2008). Fuzzy comfort and its use in the design of an intelligent coordinator of fuzzy controller-agents for environmental conditions control in buildings. *Journal of Uncertain Systems*, vol. 2(2) :pp. 101–112.
- [Amanatiadis et al., 2010] Amanatiadis, A., Chrysostomou, D., Koulouriotis, D., and Gasteratos, A. (2010). A fuzzy multi-sensor architecture for indoor navigation. In *2010 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques*, pages 452–457.
- [Anthierens, 2001a] Anthierens, C. (2001a). Les matériaux électroactifs pour la conception de micro-systèmes et microrobots. In *2ème colloque sur les matériaux électroactifs et leurs applications en génie électrique*, pages 35–40, toulouse.
- [Anthierens, 2001b] Anthierens, C. (2001b). Micro et nano. *JAUTOMATISE #18*, pages 65–71.
- [Anthierens and Bétemps, 2001] Anthierens, C. and Bétemps, M. (2001). Design and control of a pneumatic microrobot for in-pipe inspection of nuclear pipes. *Journal of micromechatronics*, 1(2) :155–174.
- [Anthierens et al., 1999] Anthierens, C., Ciftci, A., and Bétemps, M. (1999). Design of an electro pneumatic micro robot for in-pipe inspection. In *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, volume 2.
- [Anthierens and Dupuis, 2005] Anthierens, C. and Dupuis, Y. (2005). Conception d'une interface de locomotion pédestre pour la Réalité Virtuelle. In *Journées Nationales d'Automatique*, page 82, Lyon.
- [Anthierens et al., 2004] Anthierens, C., Dupuis, Y., and Impagliazzo, J.-L. (2004). Design of a Virtual reality workshop as a helpful tool for the microworld modeling. In *35th International Symposium on Robotics, ISR'04*, page 6p, Villepinte, France.
- [Anthierens et al., 2008a] Anthierens, C., Filipezak, J., Mazel, P., and Suchere, J. (2008a). Design of a 4 dof joystick for wheelchair driving. In *Mecatronics'08*, page #197 6p, Annecy, le grand Bornand, France.
- [Anthierens et al., 2018] Anthierens, C., Groux, D., and Hugel, V. (2018). Sensory navigation guide for visually impaired sea kayakers. *Journal of Field Robotics*, 35(5) :732–747.
- [Anthierens et al., 2002] Anthierens, C., Impagliazzo, J.-L., and Chaillet, N. (2002). Contribution de la réalité virtuelle pour la micro manipulation. In *5èmes journées du pôle microrobotique, 1ères journées du RTP microrobotique*, page 6p, IRSA, Rennes Cachan.
- [Anthierens et al., 2001] Anthierens, C., Impagliazzo, J. L., Chollet, P., and Frachet, J. P. (2001). Design of an infinite impedance haptic interface. In *MECATRONICS'2001, 5th franco-japanese congress on mechatronics*, pages 33–38, Besançon, France.
- [Anthierens et al., 2006a] Anthierens, C., Impagliazzo, J.-L., Dupuis, Y., Chollet, P., and Richard, E. (2006a). Simulateur de chaise roulante pour la conception avancée de bâtiment. In *IFRATH IEEE France, Handicap 2006*, page #4 6p, Paris.
- [Anthierens et al., 2006b] Anthierens, C., Impagliazzo, J.-L., Dupuis, Y., and Richard, E. (2006b). A specific locomotion interface for Virtual Reality - Design of a wheelchair type haptic. In *ICINCO 2006 - 3rd International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Proceedings*, volume RA.

- [Anthierens et al., 2008b] Anthierens, C., Leclercq, M., Bideaux, E., and Flambard, L. (2008b). A smart sensor to evaluate visual comfort of daylight into buildings. *International Journal of Optomechatronics*, 2(4) :413–434.
- [Anthierens et al., 2000] Anthierens, C., Libersa, C., Touaibia, M., Bétemps, M., Arsicault, M., and Chaillet, N. (2000). Micro robots dedicated to small diameter canalization exploration. In *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 1.
- [Anthierens and Mestre, 2008] Anthierens, C. and Mestre, D. (2008). Conception d’un joystick à 4 ddl pour la conduite de chaise roulante. In *IFRATH IEEE France, Handicap 2008*, pages 226–231, Paris.
- [Anthierens et al., 2013] Anthierens, C., Pauly, E., and Jeay, F. (2013). MARIUS : A sailboat for sea sailing. In *International Robotics Sailing Conference*, pages 3–12, Brest, france.
