

1 Rappel des objectifs

Le but de cette opération était le développement de différents systèmes d'assistance à la personne en utilisant des techniques dérivées de la robotique [23, 25]. Il s'agit d'apporter une aide à des personnes en situation de difficulté en raison d'obstacles à la mobilité qui peuvent être dus à un accident, à l'âge ou au handicap. L'accent est mis sur la prévention des accidents, sur la mise en sécurité en cas d'accident, sur une assistance appropriée pour les gestes quotidiens et enfin sur la rééducation. Outre ces besoins majeurs les plate-formes doivent être modulaires pour s'adapter à l'utilisateur et à son environnement et fournir une grande variété d'interface utilisateur pour permettre de gérer les capacités motrices et cognitives très diverses des utilisateurs potentiels, interfaces qui doivent de plus être socialement acceptées (ici les sciences humaines et sociales pourront nous apporter une meilleure compréhension de l'ergonomie et des processus qui guident l'acceptation ou le rejet) . Enfin les solutions proposées doivent être de bas coût pour permettre un accès à la plus grande majorité.

Une phase de recueil des besoins en amont du projet, d'une durée de deux ans et s'étant concrétisée par plus de 200 interviews (utilisateurs, association d'utilisateurs, communauté médicale, collectivités territoriales) nous a permis d'identifier des thèmes majeurs: l'aide au sauvetage pour les situations d'accidents ou de catastrophe, l'aide à la mobilité avec détection des situations de danger et enfin l'aide à la rééducation. Pour cette opération nous avons donc planifié la réalisation de 5 plate-formes robotisées ainsi que leur intégration dans un milieu d'appartement simulé ou dans un espace immersif:

1. **robot de sauvetage pour catastrophe naturelle:** un engin de levage totalement autonome, portable par une équipe de sauveteurs et déployable rapidement pour porter assistance en cas de catastrophe (tremblement de terre, accident routier),
2. **déambulateur robotisé:** instrumentation d'un déambulateur du commerce pour l'assistance au diagnostic, la détection de chute et l'aide à la mobilité,
3. **robot de levage et d'assistance à la marche:** a comme but de permettre le transfert (par exemple passage de la position couchée à la position debout) et d'aider à la marche et à sa rééducation,
4. **robot de rééducation** en situation active, entre autre à domicile: a comme objectif de permettre le suivi, l'assistance et la correction de geste de rééducation à domicile, en cabinet ou en milieu hospitalier,
5. **robot de rééducation en milieu immersif:** un système qui combine un robot support sur lequel le sujet peut monter et un robot parallèle à câbles qui permettra de mesurer/corriger les mouvements de certaines articulations humaines tout en bénéficiant de l'environnement immersif

Outre ces plate-formes il était prévu de procéder à l'installation d'un **appartement témoin** qui permettra de tester les dispositifs en situation réelle.

Un élément essentiel des dispositifs proposés était de pouvoir les modifier très rapidement pour pouvoir ajouter des fonctionnalités qui seront nécessaires pour des usages ou des expériences: capteurs, mécanique, réseau, . . .

La validation expérimentale est un élément-clé d'une plate-forme d'assistance, avec différents types d'essais (sur site, essais à distance sur le site, transport vers d'autres sites) et de partenaires (académiques ou industriels, voire utilisateurs potentiels). Il faut noter par ailleurs que pour ce type de plate-formes, impliquant des essais en situation, la législation impose un agrément de l'ANSM et à un passage devant un Comité de Protection des Personnes (CPP).

2 Usage des financements

L'intégralité des plate-formes prévues a été réalisée, ainsi que l'appartement témoin:

- la grue de sauvetage MARIONET-CRANE, déployée en extérieur pendant une période de 3 mois (figure 1)
- le déambulateur robotisé: deux versions ont été développées avec une version motorisée (**ANG-II**) et une version légère pour l'analyse de la marche (**ANG-light**), figure 2. En complément du déambulateur nous avons réalisé l'instrumentation d'une veste qui, avec une informatique intégrée, permet de détecter la chute d'une personne
- le robot de levage et d'assistance à la marche MARIONET-ASSIST (figure 1)

- le robot de rééducation MARIONET-REHAB (figure 3)
- le robot de rééducation en milieu immersif, actuellement en cours d'intégration dans la salle immersive de l'INRIA



Figure 1: Le robot de sauvetage MARIONET-CRANE et le robot d'assistance au transfert MARIONET-ASSIST



Figure 2: Les déambulateurs robotisés ANG-II et ANG-light

L'appartement témoin a été aussi implanté dans la halle robotique de l'INRIA (figure 3)

3 Usage et résultats

3.1 Robot de sauvetage MARIONET-CRANE

L'idée de base cette plate-forme est de proposer un engin de levage puissant (capacité de levage de deux tonnes), portable dans des sacs à dos de sauveteurs (poids total ne dépassant pas 200 kg au total en incluant



