

Projet ANR-12-TECS-00XX

VHIPOD

Programme TecSan 2012

A	IDENTIFICATION.....	2
B	RESUME CONSOLIDE PUBLIC	2
B.1	Instructions pour les résumés consolidés publics	Erreur ! Signet non défini.
B.2	Résumé consolidé public en français	2
B.3	Résumé consolidé public en anglais.....	4
C	MEMOIRE SCIENTIFIQUE	5
C.1	Résumé du mémoire	5
C.2	Enjeux et problématique, état de l'art	6
C.3	Approche scientifique et technique	7
C.4	Résultats obtenus	9
C.5	Exploitation des résultats	11
C.6	Discussion	11
C.7	Conclusions.....	12
C.8	Références.....	12
D	LISTE DES LIVRABLES	12
E	IMPACT DU PROJET	14
E.1	Indicateurs d'impact	14
E.2	Liste des publications et communications.....	15
E.3	Liste des éléments de valorisation.....	16
E.4	Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires)	17

Ce document est à remplir par le coordinateur en collaboration avec les partenaires du projet. L'ensemble des partenaires doit avoir une copie de la version transmise à l'ANR.

Ce modèle doit être utilisé uniquement pour le compte-rendu de fin de projet.

A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	VHIPOD
Titre du projet	Véhicule de transport en station debout individuel auto-équilibré pour personne handicapée avec aide à la verticalisation
Coordinateur du projet (société/organisme)	CHRU de Brest
Période du projet (date de début – date de fin)	1 ^o janvier 2012, 30 juin 2017
Site web du projet, le cas échéant	

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	Pr Olivier Rémy-Néris
Téléphone	+33298223152
Adresse électronique	Olivier.remy-neris@univ-brest.fr
Date de rédaction	27 décembre 2017

Si différent du rédacteur, indiquer un contact pour le projet	
Civilité, prénom, nom	
Téléphone	
Adresse électronique	

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	CHRU de Brest Olivier Rémy-Néris Université Valenciennes Laurent Vermeiren BA systèmes Julien Cau CEREMH Claude Dumas CRMF Kerpape Jacques Kerdraon
---	---

B RESUME CONSOLIDE PUBLIC

B.1 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN FRANÇAIS

VHIPOD : un véhicule pour supprimer le fauteuil roulant des personnes handicapées

Réaliser un verticalisateur motorisé qui permette aux personnes hémiplegiques de se déplacer

La vie des personnes physiquement atteintes et ne pouvant plus marcher est marquée par l'usage d'un fauteuil roulant. Passer dans son fauteuil et en sortir est fatigant et utiliser un fauteuil nécessite d'adapter son logement pour que tout soit accessible. VHIPOD a pour objectif de lever ces problèmes en construisant grâce à un partenariat entre des académiques et un industriel de la robotique, un véhicule permettant de se lever, de se transporter en position debout et de se rasseoir comme une personne non handicapée. Le premier problème fut de définir le moyen d'aide à la verticalisation et de définir les accessoires permettant à un sujet de se mettre debout tout en commandant le dispositif. Trouver la bonne trajectoire de cette tablette et la vitesse appropriée tout en assurant la sécurité de la personne handicapée fut au cœur du projet afin de paramétrer les éléments nécessaires à construire le VHIPOD. Ce véhicule devant avoir un minimum d'esthétique tout en ayant un encombrement le plus faible possible au sol tout en assurant la station debout de façon sécurisée, a nécessité un

travail de modélisation puis de réalisation complexe. La phase finale devait s'assurer de l'usage adapté du véhicule par la population handicapée cible.

Une réalisation complexe dans un compromis volume-sécurité-puissance

Le point de départ fut le choix du mode d'aide à la verticalisation constitué d'une tablette sur laquelle le sujet s'accouderait grâce à une poignée et pourrait ainsi être hissé en position verticale depuis n'importe quelle place. Trouver la trajectoire et la vitesse optimale pour la tablette a nécessité la réalisation d'un banc d'essais dont les mesures ont permis d'une part de vérifier la validité du processus de verticalisation auprès de la population cible. Si la trajectoire semblait avoir une faible influence sur les personnes, la vitesse devait être la plus rapide possible. Puis l'architecture du robot de verticalisation dû être calculée pour répondre aux exigences définies par le banc d'essai. Un compromis entre taille des actionneurs, puissance nécessaire à la verticalisation et esthétique de l'ensemble permis de réaliser ce robot dont l'architecture dû aussi prendre en compte la nécessaire adaptation à la taille de chaque sujet afin de permettre une verticalisation complète. L'ensemble fut monté sur une plateforme mobile à 6 roues assurant stabilité et mobilité maximum par des roues motorisées situées en position centrale. Puis les essais ont permis de trouver les limites d'application d'un tel système dans une population d'hémiplégiques et de relever leur satisfaction sur l'usage du dispositif et de ses différentes fonctions.

Résultats

L'essai du VHIPOD auprès de 30 personnes hémiplégiques et 15 sujets témoins a permis d'identifier le très bon fonctionnement du dispositif, l'excellente adaptabilité à la taille du sujet malgré un processus complexe. La satisfaction des usagers était très bonne sur la plupart des fonctions et leur apprentissage était facile pour la plupart des usagers. Les deux principales limites du dispositif sont l'impossibilité d'usage pour les personnes les plus handicapées (tout en modérant ce résultat par le fait que l'essai n'était réalisé qu'une seule fois pour chaque personne) et que l'usage du VHIPOD pour se rasseoir est compliqué par le fait qu'aucune assistance à la marche arrière (caméra de recul par exemple) n'a été mise en place pour faciliter cette manœuvre.

Production scientifique et brevets

Le dispositif de verticalisation n'a pu être breveté en raison du caractère assez proche de certains dispositifs mécaniques dont les principes assez différents avaient pour résultat un dispositif conceptuellement proche.

Pour l'instant 2 articles dans une revue internationale ont été publiés par la partie modélisation. 2 autres articles devraient être soumis fin 2017 et début 2018 sur les résultats de l'évaluation.

8 publications ont été faites en conférences internationales et 6 en conférences nationales



Informations factuelles

Le projet VHIPOD est un projet de recherche technologique coordonné par Olivier Rémy-Néris. Il associe aussi BA Healthcare, ADM Concept, le CEREHM, le centre de rééducation de KERPAPE ainsi que des laboratoires LaTIM (INSERM 1101 Université de Bretagne occidentale) et LAMIH (CNRS 8201 Université de Valenciennes). Le projet a commencé en janvier 2012 et a duré 54 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 1023950 € pour un coût global de l'ordre de 2 440 521€ hors frais de gestion.

B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS

VHIPOD: a vehicle to remove the wheelchair from people with disabilities

Enabling people with disabilities to stand and move.