- [Anthierens and Richard, 2003] Anthierens, C. and Richard, E. (2003). JULIO, Une plate-forme éducative pour la mécatronique. In *CETSIS- EEA Colloque sur l’Enseignement des Technologies et des Sciences de l’Information et des Systèmes*, page 4p, Toulouse.
- [Anthierens and D. Hugel, 2018] Anthierens, C. G. and D. Hugel, V. (2018). Guide sensoriel de navigation pour kayakistes non-voyants. Technical report, XIX journées d’études en Activités Physiques Adaptées.
- [Anthierens and Hugel, 2018] Anthierens, C. Groux, D. and Hugel, V. (2018). Guide sensoriel de navigation. Technical report, EDF Electric Days.
- [Arnal, 2013] Arnal, E. (2013). *Modélisation et commande hiérarchisées du bâtiment pour l’amélioration des performances énergétiques, thermiques et optiques*. Thesis, INSA Lyon.
- [Arnal et al., 2011a] Arnal, E., Anthierens, C., and Bideaux, E. (2011a). Consideration of glare from daylight in the control of the luminous atmosphere in buildings. In *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, pages 1070–5, Budapest, Hungary.
- [Arnal et al., 2011b] Arnal, E., Anthierens, C., and Bideaux, E. (2011b). Contrôle de l’ambiance lumineuse d’une pièce. application au pilotage de stores vénitiens. In *4èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS*, page 6.
- [Arnal et al., 2011c] Arnal, E., Der Arslanian, P., Anthierens, C., and Bideaux, E. (2011c). Contrôle coopératif des actionneurs de confort optique pour la régulation de l’ambiance lumineuse dans une pièce. In *La révolution énergétique des bâtiments.*, page 6p, Gif sur Yvette, Supelec, France.
- [Awabot,] Awabot. Robot beam - <http://awabot.com/robots-de-telepresence/beam-pro-awabot>.
- [Bennett C. A. and B.C.V., 1984] Bennett C. A., R. R. and B.C.V., R. (1984). Discomfort glare : Luminance range-limited replication study of angularly small sources. *Journal of the Illuminating Engineering Society of North America*, pages pp396–420.
- [Chaccour and Badr, 2015] Chaccour, K. and Badr, G. (2015). Novel indoor navigation system for visually impaired and blind people. In *Applied Research in Computer Science and Engineering (ICAR), 2015 International Conference on*, pages 1–5.
- [Chauvel J., 1982] Chauvel J., Collins B., D. R. L. J. (1982). Glare from windows : Current view of the problem. *Lighting research & Technology*, vol. 14(n°1) :pp. 31–46.
- [CIE, 1983] CIE (1983). Discomfort glare in the interior working environment. Publication CIE N°55 (TC-3.4), Vienne (Autriche). 43p.
- [Clarke J.A., 1999] Clarke J.A., Hand J.W., J. M. (1999). *Daylight performance : daylight quality and control of energy consumption (Chapter in Daylight Performance of buildings)*. Number ISBN 1873936877. London : James and James.
- [Coerman, 1962] Coerman, R. (1962). The mechanical impedance of the human body in sitting and standing position at low frequencies. *International Journal of Human Factors*, 4 :227–253.
- [Cosgun et al., 2014] Cosgun, A., Sisbot, E. A., and Christensen, H. I. (2014). Guidance for human navigation using a vibro-tactile belt interface and robot-like motion planning. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 6350–6355.

- [Cuttle, 1983] Cuttle, C. (1983). People and windows in workplaces. In *Proceedings of People and Physical Environment Research Conference*, pages pp 203–212., New Zealand.
- [Darken et al., 1997] Darken, R. P., Cockayne, W. R., and Carmein, D. (1997). The omni-directional treadmill : A locomotion device for virtual worlds. In *Proceedings of the 10th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '97, pages 213–221, New York, NY, USA. ACM.
- [Der Arslanian and Anthierens, 2009] Der Arslanian, P. and Anthierens, C. (2009). Système adaptatif de pilotage pour la maîtrise de l'énergie du bâtiment (SAPB). Technical report, Rapport final de projet labellisé : Pôle de compétitivité CAP ENERGIE.
- [Distler and Bölhoff, 1996] Distler, H. and Bölhoff, H. H. (1996). Velocity perception in 3-d environments. *Perception*, 25(1_suppl) :37–37.
- [Dubois, 2001] Dubois, M. (2001). Impact of shading devices on daylight quality in offices. simulations with radiance.
