

list
cea tech

cea



Action Nationale de Formation - CNRS
« La mécanique et le monde du vivant »

Carqueiranne, 19 - 22 Octobre 2021

**Le mariage du bras exosquelette ABLE
et du bras humain**

Philippe Garrec

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives - www.cea.fr

- ▶ CEA List
- ▶ Service de Robotique Interactive (SRI) - R&D exosquelette (2002=>)
- ▶ Quelques principes..
- ▶ Genèse de la conception du bras exosquelette ABLE
- ▶ Conclusion – Quels enseignements ?



Le CEA (Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives)



19 925
Personnes

5.3B€

Budget
opérationnel

1181 doctorants et 170 post-docs

5045 publications dans des revues à comité de lecture

1er organisme en Europe pour le dépôt de brevets

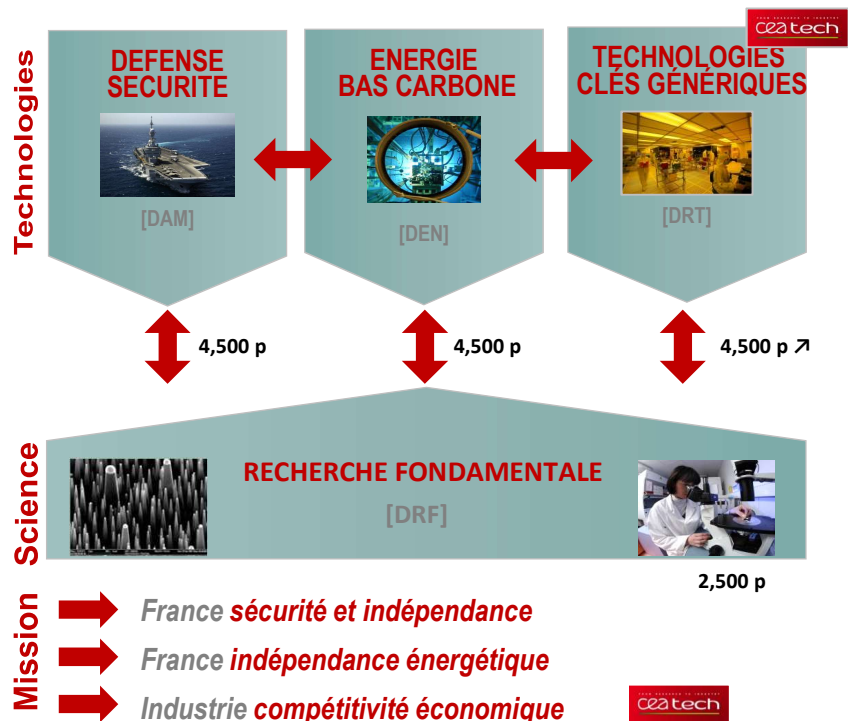
704 brevets/an

6700 familles de brevets actives

427 projets européens

>700 partenariats directs de R&D avec des entreprises industrielles

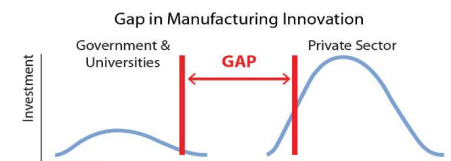
211 start-ups innovantes de haute technologie



leti ce2tech
Micro et nanotechnologies

liten ce2tech
Energie et matériaux

list ce2tech
Systèmes Digitaux et Robotique



Equipes

50 chercheurs
31 Permanent
10 PhD

75 Brevets actifs, 12 dépôts par an
8 à 10 publications
20 à 30 communications par an
50 % Contrats industriels
20 % Projets Européens