The lives of those physically affected and unable to walk are marked by the use of a wheelchair. Getting in and out of the chair is tiring and using an wheelchair requires adapting your home so that everything is accessible. VHIPOD aims to overcome these problems by building, through a partnership between academics and robotics industry, a vehicle to get up, to move in a standing position and to rest as a non-disabled person. The first problem was to define the means of help for sit to stand and to define the accessories allowing a subject to stand up while controlling the device. Finding the right trajectory of this tablet and the appropriate speed while ensuring the safety of the disabled person was at the heart of the project in order to set the elements necessary to build the VHIPOD. This vehicle must have a minimum of aesthetics while having the smallest footprint possible on the ground while ensuring the standing up in a secure way, required modeling work and complex realization. The final phase was to ensure the adapted use of the vehicle by the target disabled population.

A complex realization in a volume-security-power compromise

The starting point was the choice of the verticalization mode consisting of a tablet on which the subject would accede with a handle and could thus be hoisted upright from any place. Finding the optimal trajectory and speed for the tablet was obtained on a test bench whose measurements made it possible on the one hand to verify the validity of the verticalization process with the targetted population. If the trajectory seemed to have a weak influence on the people, the speed should be as fast as possible. Then the architecture of the verticalization robot had to be calculated to meet the requirements defined by the test bench. A compromise between the size of the actuators, power necessary for the verticalization and aesthetics of the assembly allowed to realize this robot whose architecture also had to take into account the necessary

adaptation to the size of each subject to allow a complete verticalization. The set was mounted on a mobile platform with 6 wheels ensuring stability and maximum mobility by motorized wheels located in central position. Then the tests made it possible to find the limits of application of such a system in a population of hemiplegics and to note their satisfaction on the use of the device and its various functions.

Results

The VHIPOD was tested by 30 hemiplegic patients and 15 control subjects. This allowed to identify the very good functioning of the device, the excellent adaptability to the size of the subject despite a complex process. User satisfaction was very good on most functions and their learning was easy for most users. The two main limitations of the device are the impossibility of use for the most disabled persons (while moderating this result by the fact that the test was performed only once for each person) and that the use of the VHIPOD to drive back to a seat is complicated by the fact that no assistance to reverse (rearview camera for example) has been implemented to facilitate this maneuver.

Scientific production and patents

The verticalization device could not be patented because of the rather close character of certain mechanical devices whose rather different principles resulted in a conceptually close device.

For the moment 2 articles in an international journal have been published by the modeling part. 2 other articles should be submitted in late 2017 and early 2018 on the results of the evaluation.

8 publications were made in international conferences and 6 in national conferences.

C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

Mémoire scientifique confidentiel : non

C.1 RESUME DU MEMOIRE

VHIPOD a pour objectif de lever les problèmes liés à l'usage du fauteuil roulant en construisant grâce à un partenariat entre des académiques et un industriel de la robotique, un véhicule permettant de se lever, de se transporter en position debout et de se rasseoir comme une personne non handicapée. Les étapes furent de définir:

- le moyen d'aide à la verticalisation
- les accessoires permettant la commande des différentes fonctions du dispositif
- la trajectoire et la vitesse les plus adaptées aux personnes handicapées de cette tablette.
- Assurer une esthétique tout en minimisant l'encombrement tout en assurant la station debout sécurisée
- S'assurer de l'usage adapté du véhicule par la population handicapée cible.

Après le choix d'une tablette comme surface d'appui coude fléchi et main libre agrippée à une poignée, la trajectoire et la vitesse optimale de la tablette ont été définies grâce à la

réalisation d'un banc d'essais. Les expérimentations sur ce banc ont permis de vérifier la validité du processus de verticalisation auprès de la population cible pour laquelle la vitesse maximum utilisée était la plus confortable quelle que soit la trajectoire. L'architecture du robot de verticalisation fut calculée pour répondre aux exigences de vitesses, de trajectoire dans un compromis entre taille des actionneurs, puissance nécessaire à la verticalisation et esthétique de l'ensemble. L'architecture du robot a été conçue pour s'adapter à la taille de chaque sujet afin de permettre une verticalisation complète. L'ensemble monté sur une plateforme mobile à 6 roues assurant stabilité et mobilité maximum par des roues motorisées situées en position centrale constituait le VHIPOD.

L'essai du VHIPOD auprès de 30 personnes hémiplegiques et 15 sujets témoins a permis d'identifier le très bon fonctionnement du dispositif, l'excellente adaptabilité à la taille du sujet malgré un processus complexe. La satisfaction des usagers était très bonne sur la plupart des fonctions et leur apprentissage était facile pour la plupart des usagers. Les deux principales limites du dispositif sont l'impossibilité d'usage pour les personnes les plus handicapées (tout en modérant ce résultat par le fait que l'essai n'était réalisé qu'une seule fois pour chaque personne) et que l'usage du VHIPOD pour se rasseoir est compliqué par le fait qu'aucune assistance à la marche arrière (caméra de recul par exemple) n'a été mise en place pour faciliter cette manœuvre.

Production scientifique et brevets

Le dispositif de verticalisation n'a pu être breveté en raison du caractère assez proche de certains dispositifs mécaniques dont les principes assez différents avaient pour résultat un dispositif conceptuellement proche.

Pour l'instant 2 articles dans une revue internationale ont été publiés par la partie modélisation. 2 autres articles devraient être soumis fin 2017 et début 2018 sur les résultats de l'évaluation.

8 publications ont été faites en conférences internationales et 6 en conférences nationales

C.2 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART

Aides à la marche avec une assistance au PAD

De nombreux systèmes d'aide à la marche ont été développés. Très souvent ils associaient comme dans Monimad (Saint-Bauzel, Pasqui et al 2007 ; Saint-Bauzel, Pasqui et al 2009..) une aide à la verticalisation et à la marche. Conçu sur le concept d'un déambulateur, il effectue une aide pour le PAD en exerçant un effort contrôlé sur toutes les articulations du déambulateur Care-o-bot (Graf 2009) est une plate-forme plus complète qui aide la verticalisation par un guidon motorisé placé en face du sujet. Il est davantage fondé sur le principe d'une base mobile autonome. Ces projets s'adressent essentiellement à des patients ayant des troubles de l'équilibre mais relativement peu de déficit moteur.