Figure 3: Le robot de rééducation MARIONET-REHAB et l'appartement témoin

informatique et source d'énergie), permettant l'ensemble des mouvements possible de la charge (translation et orientation dans toutes les directions et pas seulement montée et descente comme pour les engins de levage classiques), complétés par des systèmes embarqués sur la nacelle qui communique à l'équipe médicale de surface des informations physiologiques et visuelles sur le(s) blessé(s) alors qu'ils sont encore en cours de transfert (gain de temps dans la préparation de l'intervention médicale) [22, 26]. Le principe de fonctionnement est d'avoir 6 treuils pouvant enrouler/dérouler des câbles tous connectés à la plate-forme: un ajustement coordonné de la longueur de ces câbles permet d'obtenir le déplacement voulu de la plate-forme. De plus la répartition de la charge sur les 6 câbles permet d'avoir individuellement sur chacun des câbles un tension relativement faible (de l'ordre de 1/6 de la charge totale), permettant l'utilisation de moteurs de faible puissance.

Pour prouver la faisabilité du concept nous avons déployé ce robot en extérieur pendant 3 mois dans un environnement qui en a fait le robot de sauvetage de plus grande taille jamais déployé au niveau mondial. Ce déploiement a été très largement couvert par la presse et la télévision au niveau local et national et a été exhibé lors de manifestations grand public (portes ouvertes des équipes robotiques de l'INRIA, fête de la Science).

Du point de vue scientifique, ce robot, un des premiers de la famille MARIONET, nous a permis de nous placer comme une des équipes leader mondial sur la théorie et l'expérimentation de ce type de système. Cela a conduit à une liste importante de publications mais aussi à nombreuses sollicitations pour participer à de nombreux événements sur ce thème (comité scientifique de conférences, école d'été organisée à Sophia sous l'égide de l'IFTToMM, conférences invitées). L'existence de cette plate-forme a aussi conduit à ce que soyons sollicité pour participer au projet européen Cablebot qui considère l'utilisation de ce type de robot de très grande taille pour des opérations industrielles.

3.2 Déambulateurs ANG

Les objectifs préliminaires des déambulateurs étaient la détection des chutes et l'aide à la mobilité [15]. Si ces objectifs ont été maintenus les premières expériences nous ont conduit à mettre en œuvre une autre fonctionnalité: l'analyse de la marche. Il est en effet apparu que des problèmes de la marche, même invisibles à l'oeil nu, apparaissaient très visiblement sur les enregistrements de trajectoire du déambulateur. De plus les mesures du déambulateur sont apparues comme bien plus riches que les tests classiques fait à l'hôpital, qui se résume à un chronométrage sur un parcours standardisé: le déambulateur fournit une information quasi continue sur la vitesse, sur la symétrie de la trajectoire et permet de détecter des petites anomalies de la marche. Pour mieux mettre en évidence ces avantages nous avons demandé à 24 volontaires de l'INRIA (d'âge compris entre 25 et 63 ans) d'effectuer des exercices classiques utilisés lors de l'évaluation de la marche pour les personnes âgées, ceci avec et sans déambulateur, les sujets étant instrumentés (accéléromètres aux genoux et aux poignets, capteur

de pression plantaire). L'analyse de ces tests a permis de commencer à mettre en évidence des invariants de la marche sur des sujets sains, ceci en dépit de la variabilité naturelle de cette action. Cette étude, encore en cours vu la taille des données, devrait permettre tout d'abord d'obtenir des étalons de référence ("golden standard") de la marche "normale". Le même type d'instrumentation est en cours d'utilisation au CHU de Cimiez avec des personnes âgées afin de déterminer les variations de ces indicateurs: ce test a cependant pris du retard en raison de la difficulté d'obtention du CPP (voir la section "Collaboration"). Le second intérêt de ces tests est de déterminer des méthodes qui permettraient de remonter des indicateurs obtenus lors d'une marche avec un déambulateur vers leurs valeurs pour une marche sans déambulateur, la présence du déambulateur créant une modification du processus de la marche. Les mesures faites dans les deux modes nous permettront de tester la justesse de nos algorithmes. Il sera ensuite possible d'utiliser le déambulateur comme outil précis de mesure et de suivi pour les personnes âgées (qu'il est difficile d'instrumenter, en particulier à domicile) soit à l'hôpital pour les sujets qui ne l'utilisent pas dans la vie courante, soit en quasi-permanence pour les autres. On peut penser qu'en particulier l'usage à domicile permettra de détecter des événements rares dans la marche, signe de l'émergence d'une pathologie, et fournira ainsi un instrument précieux de médecine préventive.