- [Dumortier, 2011] Dumortier, D. (2011). Serveur de la station de mesure de la lumière naturelle et du rayonnement solaire de l'entpe. Technical report, <http://idmp.entpe.fr/vaulx/>.
- [Dupuis, 2006] Dupuis, Y. (2006). *Conception d'une interface de marche pour la réalité virtuelle*. phdthesis, Université du Sud Toulon Var.
- [Dupuis et al., 2005a] Dupuis, Y., Anthierens, C., and Impagliazzo, J.-L. (2005a). Design of a Locomotion Interface for Self- Movement Perception. In *6th International Workshop on Research and Education on Mechatronics REM'05*, page 6p, Annecy, France.
- [Dupuis et al., 2005b] Dupuis, Y., Anthierens, C., Impagliazzo, J.-L., and Millet, D. (2005b). Conception d'une interface sensorielle et motrice de locomotion pédestre. In *Journées Doctorales d'Automatique*, page 4p, Lyon.
- [Dupuis et al., 2005c] Dupuis, Y., Anthierens, C., Impagliazzo, J.-L., and Yushchenko, L. (2005c). Design of a sensorial and driving locomotion interface. In *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, volume 16.
- [Dupuis et al., 2006a] Dupuis, Y., Impagliazzo, J.-L., Anthierens, C., and Millet, D. (2006a). A new sensorial and driving locomotion interface for virtual reality. In *ICINCO 2006 - 3rd International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Proceedings*, volume RA.
- [Dupuis et al., 2006b] Dupuis, Y., Impagliazzo, J.-L., Anthierens, C., and Millet, D. (2006b). Design of a mechatronic interface for human gait. *Journal Europeen des Systemes Automatisés*, 40(3).
- [Fauconnier, 1992] Fauconnier, R. (1992). L'action de l'humidité de l'air sur la santé dans les bâtiments tertiaires. *Chauffage, ventilation, conditionnement*, 64(10) :57–62.
- [Fontoynt, 2002] Fontoynt, M. (2002). Perceived performance of daylighting systems : lighting efficacy and agreeableness. *Solar Energy*, 73(2) :83 – 94. Daylighting.
- [Fuchs et al., 2006] Fuchs, P., Moreau, G., Berthoz, A., and J.-L., V. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle volume 1 - L'Homme et l'environnement virtuel*, volume 1. Presses des Mines.
- [G.S., 2006] G.S., K. D. S. G. P. A. S. (2006). Design and installation of an advanced eib fuzzy indoor comfort controller using matlab. *Energy and Buildings*, vol. 38(1) :pp. 1084–1092.
- [Guillemin A., 2001] Guillemin A., M. N. (2001). An innovative lighting controller integrated in a self-adaptive building control system. *Energy and Buildings*, vol. 33(n°5) :pp. 477–487.
- [Hagen et al., 2018] Hagen, I. B., Kufalor, D. K. M., Brekke, E. F., and Johansen, T. A. (2018). Mpc-based collision avoidance strategy for existing marine vessel guidance systems. In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 7618–7623.
- [Halonen L., 1995] Halonen L., L. J. (1995). Need of individual control to improve daylight utilization and user satisfaction in integrated lighting system. In *23 session of the CIE*, pages pp200–203, Vienna, Austria.
- [Holladay, 1926] Holladay, L. (1926). The fundamentals of glare and visibility. *Journal of the optical society*, vol. 12(n°4) :pp. 271–319.

- [Hopkinson RG, 1960] Hopkinson RG, B. R. (1960). A study of glare from very large sources. *Illuminating Engineering*, vol. 55 :pp. 113–124.
- [Iwata et al., 2001] Iwata, H., Yano, H., and Nakaizumi, F. (2001). Gait master : A versatile locomotion interface for uneven virtual terrain. In *Proceedings IEEE Virtual Reality 2001*, pages 131–137.
- [Janak, 1997] Janak, M. (1997). Coupling building energy and lighting simulation. In *In Proceedings of the International IBPSA Conference*.
- [Janak and Macdonald, 1999] Janak, M. and Macdonald, I. (1999). Current state of the art of integrated thermal and lighting simulation and future issues.
- [J.C., 2005] J.C., V. (2005). *Space meets status : Designing workspace performance*. 168 p. London : Taylor&Francis.
- [Jennings J.D., 1999] Jennings J.D., Rubinstein F.M., D. D. (1999). Comparison of control options in private offices in an advanced lighting controls testbed. In *IESNA Annual Conference*.
- [Jung, 2009] Jung, O. (2009). Approche multicritère numérique et expérimentale de la ventilation et du rafraîchissement passif d’un bâtiment multizone par contrôle de composants de façade.