Exosquelettes

Les exosquelettes sont des systèmes fondés sur le principe de l'orthèse motorisée et autonome, portée par le sujet pour faciliter la marche. HAL (Hybrid Assistive Limb) intègre l'activité EMG volontaire du sujet dans le contrôle du robot et particulièrement pendant le PAD (Lee et Sankai 2002). Il



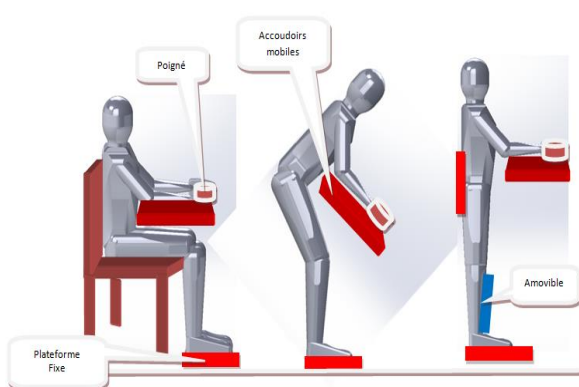
peut aussi utiliser un mouvement d'anticipation du tronc pour déclencher le PAD (Tsukahara, Kawanishi et al. 2010). De nombreux autres projets ont été développés principalement à des fins militaires (Exohiker de Berkeleybionics, Raytheon XOS 2, Hercule de la DGA ...). Certains d'entre eux ont des développements médicaux (eLEGS de Berkeleybionics, Rewalk de Argo Medical Technologies). Une des difficultés de ces applications médicales est leur coût énergétique (Dollar et Herr 2008) qui est acceptable pour des sujets jeunes et athlétiques, mais ne l'est plus sur la population cible de VHIPOD. Le projet européen EVERYON (www.evryon.eu/dyne/) vise à créer un système d'orthèses les plus proches de la physiologie et donc moins consommateur d'énergie. Mais ces systèmes ne sont pas applicables dans une population de sujets hémiparétiques le plus souvent âgés.

De nombreuses bases mobiles de verticalisation ont été créées pendant la durée du projet. Par exemple le « UPnRIDE » est un fauteuil verticalisateur qui adapte la position verticale à l'inclinaison du terrain. D'autres projets ont développé des fauteuils auto stabilisés sur 2 roues comme Segway avec le Genny 2 ou Speedy Feet avec le Blumil. Des systèmes d'assistance au PAD ont aussi été développés, parfois sur des plateformes mobiles mais toujours soit en associant un fauteuil roulant soit en réalisant le PAD par un système mécanique non assisté. Des systèmes d'assistance au PAD ont même été développés sur un robot auto stabilisant et circulant sur une sphère (Ballbot, Nagarajan 2009 puis Shomin 2015)

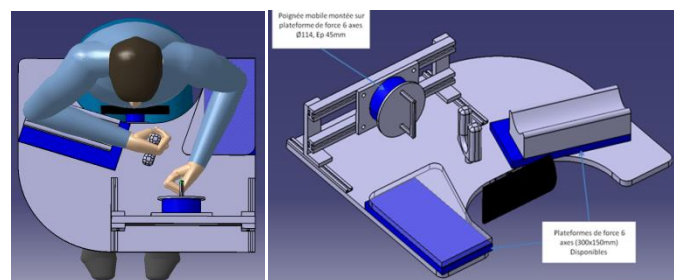
C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Assistance robotisée au PAD/PDA

L'étude bibliographique et technique du LAMIH sur les différents modes d'assistance au PAD/PDA a permis en réunion plénière du 16/04/2013 de choisir une assistance via un support de l'avant bras (fig. 1a) puis a donné lieu à la conception d'une tablette (fig. 1b). Parallèlement les spécifications techniques du dispositif ont été réalisées par le CEREMH (Tâche 2).



a Assistance via un support d'avant-bras



b Conception d'une tablette

Fig. 1. Mode d'assistance au PAD/PDA retenu

Remettant en cause assez fondamentalement le projet, ces choix ont amené la conception d'un banc d'essai pour réaliser un mouvement à 3 degrés de liberté de la tablette dans le plan sagittal (fig 1a). L'architecture choisie, de type triglide (avec un axe de translation horizontal commun aux 3 articulations actives, cf. fig. 2a), a permis à l'équipe de BA Healthcare de dimensionner un dispositif sans bâti rigide : l'ensemble moteurs, transmissions, guidages est

posé à même le sol et solidarisé par des plaques de jonction [C5, C17]. Plusieurs travaux (commande par mode glissant sur une version à 2 ddl [C12] et nouvelle approche de commande utilisant des modèles Takagi-Sugeno construit à partir de modèle algébro-différentiel [C4] [C1]. Enfin, des développements de commande haptique et des essais sur maquette ont été réalisés [C7].

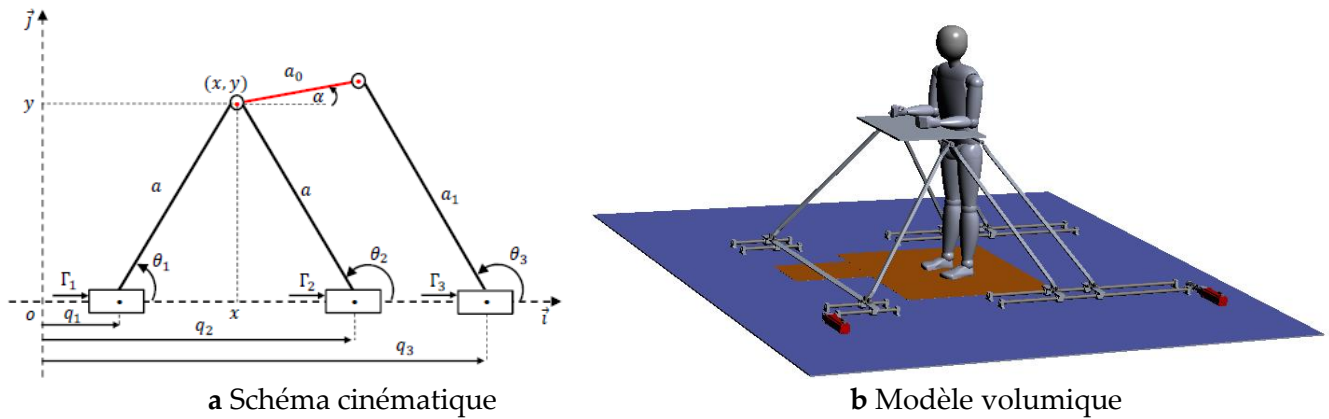


Fig.2. Conception d'un banc d'essai biomécanique de PAD/PDA

Suite aux expérimentations d'assistance au PAD/PDA de sujets hémiplégiques menées par le Latim avec le banc d'essai biomécanique, le concept et la trajectoire de la tablette ont été validés [C17] (fig 3).