Outre cette application très importante du déambulateur comme outil de suivi médical il est apparu des possibilités supplémentaires. Par exemple les utilisateurs de déambulateur ont des contraintes fortes dans leur déplacement: nécessité de traverser les routes uniquement par des bateaux de trottoir, difficulté avec des pentes trop importantes, pas d'accès à des trottoirs étroits, sensibilité à la qualité du revêtement ... Malheureusement ces contraintes ne sont pas prises en compte dans les planificateurs d'itinéraire comme Google Maps tout simplement parce qu'elles ne sont pas (ou mal) cartographiées. Or l'instrumentation du déambulateur permet d'obtenir ce type d'information: nous avons ainsi montré que l'on pouvait détecter automatiquement le passage de bateaux de trottoir (et de plus leur attribuer des notes de facilité d'usage), mesurer des pentes de route ou qualifier un trottoir selon le niveau de vibrations ressenties au niveau des poignets, toute indication éventuellement cartographiable puisque l'on dispose d'un GPS pour les situer. Nous avons alors eu l'idée de les introduire sur les cartes collaboratives d'OpenStreetMap¹ puis d'utiliser ces informations dans le planificateur. C'est ainsi que le planificateur prend en compte les bateaux et les pentes pour proposer un itinéraire adapté, évitant les fortes pentes et de longueur minimale si l'on prend en compte l'impossibilité de traverser hors des bateaux. Pour valider ce concept nous avons intégralement cartographié le site de l'INRIA de Sophia². L'intérêt de cette construction automatique réside aussi dans le caractère dynamique de son élaboration: plutôt que d'utiliser une carte statique peu souvent mise à jour, ce sont les utilisateurs de la ville qui construisent au jour le jour une carte dynamique et partagent cette information.

Par ailleurs nous avons aussi montré l'efficacité du système de détection de chute: les chutes avant/arrière sont repérées par la détection de vitesses/accélérations anormales alors que les chutes latérales le sont par des capteurs de distance qui localisent la personne par rapport au déambulateur. Après une chute une alerte est diffusée par différents canaux (vocal, wifi, GSM, infra-rouge). Nous avons aussi montré que pour le déambulateur motorisé l'utilisation des embrayages permettait de prévenir les chutes avant/arrière. L'utilisation conjointe du déambulateur et de la veste instrumentée permet de détecter de manière quasi-certaine une chute et d'en augmenter le signalement de manière importante.

3.3 Grue de transfert MARIONET-ASSIST

Le robot MARIONET-ASSIST est constitué de 6 treuils permettant d'enrouler/dérouler des câbles en kevlar. Le contrôle des longueurs des 6 câbles permet de placer une plate-forme dans l'espace et de contrôler son orientation. Ce robot a été installé au plafond de l'appartement témoin avec des longueurs de câble permettant d'atteindre quasiment toutes les positions dans cette pièce. Lorsqu'il n'est pas déployé le robot est caché dans le plafond (un mécanisme annexe permet de ne pas avoir de câbles visibles) et est totalement invisible.

¹<http://www.openstreetmap.fr/>

²la carte disponible à <http://www-sop.inria.fr/members/Jean-Pierre.Merlet//inria-part.jpg> montre les trottoirs coloriés selon leur pente et la localisation des bateaux

Notre premier but a été la possibilité d'exécuter des transferts de manière réaliste. Pour ce type d'opération il faut pouvoir placer un support de patient dans l'espace et permettre simplement une rotation du support autour de la verticale (soit libre, soit motorisée). Dans ce cas il est suffisant d'utiliser 4 câbles, ce qu'autorise la modularité de notre système, ce qui permet de soulever des charges de l'ordre de 200 kg. Des mannequins ont été utilisés pour simuler des actions lever/asseoir dans des toilettes ainsi que le transfert complet d'un handicapé de son lit vers une chaise roulante (ce qui simule aussi l'aide que le robot pourrait apporter à la manipulation de malades à l'hôpital ou pour des aides à domicile). Ce système se commande de manière très simple avec une variété d'interface: télécommande tv, joystick, boîtier dont l'inclinaison commande les mouvements du robot, tissu élastique se plaçant à volonté sur des parties encore mobiles du sujet (tête, poignet,...) et s'ajuste aux possibilités motrices du sujet en ne fournissant que l'aide nécessaire et uniquement sur demande afin de préserver un minimum d'effort musculaire. Il est aussi utilisable comme outil dans un processus de rééducation (voir la section **MARIONET-REHAB**) et peut aider au relèvement en cas de chute: c'est ainsi qu'en cas de chute détectée par le déambulateur **ANG** ou la veste instrumentée il vient se placer à proximité immédiate du sujet pour fournir un support supplémentaire.

Ce robot peut être aussi utilisé pour des opérations de manipulation d'objets. Nous avons ainsi procédé à la récupération de clés tombés au sol (ce qui évite au sujet d'avoir à se pencher, position propice à une chute) et de couverts récupérés à la cuisine et ramenés à la table de déjeuner (la cuisine de l'appartement est équipée de systèmes permettant l'ouverture automatique des tiroirs et du réfrigérateur). Pour le moment ces manipulations sont contrôlées par le sujet mais nous en développons actuellement une version automatique où un système de vision permet de récupérer automatiquement les objets, le sujet se contentant de désigner l'objet à prendre, ceci dans le cadre d'une collaboration avec le projet **INRIA LAGADIC** de Rennes.

Ce robot est une alternative intéressante au système de transfert existant actuellement (principalement des rails placés au plafond ou des robots mobiles de taille imposante) car son coût est très faible, son intrusivité est très réduite, il peut être installé dans n'importe quelle pièce (les robots mobiles de taille suffisante pour faire des opérations de transfert ne sont pas manoeuvrables dans les toilettes) et enfin il offre d'autres services que les opérations de transfert.