- [Kolokotsa D., 2009] Kolokotsa D., Pouliezios A., S. G. e. L. C. (2009). Predictive control techniques for energy and indoor environmental quality management in buildings. *Building and Environment*, 44(9) :1850–1863.
- [Laranjeira et al., 2017] Laranjeira, M., Dune, C., and Hugel, V. (2017). Catenary-based visual servoing for tethered robots. In *Robotics and Automation (ICRA), 2017 IEEE International Conference on*, pages 732–738. IEEE.
- [Leclercq, 2009] Leclercq, M. (2009). *Conception et intégration d’un système de vision pour la gestion du confort visuel dans le bâtiment*. PhD thesis. Thèse de doctorat dirigée par Bideaux, Eric et Anthierens, Cédric Automatique Lyon, INSA 2009.
- [Leclercq et al., 2007] Leclercq, M., Anthierens, C., Bideaux, E., and Flambard, L. (2007). Régulation du confort visuel dans une pièce : analyse pour la mise en œuvre. In *Journées Doctorales MACS, JDMACS’07*, page 6.
- [Leclercq et al., 2008a] Leclercq, M., Anthierens, C., Bideaux, E., and Flambard, L. (2008a). Control of optic comfort in an experimental room. In *Mecatronics’08*, page 6.
- [Leclercq et al., 2008b] Leclercq, M., Anthierens, C., Bideaux, E., and Flambard, L. (2008b). Design of a Visual Comfort Sensor for Daylighting Devices. In *IFAC World Congress*,, pages 6873–8, Seoul, Korea.
- [Leclercq et al., 2009] Leclercq, M., Arnal, E., Anthierens, C., and Bideaux, E. (2009). Capteurs de confort visuel : Application aux bâtiments tertiaires. In *7ème Colloque CAPTEURS*, page 6p, Bourges, France.
- [Leclercq et al., 2011] Leclercq, M., Arnal, E., Anthierens, C., and Bideaux, E. (2011). Control of visual conditions for open-plan offices. *Mechatronics*, 21(3).
- [Lee et al., 2018] Lee, J., Ahn, S. C., and Hwang, J. I. (2018). A walking-in-place method for virtual reality using position and orientation tracking. *Sensors (Basel)*, 18(9).
- [Lee et al., 2014] Lee, J.-H., Kim, D., and Shin, B.-S. (2014). *A Wearable Guidance System Incorporating Multiple Sensors for Visually Impaired Persons*, pages 541–548. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [Lee E.S., 1998] Lee E.S., DiBartolomeo D.L., S. S. (1998). Thermal and daylighting performance of an automated venetian blind and lighting system in a full-scale private office. *Energy and Buildings*, vol. 29(n°1) :47–63.
- [Lemonde.fr, 2018] Lemonde.fr (2018). Casques de réalité virtuelle : six pistes pour progresser.
- [Linares et al., 2002] Linares, J., Anthierens, C., and Sprauel, J. (2002). Synthesis of tolerancing by functional group. *Journal of Manufacturing Systems*, 21(4).

- [Linares et al., 2000] Linares, J. M., Anthierens, C., and Sprauel, J. M. (2000). Monte Carlo simulation in tolerancing. In *Second International Conference on Mathematical Methods in Reliability*, page 6, Bordeaux.
- [Lécuyer, 2001] Lécuyer, A. (2001). *Contribution à l'étude des retours haptique et pseudo-haptique et de leur impact sur les simulations d'opérations de montage/démontage en aéronautique*. PhD thesis. Thèse de doctorat dirigée par Coiffet, Philippe et Coquillart, Sabine Informatique Paris 11 2001.
- [Mahdavi et al., 2005] Mahdavi, A., Spasojevic, B., and Brunner, K. (2005). Elements of a simulation assisted daylight-responsive illumination systems control in buildings. In *Proceedings of 9th International IBPSA Conference*, pages 693–700.
- [Milone et al., 2007] Milone, A., Milone, D., and Pitruzzella, A. (2007). A simulation of daylight levels for the determination of visual comfort in large spaces. In *Proceedings of Building Simulation*, pages pp 1232–1237. Beijing, China.
- [Mocanu et al., 2015] Mocanu, B., Tapu, R., and Zaharia, T. (2015). An outdoor cognition system integrated on a regular smartphone device. In *E-Health and Bioengineering Conference (EHB), 2015*, pages 1–4.