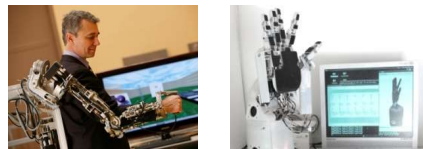
Partenaires



1. Actionneurs à haute performance



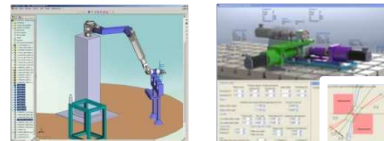
2. Architectures robotiques innovantes



3. Commande



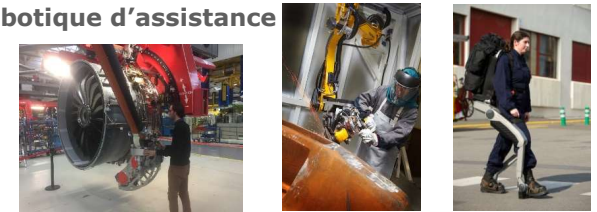
4. Outils logiciels pour le contrôle supervisé



Maintenance des installations nucléaires



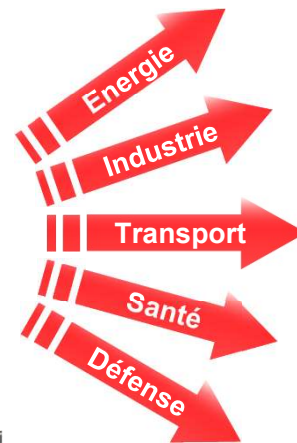
Robotique d'assistance



Fabrication avancée



Santé





HERCULE HV1



ABLE 7D

- Expertise des exosquelette reconnue mondialement
- Laboratoire commun avec RB3D



HERCULE HV2



EMY



MANDARIN



IHS10



HERCULE HV3



EXOPUSH Amplified rake



EMY Balance



HERCULE Slim

- **Invention de l'actionneur vérin à câble (2000) pour le bras maître à retour d'effort VIRTUOSE 6D**
- **ABLE 4D – Bras exosquelette anthropomorphe 4 vérins à câble à contrôle de couple (2007)**
- **ABLE 7D (2011) – Premier bras exosquelette anthropomorphe à 7 actionneurs homogènes (vérins à câbles) à contrôle de couple**
- **HERCULE HV2 (en collaboration avec RB3D), premier exosquelette européen d'assistance à 4 membres (2011-2012)**
- **HERCULE HV3 (en collaboration avec RB3D), premier exosquelette d'assistance au port de charge testé par le public (2014)**
- **Râteau amplifié porté (brevet 2014)**
- **Exosquelette EMY-BALANCE pour le projet européen BALANCE visant le développement de la rééducation progressive de la marche (2013-2017)**
- **HERCULE SLIM : prototype exploratoire d'exosquelette d'assistance discret (moteurs dorsaux)**
- **Les recherches actuelles :**
 - **Vers une discrétion « acceptable »**
 - **Vers un comportement transparent et sûr**
 - **Actionneurs minimalistes à câbles et contrôle linéaire du couple (modèles du frottement et capteurs d'intention innovant)**
 - **Développer des outils d'aide aux tâches industrielles**