3.4 Robot de rééducation **MARIONET-REHAB**

Ce robot est du type robot parallèle à câbles avec un total maximum de 14 câbles: 7 d'entre eux sont motorisés (on peut en contrôler la longueur ou la tension) et 7 sont passifs (leurs longueurs s'ajustent automatiquement aux déplacements de l'objet auquel ils sont attachés). Nous avons conçu ce robot pour un fonctionnement selon 3 modes:

- *passif*: le robot suit le mouvement des objets auxquels ils sont accrochés et la mesure des longueurs des câbles permet de calculer la position des objets dans l'espace
- *semi-actif*: certains des câbles motorisés sont programmés pour exercer une force dans une direction particulière tout en suivant le mouvement d'ensemble des objets
- *actif*: les câbles motorisés imposent des déplacements aux objets

La mise en place de ces trois modes résultent des travaux que nous avons commencé pour la rééducation. Nous avons en particulier traité du problème de la rééducation des membres supérieurs après un AVC. Un protocole de rééducation classique consiste à demander au sujet de déplacer, bras tendu, un doigt pointé selon la ligne droite entre deux tâches de couleur projetées sur un écran. La quantification de la coordination du bras se fait en estimant visuellement l'écart entre la ligne droite et le mouvement du doigt. Bien entendu une telle estimation est très peu objective et ne permet pas une mesure quantifiable. Nous avons alors placé le robot en mode passif et accroché 6 câbles au poignet de l'utilisateur, ce qui nous permet de mesurer exactement la trajectoire suivie. De cette trajectoire on peut extraire des informations quantitatives qui permettent, par exemple, de mesurer les évolutions entre deux séances. Un tel exercice, réalisé bras tendu, est toutefois rapidement fatigant. Dans

une deuxième série d'expériences nous sommes passés en mode semi-actif en faisant appliquer par le robot une force verticale qui compense partiellement la gravité. L'effort musculaire est donc concentré sur la réalisation de la trajectoire et les séances peuvent durer plus longtemps. Potentiellement on pourrait aussi utiliser le mode actif pour que le robot impose un mouvement correctif au bras si celui-ci s'écarte trop de la ligne droite. Nous n'avons toutefois pas réalisé ce type d'essai pour des raisons de sécurité.

Un autre d'expérience réalisée porte sur la détermination fine des mouvements de l'articulation du genou sur des séquences de marche ou de course. Outre son mouvement de flexion, de grande ampleur, cette articulation présente aussi des mouvements de translation et d'orientation. Ces mouvements, de faible ampleur, sont très difficiles à mesurer car tout capteur placé en externe mesurera à la fois les mouvements des os mais aussi les mouvements de la peau dont l'amplitude peut être du même ordre de grandeur, voire largement supérieure, à celle des os (sauf à procéder à l'implantation dans les os de marqueurs, technique évidemment lourde, qui de plus ne peut être utilisée qu'en statique ou à des vitesses faibles et dans un volume réduit). Pour éliminer l'effet de la peau nous avons installé sur le mollet et la cuisse deux colliers articulés, équipés de capteur de pression à l'interface peau/collier, sur lesquels nous avons accroché les 14 câbles de **MARIONET-REHAB** ainsi que des accéléromètres. Le sujet est placé sur un tapis de marche (dont la pente est réglable, voir la section **MARIONET-VR**) et peut effectuer des exercices de marche ou de course à différentes allures, des capteurs de pression plantaire permettant de plus de déterminer les forces de contact avec le tapis de marche [5, 6, 3, 7, 4, 14, 13]. Nous avons réalisé plusieurs séances de recueil de données pour différents sujets et différents types d'exercice. Les résultats préliminaires semblent indiquer qu'effectivement une telle installation permet de corriger au moins partiellement les effets de déformation de la peau mais sont encore à confirmer.

Une version allégée de ce dispositif peut être utilisée pour la rééducation à domicile ou pour le suivi de l'activité. En effet les médecins n'ont pas accès à "l'invisible", qui est l'activité à domicile. En particulier ils n'ont pas de possibilité de quantifier objectivement la réalisation d'un exercice prescrit. Une instrumentation légère du tapis de marche, ou d'autres engins, le permettrait, avec éventuellement la possibilité de détecter des anomalies dans la réalisation de l'exercice.

3.5 Robot de rééducation **MARIONET-VR**

C'est la dernière plate-forme en cours d'élaboration dans ce projet. Elle est constituée du robot parallèle à câbles **MARIONE-VR** qui permet de déplacer une charge d'environ 200 kg dans un espace de 12X6x3 mètres, d'un robot parallèle classique pouvant supporter 250 kg et de deux colonnes motorisées pouvant soulever chacune 150 kg. L'ensemble de ce matériel sera placé dans la salle immersive de l'INRIA de Sophia. L'objectif est de compléter le retour vers l'utilisateur de la salle immersive, qui est purement visuel (aucun mouvement, pas de sensation tactile), par une plate-forme qui pourra provoquer des mouvements du sujet lui-même ou lui fournir un retour tactile (par le robot **MARIONET-VR**) ainsi que provoquer un mouvement de son environnement (le robot parallèle et les colonnes) cohérent avec le contexte. Des essais préliminaires de mouvement du tapis de marche ont été réalisés et le robot à câbles est en cours d'installation dans la salle immersive.