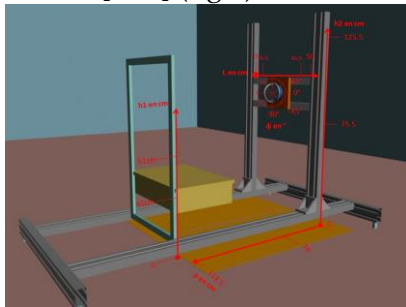
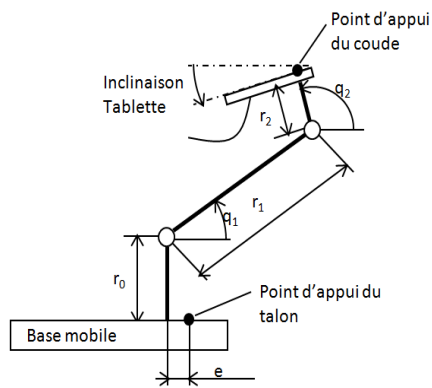


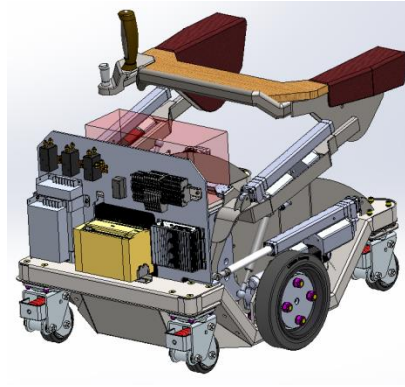
Fig. 3 Banc de mesure de l'influence de la position de la poignée sur le PAD/PDA

Conception du démonstrateur VHIPOD

La trajectoire de la tablette ayant été figée pour le PAD/PDA, un concept de mécanisme à 2 articulations actives pour mettre en mouvement la tablette par rapport à la base mobile a été défini et proposé aux partenaires. La principale contrainte étant la compacité de la solution, tout en minimisant la masse au dessus de la base mobile et le coût, une solution à 2 degrés de liberté au lieu de 3 (comme le banc d'essai) avec une architecture cinématique sérielle a été déterminée pour réaliser la trajectoire retenue, (fig. 4a). Afin de s'adapter à la taille des sujets de 1,65 m à 1,9 m, la trajectoire est modifiée par homothétie et un réglage mécanique simple permet d'adapter le mécanisme au sujet. La fig. 4b présente la conception résultante du démonstrateur.



a Schéma cinématique



b Modèle volumique

Fig. 4. Conception du démonstrateur VHIPOD

Les travaux du LAMIH sur le Déplacement avec une base mobile de type gyropode ont été positionnés en Annexe 1

C.4 RESULTATS OBTENUS

Des maquettes ont pu être présentées progressivement aux partenaires par Duguet conseil (après défection du partenaire ADM Concept) permettant d'accompagner le travail scientifique pour formaliser les compromis compacité-efficacité mécanique-sécurité électrique et électronique, confronter aux avis des usagers et des prescripteurs et guider la réalisation du dispositif (Fig. 5).

Le banc d'essai biomécanique d'assistance au PAD/PDA, (fig. 8a), est un développement conjoint de BA Healthcare et du LAMIH [C6] (Tâche 4). Le LAMIH a réalisé l'instrumentation de la tablette, fig. 6b et le développement logiciel complet de la partie commande, sur la base d'une technologie industrielle, incorporant une partie safety programmée ainsi que l'interface homme-machine. L'ensemble de ce développement a été réalisé pour être facilement utilisé au Latim et en sécurité avec des sujets. Un tel banc d'essai est, à notre connaissance, unique en son genre.

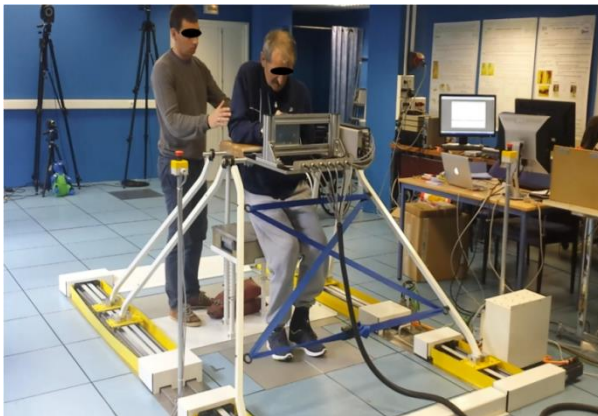
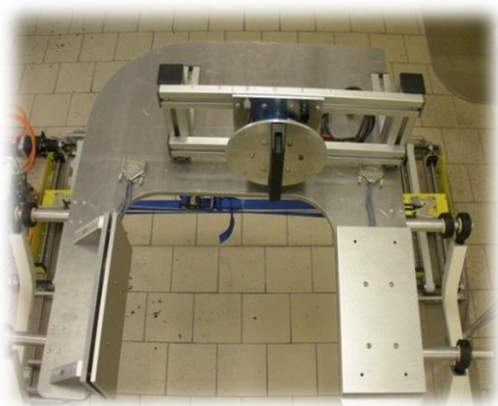


Fig. 5 Maquette finale VHIPOD



a Expérimentation au Latim

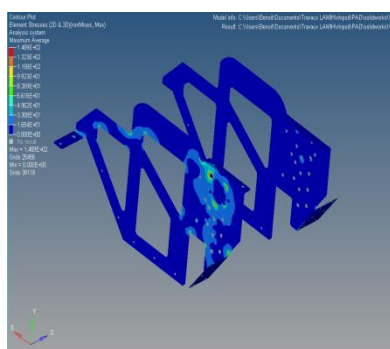
b Tablette instrumentée

Fig. 6. Banc d'essai biomécanique de PAD/PDA

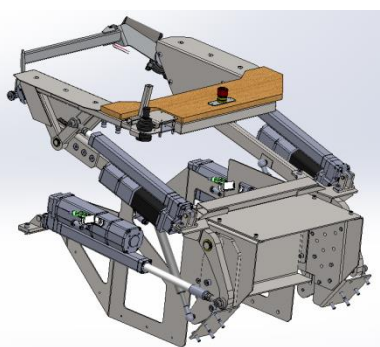
Il a permis de valider les paramètres de trajectoire et de vitesse chez des sujets hémiplegiques (tâche 4 et 7)

Démonstrateur VHIPOD

Le démonstrateur VHIPOD (fig. 7c) est un développement conjoint de BA Healthcare et du LAMIH, avec la participation de ADM Concept puis Duguet Conseil (sous traitant du CHRU de Brest) à la défaillance d'ADM, pour le design général et la conception ergonomique de la tablette, en interaction avec Kerpape et le CEREMH. Le LAMIH a pris en charge la conception et le dimensionnement de la partie supérieure du démonstrateur [C3], (fig. 7 a et b),. et a développé les bibliothèques de fonctions pour la commande du PAD/PDA et les fichiers de paramétrage associés (compte - tenu de la taille du sujet).