EXOSQUELETES

2007_ BD 1756_FR2917323A1_avant-bras-articulé

2008_ BD 10772_FR2932081A1_épaule_rail_circulaire

2009_ BD 11203_FR2949669_A1_épaule_sans_rail_circulaire

2010_ BD 11219_FR2961424A1_segment_réglable

2011_ BD 12923_FR2981266B1_bassin_exosquelette

2012_ BD 13558_FR2991224_A1_bras_exosquelette_mono-actionneur

2013_ BD 13969_FR3010343_A1_jambe_transmission_parallélogramme

2014_ BD 15749_FR3031060_A1_actionneur_râteau

2015_ BD 15748_FR3046233_A1_capteur_seuil_force_normale

2016_ BD 15407_FR3053242_B1_commande_équilibre

2017_ BD 18240_FR3074078_A1 - membre inf exo - bloqueur abduction cabestan

2018_ BD19111_ FR3090101_A1_ capteur de force normale à une surface

2019_ BD 19625 - bloqueurs réciproques d'abductions

2019_ BD 18055 - équilibreur de charge portable à parallélogrammes actionnés

2020_ BD 16801 - articulation_roulante_commandée_par câble

2020_ BD 20222_actionneur à câble à compacité améliorée

ACTIONNEUR VERINS A CABLES ET COMMANDE

2000_ AD 461_FR2809464A1_transmission à vis, écrou et câble attaché à la vis

2003_ AD 486_FR2852265A1_vérin à moteur déporté

2003_ AD 479_FR2852373A1_adaptateur_course

2003_ AD 489_FR2858669A1_vérin à câble_anti-rotation_intégré_structure

2010_BD11112_FR2960808A1_équilibre&détection_interaction

2011_BD 12651_FR2981420A1_anti-rotation_asymétrique

2012_ BD 13534_FR2990485_A1_vérin_câble_transmission_primaire_flexible

2013_ BD 14273_US20150345600_A1_vérin_cardan_câble

2017_ BD 18039_FR3070062_B1_anti-rotation à câbles

2018_ BD 18241_FR3084921_A1_transmission_télescopique_à_câble

2018_ BD 13600_FR3085368_A1_commande_manipulateur_charge_inconnue

2018_ BD 16847_FR3086361_A1_transmission_hybride_raideur_augmentée

2018_ BD 19095 - capteur de flèche d'écrou - capteur de couple & force

Contribution de la commande à l'équilibre

- Structure articulée et contribution de l'actionneur -

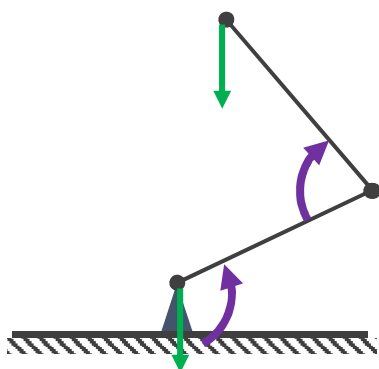
Force résultante à soutenir
Equilibre à garantir



Effort de la commande via
l'actionneur (couple ou force)

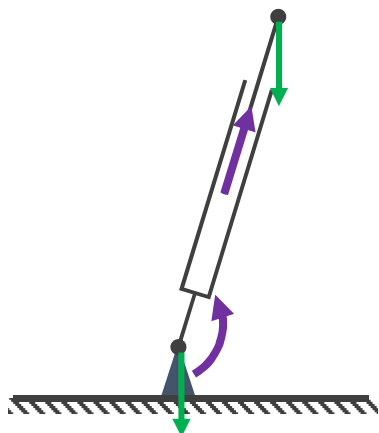
L'effort de l'actionneur est **représentatif** de l'effort à équilibrer (ex : assister, amortir, sauter)

L'effort de l'actionneur n'est **pas représentatif** de l'effort à équilibrer



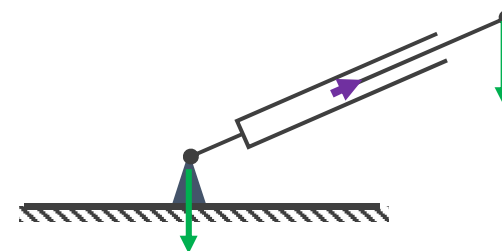
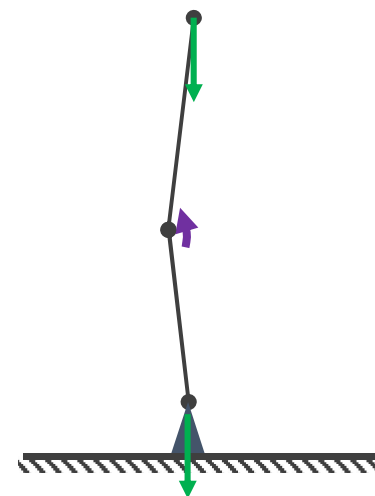
CHARGE : EFFORT NORMAL +
TRANCHANT !

COUPLE ACTIONNEUR :
MOMENT DE FLEXION !