Comme on peut le constater les robots parallèles, en particulier ceux à câbles, sont centraux dans notre activité. Cela s'explique par leur capacité de levage, leur efficacité énergétique et leur caractère très peu intrusif, particulièrement adapté aux problèmes que nous traitons. Il reste cependant encore de nombreux problèmes théoriques non résolus dans cet axe [17, 21], problèmes qui ont fait l'objet d'une intense activité de publications [1, 2, 8, 11, 10, 9, 12, 24, 18, 16, 20, 19]

4 Collaborations

4.1 Robot de sauvetage

Nous attachons une importance très forte à la validation de nos concepts par le personnel de terrain. C'est ainsi que nous avons contacté le Groupement d'Intervention en Milieux Périlleux (GRIMP) du SDIS 06 pour

leur montrer le matériel. Après un premier passage où ces pompiers nous ont suggéré d'ajouter certaines fonctionnalités, nous leur avons montré une deuxième version qui a recueilli une accueil très favorable. Nous avons alors contacté le pôle Risques qui nous a permis de présenter le matériel à ces adhérents en fin 2011. Pour ce qui nous concerne nous estimons que le concept est validé et nous recherchons activement un partenaire industriel qui pourrait en assurer la fabrication et la distribution. Il existe cependant peu d'industriels dans ce domaine et nous allons approcher la société italienne KONG, qui est une des deux sociétés européennes spécialisées dans le matériel de sauvetage, en particulier en montagne.

Notre participation au projet européen Cablebot nous a aussi permis d'entrer en contact avec différents partenaires industriels susceptibles d'utiliser ce type de système: EADS pour la maintenance d'avions et les sociétés espagnoles ACCIONA et VICINAY (engin de levage et manutention en construction).

4.2 Déambulateurs ANG

Notre première collaboration avec le déambulateur a été de préparer son utilisation comme caddy de shopping par le projet INRIA AROBAS. Il s'agit d'utiliser un système de vision qui permet au caddy de suivre automatiquement son utilisateur. Toutefois s'est très rapidement esquissée une collaboration très active avec le Centre de Mémoire de l'hôpital Cimiez. Les résultats préliminaires de l'analyse des trajectoires du déambulateur ont vivement intéressé les praticiens: il a donc été décidé de procéder à une expérience de grande ampleur avec des patients volontaires du CHU pour finaliser des indicateurs pertinents de l'état de santé des patients. Pour cela **ANG-light** a été mis à disposition du CHU et une demande d'autorisation d'expérimentation a été déposée auprès du CPP: malheureusement cette procédure a pris quasiment deux ans. Les patients sont en cours de recrutement et les essais ont commencé en Septembre 2012. Clairement cette action a permis d'établir une relation de confiance et de long terme avec le Centre de Mémoire (qui s'est d'ailleurs concrétisée sur d'autres projets, voir la section "Monitoring").

Cette approche de l'analyse de la marche nous a permis d'établir une collaboration avec le laboratoire HAND-IBIO de Toulon³, spécialisé en biomécanique, dans le but d'analyser très finement la marche avec déambulateur, d'affiner les indicateurs synthétiques utilisables par les médecins et de mieux comprendre comment qualifier la marche sans déambulateur avec les mesures obtenues lors d'essais avec ce matériel.

Du point de vue industriel nous élaborons avec la société Robopec, située dans le Var, une réponse à l'appel pour le Pre-Commercial Procurement (PCP) du projet SILVER⁴ dont le but serait de financer une version pré-industrielle de **ANG-light** qui serait testé par des utilisateurs dans cinq pays européens.

4.3 Grue de transfert MARIONET-ASSIST

A l'heure actuelle le robot **MARIONET-ASSIST** remplit deux rôles:

- un outil d'étude des robots parallèles à câbles qui posent encore de nombreux problèmes théoriques. La disponibilité permanente de ce robot, en salle protégée, sa modularité nous permet de valider nos travaux théoriques en commande, conception modulaire, adaptation à la tâche, ...
- un démonstrateur à forte visibilité auprès des utilisateurs potentiels et du grand public. Il a été présenté à un très large éventail (individuels, association d'handicapés comme l'APF, personnel médical, ...) et a reçu un accueil très favorable d'autant que sa simplicité d'utilisation nous permet de faire manipuler avec le robot par tous les publics (à l'heure actuelle notre plus jeune expérimentateur avait 7 ans et le plus âgé 73 ans)

Toutefois son caractère extrêmement novateur par rapport aux solutions existantes et sa nature encore expérimentale ne permet que de le partager avec des partenaires académiques. C'est ainsi que nous collaborons avec le projet

³cette collaboration s'est concrétisée par l'accueil d'une chercheuse de HANDIBIO dans le projet COPRIN pendant deux ans

⁴<http://www.silverpcp.eu/>

INRIA LAGADIC de Rennes sur les aspects manipulation automatique et que nous avons débuté une relation avec le CSTB pour un transfert vers un autre appartement expérimental.