a Dimensionnement mécanique



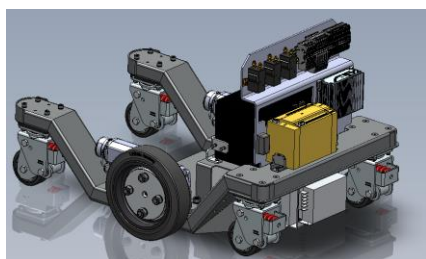
b Mécanisme de PAD/PDA



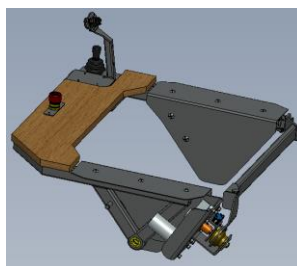
c VHIPOD final

Fig. 7. Conception de la partie supérieure du démonstrateur VHIPOD

BA Healthcare a BA Systèmes a conçu et réalisé une base mobile à 6 roues : 2 roues motrices centrées sur le patient et 4 roulettes libres (2 à l'avant et 2 à l'arrière) pour la stabilité (fig. 8a) et à réalisé l'architecture parallèle du système d'aide au PAD (fig. 7b) et la tablette et le système de commande du PAD/PDA et de déplacement conçus par Duguet Conseil.



a base mobile



b tablette et système de commande

Fig. 8 Base mobile 6 roues et système de commande

Des tests mécaniques et électriques ont été réalisés avant livraison au CMRF Kerpape pour les tests de validation qui ont eu lieu en mai et juin 2017 (tâche 7) et se sont poursuivis au CHRU de Brest. 26 patients hémiplegiques ont été inclus et 15 sujets témoins. Une étude d'acceptabilité a été réalisée et montre une excellente acceptation du système par les patients.

C.5 EXPLOITATION DES RESULTATS

Les résultats ont été publiés pour partie, l'évaluation clinique n'étant pas terminée en raison de problèmes techniques itératifs, les résultats seront publiés ultérieurement.

C.6 DISCUSSION

Le projet VHIPOD n'a pas atteint tous ses objectifs. Le premier était de réaliser un véhicule auto équilibré grâce à des capteurs gyroscopiques. Plusieurs raisons sont à l'origine de cet abandon et ont été explicités lors des réunions intermédiaires à l'ANR. La principale est le manque de sécurité d'un tel système pour un industriel habitué à livrer des robots fiabilisés. Les conditions de tenue debout sur 2 roues semblent difficiles à réaliser pour les sujets hémiplegiques qui sont la population cible du projet. Malgré cela, le démonstrateur atteint bien l'objectif d'un dispositif permettant la réalisation de toutes les manœuvres dans la vie quotidienne et d'assurer des fonctions auparavant inaccessibles aux personnes hémiplegiques grave comme s'asseoir aux toilettes ou sur leur lit avec facilité tout en pouvant se déplacer dans leur environnement.

Le choix a été fait d'un système parallèle. Il s'est avéré qu'un certain nombre de pannes pourraient remettre en cause ce choix. Le principal verrou non levé reste celui de la stabilisation d'une base mobile sur 2 roues qui n'a pas semblé atteignable malgré des travaux réalisés (Annexe 1).

Le second verrou est le maintien de la position debout tout en assurant les mêmes fonctions qu'obtenues dans le dispositif actuel. Les sujets auraient besoin d'un soutien à la position debout plus important que le petit dossier de la tablette (fig. 7c). Il existe un compromis à faire entre un dossier assurant cette fonction et la compatibilité avec le PAD/PDA.

L'acceptation du dispositif étant excellente par les usagers, l'apprentissage facile et les objectifs fonctionnels atteints, le développement d'un produit commercialisable semble un objectif important.

D'ores et déjà, on peut affirmer qu'il est envisageable de supprimer le fauteuil roulant pour les personnes hémiplegiques et bien d'autres personnes handicapées leur permettant d'accéder librement à leur environnement sans l'adapter.

C.7 CONCLUSIONS

Le projet VHIPOD n'a pas atteint tous ses objectifs mais a démontré la faisabilité et l'acceptation d'un dispositif de déplacement en position debout permettant d'assurer toutes les fonctions de transfert de la position assise à la position debout de la vie quotidienne et de déplacement dans l'environnement. Des verrous persistent mais devraient pouvoir être levés. Une perspective d'industrialisation ne semble pas impossible à l'issue du projet.

C.8 REFERENCES

- Dollar, A. M. and H. Herr (2008). "Lower Extremity Exoskeletons and Active Orthoses: Challenges and State-of-the-Art " IEEE trans robotics 24: 1552-68.
- Graf, B. (2009). "An Adaptive Guidance System for Robotic Walking Aids." J Comput Inform Techno 17(1): 109-120.
- Lee, S. and Y. Sankai (2002). Power assist control for walking aid with HAL-3 based on EMG and impedance adjustment around knee joint. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Lausanne.
- Saint-Bauzel, L., V. Pasqui, et al. (2007). Pathological Sit-To-Stand Predictive Models for Control of a Rehabilitation Robotic Device. . RO-MAN
- Saint-Bauzel, L., V. Pasqui, et al. (2009). "A reactive robotized interface for lower limb rehabilitation: clinical results." IEEE Trans Robot 25(3): 593-592.
- Tsukahara, A., R. Kawanishi, et al. (2010). "Sit-to-Stand and Stand-to-Sit Transfer Support for Complete Paraplegic Patients with Robot Suit HAL " Advanced Robotics 24: 1615-1638.
- Nagarajan U, Mampetta A, Kantor GA, Hollis RL State Transition, Balancing, Station Keeping, and Yaw Control for a Dynamically Stable Single Spherical Wheel Mobile Robot IEEE International Conference on Robotics and Automation Kobe, Japan, 2009

D LISTE DES LIVRABLES

Quand le projet en comporte, reproduire ici le tableau des livrables fourni au début du projet. Mentionner l'ensemble des livrables, y compris les éventuels livrables abandonnés, et ceux non prévus dans la liste initiale.

Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (souligner le responsable)	Commentaires
30/04/17	1	Protocole pour le comité d'éthique (CPP)	Rapport	La TIM	Plusieurs accords CPP pour chaque phase
NF	2	Site Web	logiciel	LaTIM	N'a pu être mise en oeuvre
22/01/14	3	Accord de Consortium	Document	LaTIM	
10/01/18	4	Rapport final	Rapport	LaTIM	
1/6/13	5	Analyse des besoins	Rapport	CEREMH	
30/4/13	6	Rapport sur les dispositifs existants	Rapport	CEREMH	
30/5/13	7	Analyse de l'acceptation et de la confiance	Rapport	CEREMH	
Tout au long du	8	Maquettes pour les choix conceptuels	Maquettes bois et dessins	ADM concept	ADM concept a déposé le bilan en

Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (souligner le responsable)	Commentaires
projet					cours de projet et a été remplacé par LaTIM (sous traitant à Duguet Conseil)
Juin 16	9	Modèle global de VHIPOD	Maquette	LaTIM	
Avril 17	10	Définition et réalisation des pièces extérieures ou des contrôles pour le prototype fonctionnel VHIPOD	Prototype	LaTIM	
NF	11	Assistance aux partenaires industriels			Non fait
15/10/13	12	Stratégies motrices des hémiplégiques pour le PAD et protocole expérimental pour T43		LaTIM	La tâche 4 a été profondément modifiée suite aux choix méthodologiques différents. Plusieurs campagnes de mesures ont été faites en 2013 puis 2015 sur le banc d’essai.
15/10/13	13	Mesures préliminaires		LaTIM	
	14	Algorithmes de traitement des données mesurées		LAMIH	
	15	Algorithmes de calcul des forces internes			
	16	Amplitudes des forces d’interaction			
	17	Base de données sur la population cible			
	18	Caractéristiques cinématiques et dynamiques			
	19	Modèle 2D et 3D pour la simulation		LAMIH	Non réalisé sur banc d’essai
26/06/13	20	Description et comparaison des concepts		LAMIH	
	21	Spécifications techniques			
	22	Méthodologie de la sélection des composants de la chaîne d'actionneurs et de leur agencement.			
Decembre 2013	23	Maquette de tablette (déc. 2013)	Banc d’essai		Non prévu initialement
Février 2015	24	Tablette instrumentée du banc d’essai	Banc d’essai		Non prévu initialement
Avril 2015	25	Système de commande du banc d’essai biomécanique et son Interface Homme-Machine. (avril 2015)	Banc d’essai		Non prévu initialement
Fevrier 2016	26	Modèles dynamiques (2D puis 3D) du dispositif de passage assis debout	Prototype		Version finale
Mars 2016	27	Modèle CAO de la tablette et du dossieret	Prototype		Non prévu initialement
Fevrier 2017	28	Implémentation des lois de contrôle valides : Bibliothèque de fonctions Matlab et fichiers de paramétrage de la commande du PAD/PDA – Version finale	Logiciel	LAMIH	
Decembre 2016	29	Résultats des tests sur les sujets réels	rapport	LATIM	Sur banc d’essai
	30	Architecture mécatronique du prototype	Prototype	BA SYS	
	31	Architecture de commande du prototype	Prototype	BA SYS	
Avril 2017	32	Prototype opérationnel pour	Prototype	BA SYS	

Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (souligner le responsable)	Commentaires
		verticalisation et déplacement			
Décembre 2017		Rapport de validation clinique	Rapport	Kerpap e et LaTIM	

E IMPACT DU PROJET

Le projet a permis la production d'un démonstrateur qui, au-delà de quelques fragilités s'est avéré opérationnel pour les usagers avec une excellente acceptabilité.

Au-delà des publications, ce projet a permis de valider les limites du démonstrateur dans la population cible, de définir les axes de travail futurs et d'apporter les éléments pour un projet collaboratif futur.

E.1 INDICATEURS D'IMPACT

		Publications multipartenaires	Publications monoparténaires
International	Revue à comité de lecture	1	1
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)	1	6
France	Revue à comité de lecture		
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)	2	3
Actions de diffusion	Articles vulgarisation	1	
	Conférences vulgarisation	1	
	Autres		

Autres valorisations scientifiques (à détailler en E.3)

	Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)
Brevets internationaux obtenus	0
Brevet internationaux en cours d'obtention	0
Brevets nationaux obtenus	0
Brevet nationaux en cours d'obtention	0
Licences d'exploitation (obtention / cession)	0
Créations d'entreprises ou essaimage	0
Nouveaux projets collaboratifs	0
Colloques scientifiques	0

E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Revue internationale avec comité de lecture (En soumission)

ALLOUCHE B., SAADE A., DEQUIDT A., VERMEIREN L., REMY-NERIS O. (In submission). Design and control of an assistive device for the study of the post-stroke Sit-To-Stand movement. *Journal of Bionic Engineering*.

Revue internationale avec comité de lecture (2)

C4 ALLOUCHE B., DEQUIDT A., VERMEIREN L., DAMBRINE M. (2017). Modeling and PDC fuzzy control of planar parallel robot: A differential– algebraic equations approach. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 14 (1). [IF=0.615] [DOI=<https://doi.org/10.1177/1729881416687112>]

C5 Benyamine Allouche, Amale Saade, Antoine Dequidt, Laurent Vermeiren, Olivier Remy-Neris (2017), Design and control of an assistive device for the study of the post-stroke Sit-To-Stand movement, Submitted to *Journal of Bionics*, Elsevier, in revision.

Conférence internationale avec actes et comité de lecture (8)

C6 ALLOUCHE B., DEQUIDT A., VERMEIREN L., HAMON P. (2017). Design and control of a sit-to-stand assistive device via EtherCAT fieldbus. *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Toronto, Canada, mars.

C7 DANG Q., ALLOUCHE B., DEQUIDT A., VERMEIREN L., DUBREUCQ V. (2015). Real-time control of a Force Feedback Haptic Interface via EtherCAT fieldbus. *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Sevilla, Spain, mars.

C8 SAADE A., GABRIELLI F., PUDLO P., LEMPEREUR M., RÉMY-NÉRIS O. (2015). The influence of muscle atrophy on center of mass trajectory for hemiplegia: a preliminary study. *Congress of the European Society of Biomechanics*, 5-8 juillet 2015, Prague, République Tchèque

C9 DANG Q-V., ALLOUCHE B., VERMEIREN L., DEQUIDT A., DAMBRINE M. (2014). Design and Implementation of a Robust Fuzzy Controller for a Rotary Inverted Pendulum using the TS Descriptor Representation. *International IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (IEEE SSCI 2014)*, Orlando, Florida, U.S.A, décembre.

C10 ALLOUCHE B., VERMEIREN L., DEQUIDT A., DAMBRINE M. (2014). Step-crossing control of two-wheeled transporter based on Takagi-Sugeno approach: comparison between state and descriptor form. *IEEE Multi-conference on Systems and Control (MSC 2014)*, Antibes/Nice, France, octobre.

C11 ALLOUCHE B., VERMEIREN L., DEQUIDT A., DAMBRINE M. (2014). Step-crossing feasibility of two-wheeled transporter: Analysis based on Takagi-Sugeno descriptor approach. *IEEE Int. Conf. on Intelligent Transportation Systems*, Qingdao, China, octobre.

C12 LITIM M., ALLOUCHE B., OMARI A., DEQUIDT A., VERMEIREN L. (2014). Sliding Mode Control of Biglide Planar Parallel Manipulator. *11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, Vienna, Austria, septembre.