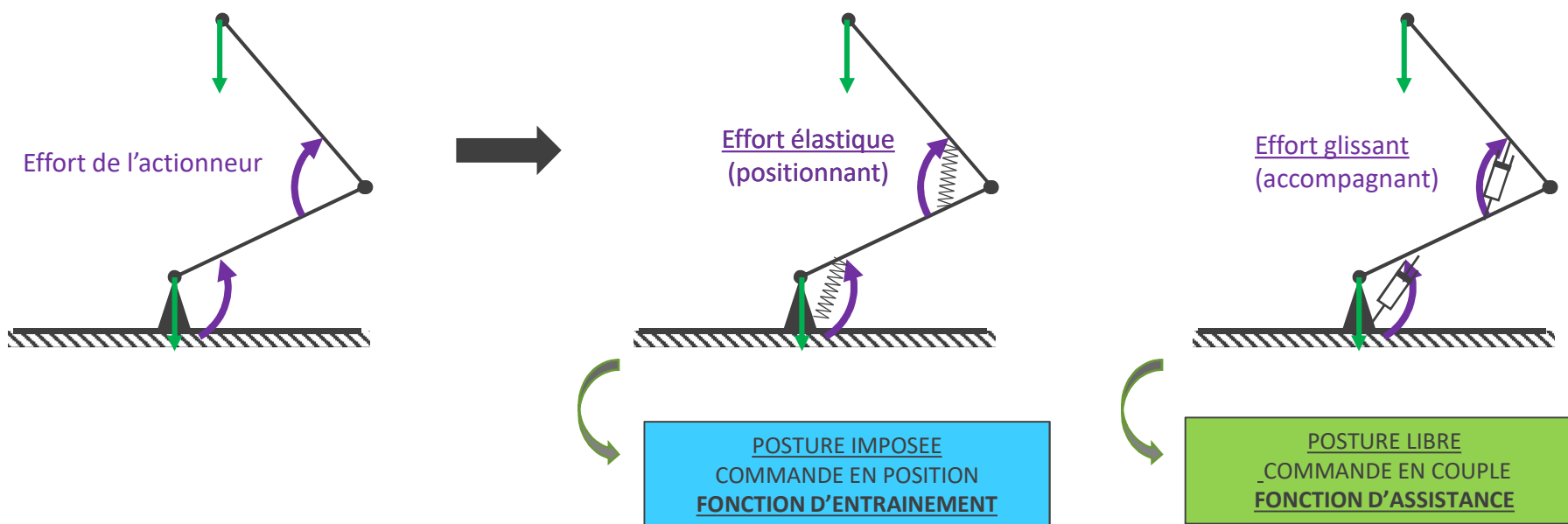


CHARGE : EFFORT NORMAL +
TRANCHANT !

FORCE ACTIONNEUR : EFFORT
NORMAL !

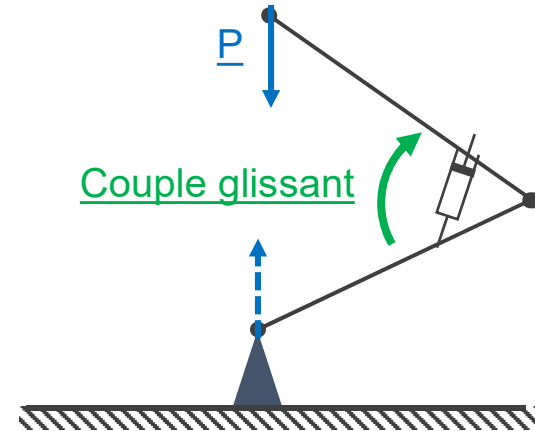
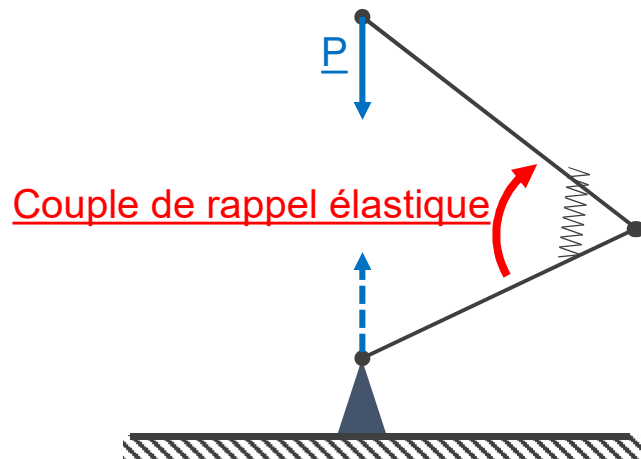