Une étape clé reste encore à franchir avant de s'approcher d'industriels: la validation avec des sujets humains. Toutefois notre expérience de CPP avec le déambulateur *ANG-light*, n'ajoutant pourtant aucun risque supplémentaire à l'utilisateur, laisse à penser qu'une autorisation d'expérience avec *MARIONET-ASSIST* sera le résultat d'un processus long. Un point satisfaisant est que différentes institutions se sont déclarées volontaires pour des tests en vrai grandeur (par exemple le centre de Kerpape à Ploemeur).

4.4 Robot de rééducation *MARIONET-REHAB*

Des collaborations académiques pour l'utilisation de ce robot se sont établies avec l'ENI de Sousse (Pr. Romdhane), l'Université de Bologne (Pr. Parenti-Castelli, Dr. Carricato, avec un séjour de longue durée de celui-ci dans notre équipe) et l'Université de Cassino (Pr. Cecarelli). Nous procédons avec prudence à l'extension de l'ouverture de cette plate-forme car il s'agit d'un matériel très sophistiqué (plus de 200 capteurs, une dizaine d'ordinateurs, un espace de stockage dédié et protégé) qui doit faire encore l'objet de développement avant d'être offert à des partenaires, même académiques.

Pour ces mêmes raisons nous ne désirons pas encore étendre cette ouverture vers la communauté médicale même si nous y sommes incité par nos partenaires du CHU. A fortiori une possibilité de transfert industriel est encore prématurée.

4.5 Robot de rééducation *MARIONET-VR*

Cette plate-forme est encore trop récente pour avoir conduit à des collaborations. Toutefois une expérimentation commune est déjà planifiée pour la fin de l'année 2012 avec les projets INRIA REVES (Sophia) et VR4i (Rennes) qui partageront avec nous un post-doctorant. Il s'agira de simuler une marche dans des environnements divers en complétant le retour visuel par des mouvements du tapis de marche et de simuler des sauts. L'étape suivante sera de collaborer avec les ergothérapeutes travaillant déjà avec REVES pour le traitement des phobies pour examiner dans quelle mesure l'adjonction d'information tactile ou de mouvement au retour visuel 3D pourrait améliorer le traitement.

4.6 Monitoring

Les contacts avec le CHU pour l'usage du déambulateur ont conduit à la mise en place d'une autre expérience en commun: le monitoring d'activité. Des matériels de suivi d'activité (prise d'objets, mise en marche d'appareil électrique, usage d'une télécommande), initialement implantés dans l'appartement témoin, ont été dupliqués pour être installés au CHU dans le cadre du projet Dem@care. Ils permettent un suivi temporel très fin de nombreuses activités, ce qui permet d'évaluer les capacités cognitives et motrices des patients ainsi que les tendances. Incorporés à un environnement de la vie quotidienne ils devraient permettre un meilleur suivi de l'activité des patients à domicile, complétant ainsi l'approche reposant sur la vision par ordinateur que propose dans ce cadre le projet INRIA STARS.

4.7 Action d'envergure *PAL*

L'action d'envergure INRIA Personally Assisted Living (*PAL*) regroupe 9 projets de l'INRIA et des partenaires extérieurs qui ont décidé de travailler conjointement sur le thème de l'assistance à la personne. Cette action, initiée à Sophia, qui a débuté en 2011, bénéficiera des installations élaborées dans le cadre de ce CPER. En particulier les partenaires locaux (équipes INRIA COPRIN, STARS, PULSAR, équipe RAINBOW de l'Université de Nice, CHU, CSTB, HANDIBIO) bénéficient de l'appartement témoin comme installation de mise au point et pourront ensuite profiter d'un environnement d'expérimentation réaliste dans un espace réservé de l'EPHAD de Valrose, en cours de construction. Localement l'action *PAL* interagit avec le Centre d'Innovation et d'Usage

en Santé (CIU-Santé) de Nice, et nationalement avec le Centre National de Référence Santé à Domicile & Autonomie et le Centre d'Expertise National en Robotique (CENROB, Montpellier).