C13 ALLOUCHE B., VERMEIREN L., DEQUIDT A., DAMBRINE M. (2013). Robust Control of Two-wheeled Self-balanced Transporter on Sloping Ground: A Takagi-Sugeno Descriptor Approach. *International Conference on Systems and Control*, Algiers, Algérie, octobre.

Conférence nationale avec actes et comité de lecture (6)

C13 NGUYEN T. V. A., ALLOUCHE B., VERMEIREN L., DEQUIDT A., DANG Q-V, CUNG L. (2016). Commande temps-réel d'un pendule inversé: Approche TS descripteur robuste. *LFA 2016*, La Rochelle, novembre.

C14 ALLOUCHE B., VERMEIREN L., DEQUIDT A., DAMBRINE M. (2014). Franchissement d'obstacle d'un gyropode : comparaison entre deux approches TS. *LFA 2014*, Cargèse, Corse, octobre.

C15 ALLOUCHE B., VERMEIREN L., DEQUIDT A., DAMBRINE M. (2013). Modélisation TS sous forme descripteur et commande d'un pendule inversé à deux roues. *LFA 2013*, Reims, octobre.

C16 SAADÉ A., GABRIELLI F., PAGANELLI S., LEMPEREUR M., PUDLO P., RÉMY-NÉRIS O. (2015). The influence of an arm sling on sit-to-stand of hemiplegic subjects. *40ème Congrès de la Société de Biomécanique*, Paris, France, janvier.

C17 SAADÉ A., PUDLO P., LEMPEREUR M., RÉMY-NÉRIS O. (2014). The contribution of handgrip assistance on lower limb joint moments while standing up and sitting down: a preliminary comparative study. *39ème Congrès de la Société de Biomécanique*, Valenciennes, France, août.

C18 SAADÉ A., PUDLO P., LEMPEREUR M., RÉMY-NÉRIS O. (2014). Influence d'une interface de type poignée fixe pour l'aide au passage assis-debout et debout-assis : étude comparative préliminaire. *Handicap'2014, 8ème Congrès sur les aides techniques pour les personnes handicapées*, Paris, France, juin.

Article de vulgarisation

Rémy-Néris O. VHIPOD, Individual transport vehicle standing self-balancing station for disabled. *Impact Sciences*, May 2017 81-83

Séminaire et autres communications (1)

ALLOUCHE B., DEQUIDT A., VERMEIREN L., RÉMY-NÉRIS O., HAMON P. (2015). Conception d'un dispositif d'assistance au passage assis – debout pour personnes hémiplegiques. *GT Systèmes mécatroniques*, Univ. De Nantes, novembre

- Mémoire de thèse :

C1 Benyamine Allouche (2013-2016), Modélisation et commande des robots : nouvelles approches basées sur les modèles Takagi-Sugeno. Thèse de Doctorat de l'Université de Valenciennes soutenue le 15/09/2016.

- Mémoires de fin d'étude :

C2 Aguggiaro M. (2013) Avant-projet d'interface pour l'assistance au passage assis-debout de personnes hémiplegiques, mémoire de projet de fin d'étude d'ingénieur ENSIAME.

C3 Benoît Havez (2016), Conception du système de PAD du démonstrateur VHIPOD, Mémoire de Master Ingénierie Mécanique de l'UVHC.

E.3 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION

L'essentiel des éléments de valorisation de ce projet repose sur le prototype réalisé et le banc d'essai qui permettront le développement de projets futurs.

E.4 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTES EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Ce tableau dresse le bilan du projet en termes de recrutement de personnels non permanents sur CDD ou assimilé. Renseigner une ligne par personne embauchée sur le projet quand l'embauche a été financée partiellement ou en totalité par l'aide de l'ANR et quand la contribution au projet a été d'une durée au moins égale à 3 mois, tous contrats confondus, l'aide de l'ANR pouvant ne représenter qu'une partie de la rémunération de la personne sur la durée de sa participation au projet.

Les stagiaires bénéficiant d'une convention de stage avec un établissement d'enseignement ne doivent pas être mentionnés.

Les données recueillies pourront faire l'objet d'une demande de mise à jour par l'ANR jusqu'à 5 ans après la fin du projet.

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet				Après le projet				
Nom et prénom	Sexe H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans)	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Durée missions (mois) (3)	Date de fin de mission sur le projet	Devenir professionnel (4)	Type d'employeur (5)	Type d'emploi (6)	Lien au projet ANR (7)	Valorisation expérience (8)
Julien Lebouche r	H	Lebouche_julien@yahoo.fr	Juin 2017	Thèse d'université	France	3 ans post doc	CHRU Brest	ingénieur	3 ,5 ans	31-12-2016	CDI	inconnu	inconnu	aucun	Inconnu
Amal (Molly) Saadé	F	mollysaade@gmail.com	20/07/2017	Master sciences et technologies pour la santé	-UTC, France -Université Libanaise, Liban		UVHC-LAMIH	Doctorant e en biomécanique	36 mois	31/12/2015	Doctorante	Université	CDD Doctorant	OUI	
Benyamine Allouche	H	Benyamine.allouche@univ-valenciennes.fr	20/07/2017	Master Automatique et système de production	Ecole centrale de Nantes Université des sciences et de la technologie (Algérie)		UVHC-LAMIH	Doctorant en Automatique	36 mois	31/12/2015	Post-doctorant	Université	CDD Chercheur	NON	OUI
Michaël Aguggiaro	H	Michael.A.guggiaro@laposte.net	20/07/2017	BTS Production Mécanique	PFE ingénieur ENSIAME Université de Valenciennes	- Chargé d'Affaires pour PSA - Ingénieur process pour Areva -	UVHC-LAMIH	Technicien	4 mois	30/06/2013	Consultant indépendant en portage salarial	Indépendant	Ingénieur R&D	NON	OUI

						Logisticien pour Renault - Respon sable de chantier pour PCI Meudon en tant qu'employ é chez Segula - Respon sable de Productio n chez Conducto										

Aide pour le remplissage

- (1) **Adresse email** : indiquer une adresse email la plus pérenne possible
- (2) **Poste dans le projet** : post-doc, doctorant, ingénieur ou niveau ingénieur, technicien, vacataire, autre (préciser)
- (3) **Durée missions** : indiquer en mois la durée totale des missions (y compris celles non financées par l'ANR) effectuées sur le projet
- (4) **Devenir professionnel** : CDI, CDD, chef d'entreprise, encore sur le projet, post-doc France, post-doc étranger, étudiant, recherche d'emploi, sans nouvelles
- (5) **Type d'employeur** : enseignement et recherche publique, EPIC de recherche, grande entreprise, PME/TPE, création d'entreprise, autre public, autre privé, libéral, autre (préciser)
- (6) **Type d'emploi** : ingénieur, chercheur, enseignant-chercheur, cadre, technicien, autre (préciser)
- (7) **Lien au projet ANR** : préciser si l'employeur est ou non un partenaire du projet
- (8) **Valorisation expérience** : préciser si le poste occupé valorise l'expérience acquise pendant le projet.