Force résultante à soutenir
→ Equilibre à garantir

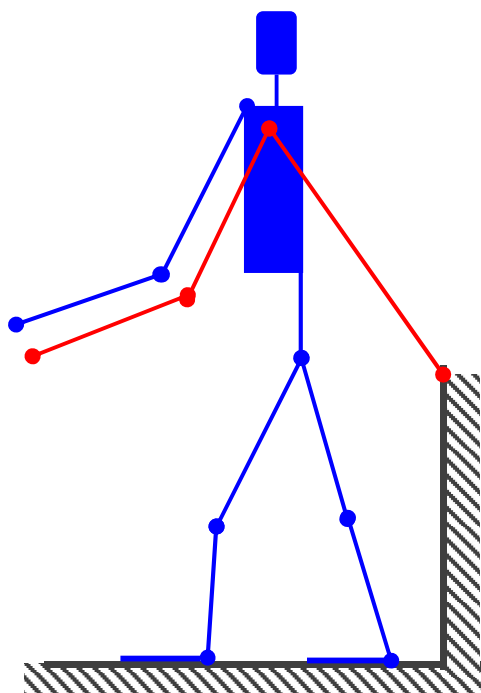
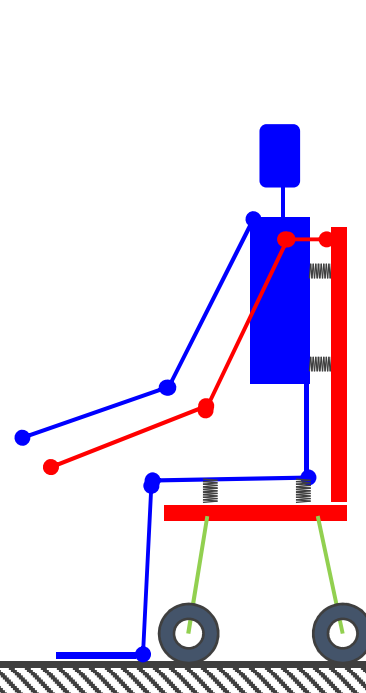
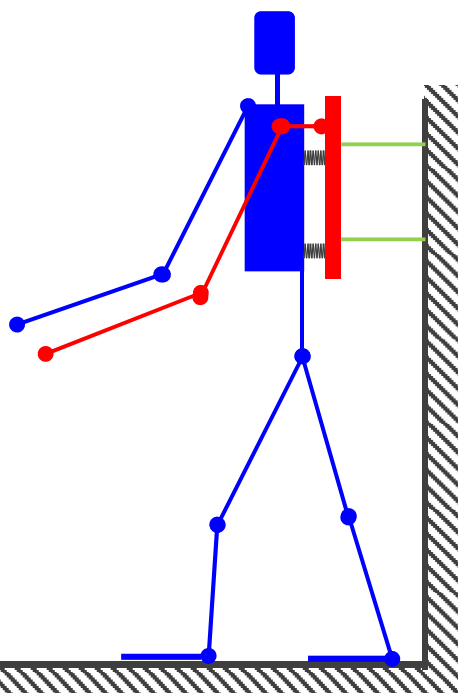


L'actionneur :

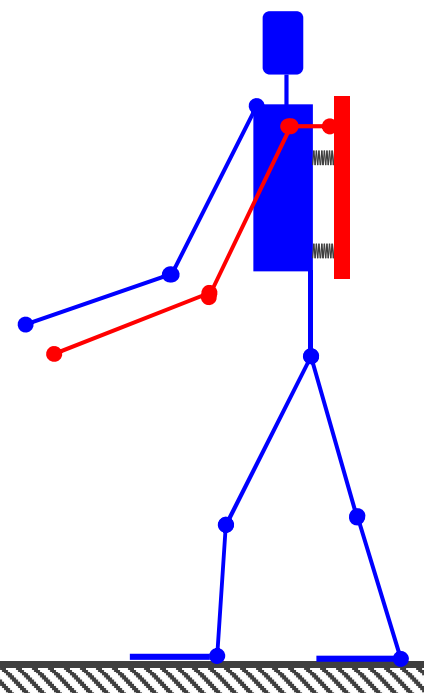
- ▶ Concourt toujours à l'équilibre de la structure
- ▶ Et parfois à son mouvement !