4.8 Outil d'enseignement

Un à côté, non prévu initialement, des installations de ces plate-formes a découlé des multiples visites d'élèves et étudiants dans notre installation. Ceux-ci, souvent réfractaires aux mathématiques et à la science en général, se sont souvent passionnés pour des systèmes avec lesquels ils pouvaient interagir, leurs questions et leurs interrogations amenant les chercheurs à leur faire découvrir des concepts scientifiques d'un niveau bien au delà de leur formation (et parfois même bien au delà du niveau de leur professeur ...), ceci pas seulement en robotique mais en mathématiques, en automatique, en informatique ou en réseau. Cette constatation nous a conduit à proposer l'élaboration d'un robot parallèle à câbles de coût faible (quelques centaines d'euros au plus), de construction aisée (élaborable dans une classe), très visuel (tout le matériel est accessible et les mouvements peuvent être de grande ampleur, par exemple à travers la classe complète), léger et transportable et qui pourrait être utilisé par des enseignants de tout niveau, non roboticien, pour illustrer visuellement des concepts de tout ordre: mathématiques, informatiques, de communication, d'automatique, mécanique. Le robot serait accompagné de notices pédagogiques qui indiqueraient, domaine par domaine, des possibilités de manipulation amenant à illustrer des concepts scientifiques, sans qu'il soit nécessaire d'être expert en robotique pour faire fonctionner cette maquette pédagogique. Une première maquette a été élaborée et nous avons reçu un soutien supplémentaire de l'association Animath qui nous a permis d'élaborer un autre prototype en utilisant des composants LEGO. Les versions préliminaires ont fortement intéressés le distributeur Génération Robot⁵ qui nous a proposé d'en finaliser à terme une version distribuable commercialement. Nous prévoyons de tester ce concept lors de la prochaine Fête de la Science 2012 en illustrant avec ce robot des concepts d'informatique très avancé. En effet les systèmes d'assistance et de rééducation développés dans le cadre de ce CPER sont des objets communicants, qui doivent pouvoir réaliser des tâches de manière collaborative. Il se pose alors la question de savoir dans quel cadre global on peut programmer de manière commode et unifiée tous ces agents, très hétérogènes d'un point de vue matériel et informatique (smart phones, tablettes, systèmes embarqués de puissance très variable). C'est justement l'axe de recherche du projet INRIA INDES qui se charge de la programmation du robot pour les démonstrations de la Fête de la Science, premier exercice avant une montée en puissance culminant avec la prise en charge de la programmation de l'ensemble des dispositifs de l'appartement témoin. L'ouverture du campus SophiaTech est aussi une opportunité pour tester cette maquette pédagogique en collaboration avec l'Université de Nice.

5 Conclusion

Les financements obtenus dans le cadre de ce CPER nous ont permis d'élaborer des plate-formes résolument très novatrices, conformes et même excédant le programme de travail. En dépit d'une existence relativement courte ces plate-formes ont permis de placer Sophia comme un acteur majeur au niveau mondial pour ce qui concerne la rééducation et l'assistance à la personne, ce qui se traduit par de multiples invitations de participation à différents événements de nature aussi bien académique, médicale, de transfert, industrielle ou de dissémination grand public, que ce soit localement, nationalement ou à l'international.

De multiples collaborations ont été établies au niveau académique mais aussi avec la communauté médicale, le CHU de Nice en étant un élément moteur. Il faut mentionner le caractère très transversal de ces collaborations qui font appel à une panoplie très large de domaines scientifiques, aussi bien en "sciences dures" qu'en sciences humaines et sociales (SHS). Nous sommes très conscient que les SHS joueront un rôle important dans l'aspect visuel des dispositifs, dans l'ergonomie des interfaces et dans le processus d'acceptation. Nous avons d'ailleurs approché des écoles de design ainsi que laboratoires SHS de l'Université de Nice dans ce but.

⁵<http://www.generationrobots.com>

Les résultats sont plus mitigés au niveau industriel mais les constantes de temps dans ces domaines sont longues et les plate-formes ont été conçus volontairement avec une longue durée de vie. Cette relative lenteur dans le transfert s'explique aussi par la nécessité absolue d'une validation expérimentale avec des personnes fragiles. Leur recrutement et la mise en place de ce type d'expérience sont particulièrement lourds, avec un processus légal, dont on comprend les fondements, mais qui manque de souplesse par rapport aux risques additionnels, conduisant à des temps d'obtention des autorisations bien supérieurs à ceux observés ailleurs, par exemple aux États-Unis. Nous comptons par ailleurs être des partenaires actifs dans le transfert, non seulement en collaborant fortement avec les industriels du domaine sur le plan technique mais aussi en partageant les leçons que nous avons tirées de nos contacts avec les utilisateurs finaux et la communauté médicale. De plus deux de nos doctorants en fin de thèse considèrent déjà la possibilité d'une création de start-ups qui exploiteraient certains de nos résultats: dans ce domaine même un produit très spécifique peut assurer le développement de ce type de société, vu l'ampleur du marché.

Le caractère visuel et sociétal des domaines traités est aussi favorable à des démonstrations grand public et de dissémination. C'est ainsi que dans ces deux dernières années plus de 350 visiteurs ont été accueillis pour assister à nos démonstrations avec une grande diversité y compris de pays.

Pour conclure ce CPER nous a permis de poser les bases d'un travail de fond et de longue haleine sur ce thème passionnant avec un impact potentiel très important du point de vue sociétal. Il reste à espérer que les industriels français se saisissent de cette opportunité actuellement encore très ouverte pour devenir des leaders mondiaux dans ces domaines.