- [Mohammadi et al., 2007] Mohammadi, A., Kabir, E., Mahdavi, A., and Pröglhöf, C. (2007). Modeling user control of lighting and shading devices in office buildings : an empirical case study. In Eigenverlag, editor, *Proceedings of the 10th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition. Beijing, China.*, pages pp 772–778.
- [Naveau et al., 2013] Naveau, M., Anthierens, C., Pauly, E., and Courmontagne, P. (2013). MARIUS project : Design of a sail robot for oceanographic missions. In *OCEANS 2013 MTS/IEEE - San Diego : An Ocean in Common*.
- [Omnifinity, 2019] Omnifinity (2019). Omnideck, <http://omnifinity.se/>.
- [Park and Kim, 2017] Park, G. and Kim, J. (2017). Development of virtual reality walking interface using treadmill.
- [Park C.S., 2003] Park C.S., Augenbroe G., M. T. (2003). Daylighting optimization in smart facade systems. In *Proceedings of of the 8th IBPSA Conference (International Building Performance Simulation Association)*, pages pp 1001–1008., Eindhoven, Netherlands.
- [Pradeep et al., 2010] Pradeep, V., Medioni, G., and Weiland, J. (2010). A wearable system for the visually impaired. In *2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology*, pages 6233–6236.
- [Scheggi et al., 2014] Scheggi, S., Talarico, A., and Prattichizzo, D. (2014). A remote guidance system for blind and visually impaired people via vibrotactile haptic feedback. In *22nd Mediterranean Conference of Control and Automation (MED)*, pages 20–23.
- [Seo et al., 2016] Seo, D., Kim, D., Yoo, B., and Ko, H. (2016). *Adaptive Landmark-Based Pedestrian Navigation System with Hand-Held and Wearable Devices*, pages 379–384. Springer International Publishing, Cham.
- [Seongju J., 2001] Seongju J., M. A. (2001). A hybrid system for daylight-responsive lighting control. In *Proceedings of Building simulation*, pages pp 849–856, Rio de Janeiro, Brazil.
- [Stiles, 1937] Stiles (1937). The effect of a glaring light source on extrafoveal vision. *Proceedings of the Royal Society of London B : Biological Sciences*, 122(827) :255–280.
- [Supméca and ISEN., 2008] Supméca and ISEN. (2008). Babysub - présentation et tests en piscine - <https://www.youtube.com/watch?v=8d-WPooz-NQ&feature=youtu.be>.
- [Tapu et al., 2014] Tapu, R., Mocanu, B., and Tapu, E. (2014). A survey on wearable devices used to assist the visual impaired user navigation in outdoor environments. In *Electronics and Telecommunications (ISETC), 2014 11th International Symposium on*, pages 1–4.
- [Velasquez et al., 2000] Velasquez, R., Anthierens, C., and Bétemps, M. (2000). Modeling, design and control of an electropneumatic mobile micro robot for pipes inspection. In *ITNL/IEEE International Symposium on Robotics and Automation*, pages 139–144, Monterrey, Mexico.

- [Velázquez et al., 2011] Velázquez, R., Bázan, O., Alonso, C., and Delgado-Mata, C. (2011). Vibrating insoles for tactile communication with the feet. In *15th International Conference on Advanced Robotics (ICAR), 2011*, pages 118–123.
- [Virtuix, 2019] Virtuix (2019). Esports, <https://www.virtuix.com/omniverse-esports/>.
- [Vos, 2003] Vos, J. J. (2003). On the cause of disability glare and its dependence on glare angle, age and ocular pigmentation. *Clinical and Experimental Optometry*, 86(6) :363–370.
- [Yelamarthi et al., 2014] Yelamarthi, K., DeJong, B. P., and Laubhan, K. (2014). A kinect based vibrotactile feedback system to assist the visually impaired. In *2014 IEEE 57th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, pages 635–638.
- [Young et al., 1983] Young, A., Stokes, M., Round, M., and Edwards, R. H. T. (1983). The effect of high-resistance training on the strength and cross-sectional area of the human quadriceps. *eur j clin invest* 13 : 411-417. 13 :411–7.
- [Yushchenko et al., 2003] Yushchenko, L., Impagliazzo, J.-L., and Anthierens, C. (2003). Design of an advanced scientific simulator equipped with immersive interfaces. Application to a micromanipulation task. In *4th congress asia-europe on mechatronics*, pages 38–43, Hatoyama, Japan.
- [Yushchenko et al., 2004] Yushchenko, L., Impagliazzo, J.-L., Toussaint, C., and Anthierens, C. (2004). The Dynamic Wavelet Train Tracing Method in Virtual Acoustics. In *5th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*, page 6p.