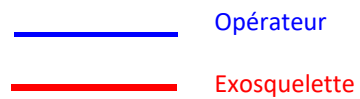


Fixe semi-exosquelette

Exosquelette fixe ou mobile
(ex : ABLE)

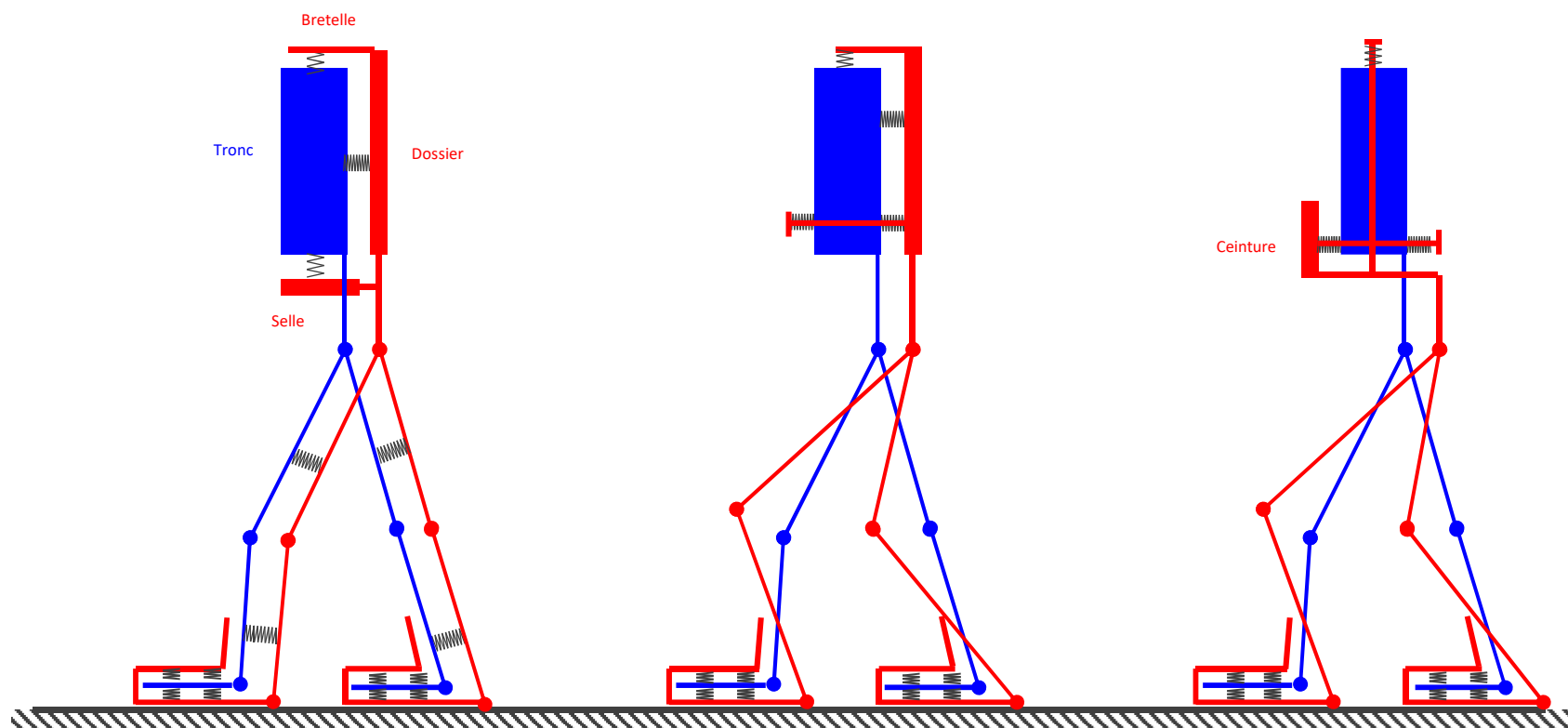
Exosquelette portable

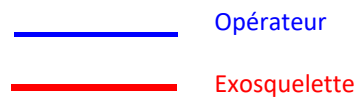