Les informations personnelles recueillies feront l'objet d'un traitement de données informatisées pour les seuls besoins de l'étude anonymisée sur le devenir professionnel des personnes recrutées sur les projets ANR. Elles ne feront l'objet d'aucune cession et seront conservées par l'ANR pendant une durée maximale de 5 ans après la fin du projet concerné. Conformément à la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 modifiée, relative à l'Informatique, aux Fichiers et aux Libertés, les personnes concernées disposent d'un droit d'accès, de rectification et de suppression des données personnelles les concernant. Les personnes concernées seront informées directement de ce droit lorsque leurs coordonnées sont renseignées. Elles peuvent exercer ce droit en s'adressant l'ANR (<http://www.agence-nationale-recherche.fr/Contact>).

Résumé des travaux scientifiques du LAMIH sur **Déplacement avec une base mobile de type gyropode**

La commande en vitesse d'un gyropode sur un sol plat et la stabilisation de son inclinaison dans le plan sagittal autour de sa position d'équilibre, compte tenu d'incertitudes (masse, position du centre de masse et moment d'inertie du sujet inconnus) et de perturbations (le mouvement éventuel du sujet) est un problème bien maîtrisé sur le plan théorique et expérimental. Les premiers travaux dans le cadre de ce projet ont permis d'étendre l'approche pour la circulation sur sol de pente variable [C12, C15], introduisant une stabilisation autour d'un état d'équilibre non connu qui dépend de la pente, cf. fig 1a.

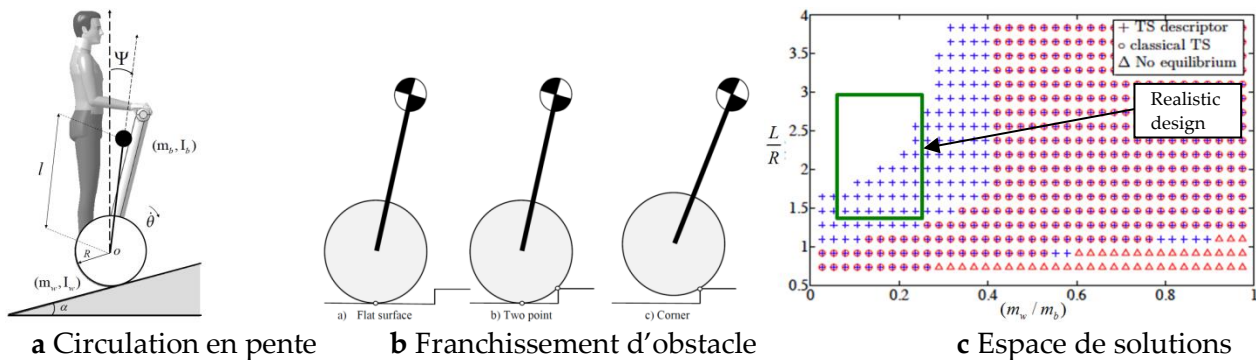


Fig. 1. Analyse de la stabilité de gyropode dans différentes situations de circulation

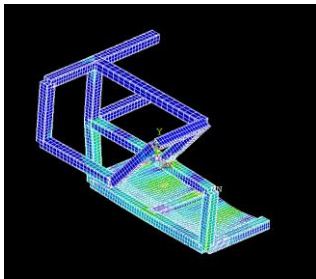
L'approche utilisée s'appuie sur un modèle d'état de type Takagi-Sugeno (TS). Ce modèle, constitué d'une série de modèles d'état linéaires interpolés par des fonctions non-linéaires, peut être écrit pour être exactement équivalent au modèle mécanique initial. Selon la méthode de Lyapunov, le problème de stabilisation de ce système non-linéaire peut être ramené, grâce au modèle TS, à un problème d'optimisation convexe mis sous la forme d'inégalité linéaire matricielle (LMI). L'approche inclue des contraintes de robustesse pour prendre en compte les incertitudes et les perturbations ; de plus, elle a été étendue à la forme descripteur pour augmenter le domaine de solution et elle a été validée sur le plan expérimental [C8, C13].

L'évolution dans différentes situations, telles que la rencontre d'un obstacle ou la descente d'une marche, doit être envisagée si l'on veut utiliser un gyropode en sécurité pour un sujet hémiplégique. Par exemple, la situation où l'évolution d'une roue risque d'être bloquée par un mur doit être exclue de façon sûre, sans quoi la commandabilité de l'inclinaison du gyropode risque d'être perdue. Dans ce projet, nous avons posé la problématique de franchissement d'obstacle, tel que des petites marches (cf. fig. 1b). Cette situation est telle que l'état d'équilibre change brutalement à l'instant où la roue touche la marche et perd le contact avec le sol sur lequel elle évoluait. Des approches basées sur les modèles TS d'état et descripteur ont permis de développer une stratégie de franchissement d'obstacle ; elles ont été testées en simulation et comparées [C9, C14]. De plus, la faisabilité de la solution a été testée selon ces deux approches en fonction de caractéristiques architecturales du gyropode : le rapport entre la masse des roues (+ moteurs) sur la masse mobile en équilibre (avec sujet) d'une part et le rapport entre la hauteur du centre de gravité du mobile sur le rayon des roues d'autre part [C10], cf. fig. 3.c. Pour des caractéristiques architecturales (cf. cadre rouge sur la fig. 3.c) envisageables en conception, il apparaît très clairement qu'une grande partie

des architectures ne trouve pas de solution stable. Ce domaine de solution a été étendu avec des fonctions de Lyapunov non quadratique [C1, C10].

Gyropode - Banc d'essai de franchissement d'obstacle

Suite à l'étude théorique sur la stabilité des gyropodes, il a été décidé de développer un banc d'essai pour tester les lois de commande en condition de franchissement d'obstacle. La conception et le dimensionnement mécanique (cf. fig 9a), l'intégration des composants (cf. fig 9b), et la fabrication (cf. fig 9c) ont été effectués durant le projet. Le développement hardware de la commande embarquée est en cours de réalisation, cette tâche n'étant pas prioritaire par rapport aux autres développements effectués. Ce banc d'essai de lois de commande constituera une plate-forme expérimentale indispensable pour aborder la question toujours ouverte du déplacement en présence d'obstacle d'un gyropode du point de vu de la stabilité et de la sécurité des personnes.



a Dimensionnement mécanique



b Moteurs-roues modifiés



c Banc en cours de fabrication

Fig. 9. Banc d'essai gyropode pour la commande en situation « tout-terrain »