References

- [1] Alexandre dit Sandretto J., Daney D., et Gouttefarde M. Calibration of a fully-constrained parallel cable-driven robot. In *Romansy*, pages 12–41, Paris, 12-15 Juin 2012.
- [2] Alexandre dit Sandretto J., Trombettoni G., et Daney D. Confirmation of hypothesis on cable properties for cable-driven robots. In *4th European Conf. on Mechanism Science (Eucomes)*, pages 85–94, Santander, 19-21 Septembre 2012.
- [3] Bennour S., Harshe M., Romdhane L., et Merlet J-P. A robotic application for analysis and control of human motion. In *4eme Congrès International Conception et Modélisation des Systèmes Mécaniques CMSM*, Sousse, 30 Mai-1 Juin 2011.
- [4] Bennour S., Harshe M., Romdhane L., et Merlet J-P. A new experimental setup based on a parallel cable robot for analysis and control of human motion. *Journal of Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 14(Supplement 1):83–85, Août 2011.
- [5] Bennour S., Romdhane L., et Merlet J-P. Contrôle du membre inférieur pour un mouvement de la marche. In *CMSM*, Hammamet, 16-18 Mars 2009.
- [6] Bennour S., Romdhane L., et Merlet J-P. Application robotique pour la rééducation fonctionnelle de la cheville. In *Congrès Français de Mécanique*, Marseille, 24-28 Août 2009.
- [7] Bennour S., Romdhane L., Merlet J-P., et Harshe M. Nouvelle machine robotisée à base d'une plateforme à câbles pour la rééducation fonctionnelle. In *20ème Congrès Français de Mécanique*, Besançon, 28 Août-2 Septembre 2011.
- [8] Berti A., Merlet J-P., et Carricato M. Solving the direct geometrico-static problem of the 3-3 cable-driven parallel robots by interval analysis: preliminary results. In *1st Int. Conf. on cable-driven parallel robots*, pages 251–268, Stuttgart, 3-4 Septembre 2012.

- [9] Carricato M., Abbasnejad G., et Walter D. Inverse geometrico-static analysis of under-constrained cable-driven parallel robots with four cables. In *ARK*, pages 365–372, Innsbruck, 25-28 Juin 2012.
- [10] Carricato M. et Merlet J-P. Direct geometrico-static problem of under-constrained cable-driven parallel robots with three cables. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 3011–3017, Shanghai, 9-13 Mai 2011.
- [11] Carricato M. et Merlet J-P. Geometrico-static analysis of under-constrained cable-driven parallel robot. In *ARK*, pages 309–320, Piran, 28 Juin-1 Juillet 2010.
- [12] Gouttefarde M., Daney D., et Merlet J-P. Interval-analysis based determination of the wrench-feasible workspace of parallel cable-driven robots. *IEEE Trans. on Robotics*, 27(1):1–13, Février 2011.
- [13] Harshe M. *Analyse et conception d'un système de rééducation de membres inférieurs reposant sur un robot parallèle à câbles*. Thèse de doctorat, Université de Nice, Nice, Novembre 2012.
- [14] Harshe M., Merlet J-P., Daney D., et Bennour S. A multi-sensors system for human motion measurement: Preliminary setup. In *13th IFToMM World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms*, Guanajuato, 19-25 Juin 2011.
- [15] Merlet J-P. Preliminary design of ANG, a low-cost automated walker for elderly. In *3rd European Conf. on Mechanism Science (Eucomes)*, Cluj-Napoca, 14-17 September 2010.
- [16] Merlet J-P. On the accuracy of n-1 wire-driven parallel robots. In *Romansy*, pages 1–10, Paris, 12-15 Juin 2012.
- [17] Merlet J-P. Wire-driven parallel robots: open issues. In *Romansy*, Paris, 12-15 Juin 2012.
- [18] Merlet J-P. The kinematics of the redundant n-1 wire driven parallel robot. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 2313–2318, Saint Paul, 14-18 Mai 2012.
- [19] Merlet J-P. Comparison of actuation schemes for wire-driven parallel robots. In *4th European Conf. on Mechanism Science (Eucomes)*, pages 245–254, Santander, 19-21 Septembre 2012.
- [20] Merlet J-P. Managing the redundancy of N-1 wire-driven parallel robots. In *ARK*, pages 405–412, Innsbruck, 25-28 Juin 2012.
- [21] Merlet J-P. Unsolved issues in kinematics and redundancy of wire-driven parallel robots. In *1st Int. Conf. on cable-driven parallel robots*, Stuttgart, 3-4 Septembre 2012.
- [22] Merlet J-P. Kinematic analysis of a spatial four-wire driven parallel crane without constraining mechanism. In *Computational Kinematics*, pages 1–8, Duisburg, 6-8 Mai 2009.
- [23] Merlet J-P. Activities of the inria project-team coprin in at-home assistance. In *European Robotics Forum*, Vasteras, 6-8 Avril 2011.
- [24] Merlet J-P. MARIONET, a family of modular wire-driven parallel robots. In *ARK*, pages 53–62, Piran, 28 Juin-1 Juillet 2010.
- [25] Merlet J-P. Mechanism science and assistance to elderly. In *4eme Congrès International Conception et Modélisation des Systèmes Mécaniques CMSM*, Sousse, 30 Mai-1 Juin 2011.
- [26] Merlet J-P. et Daney D. A portable, modular parallel wire crane for rescue operations. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 2834–2839, Anchorage, 3-8 Mai 2010.