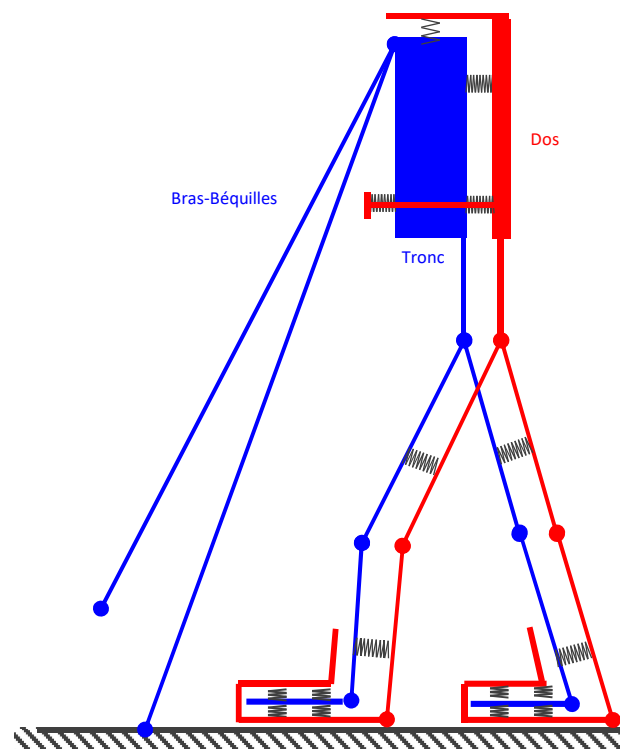
Ex: Hercule HV2

Ex: Hercule HV3

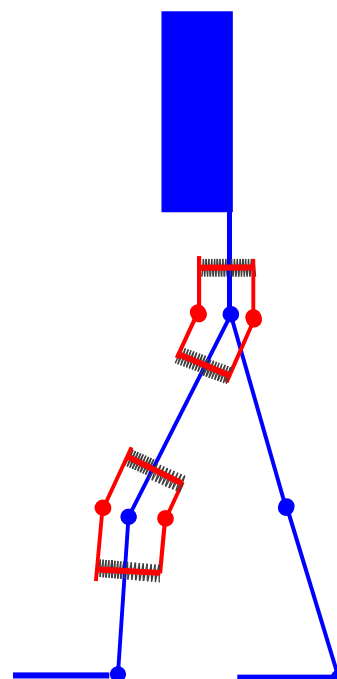




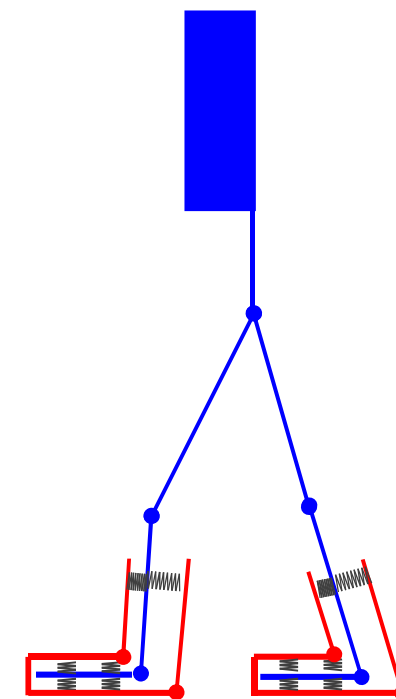
Mobilisation de la marche paraplégique
avec béquille (quadrupède ?)



Orthèse médicale



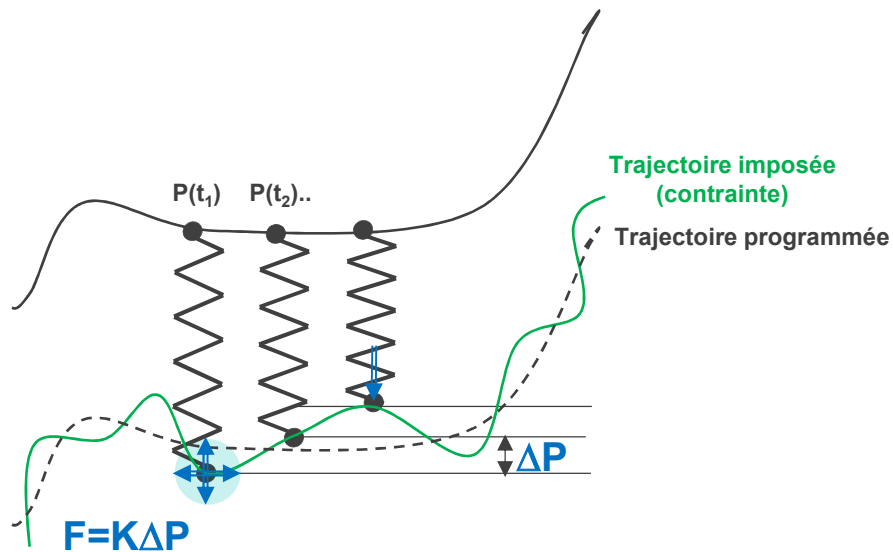
Chaussure de ski..



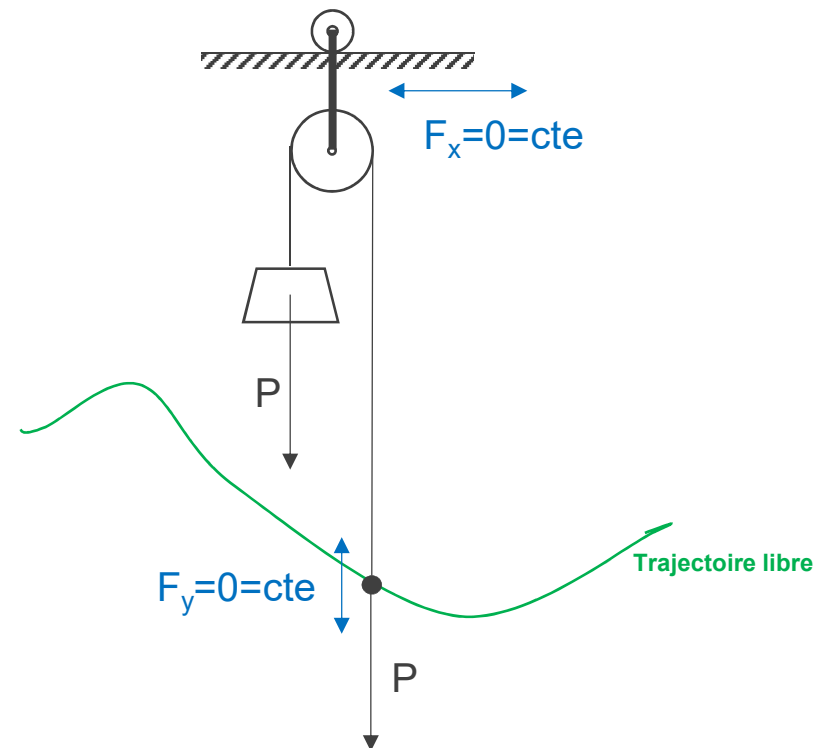
- ▶ Entraîner (mobiliser) → Imposer des positions (modèle géométrique) MAIS surveillance des efforts aléatoires !
- ▶ Assister au port de charge → Réaliser un équilibre d'après un modèle MAIS transparence (résistance) aléatoire
- ▶ Diminuer les forces intérieures (diminuer ou modifier les liaisons)
 - → RECHERCHER L'ISOSTATISME
 - → MESURER LES FORCES TRANSMISES PAR LES LIAISONS ET LES ANNULER ?

POSITION (en 1 point)**Application d'une force de rappel à une position**

- Asservissement de position

FORCE (en 1 point)**Application d'une force**

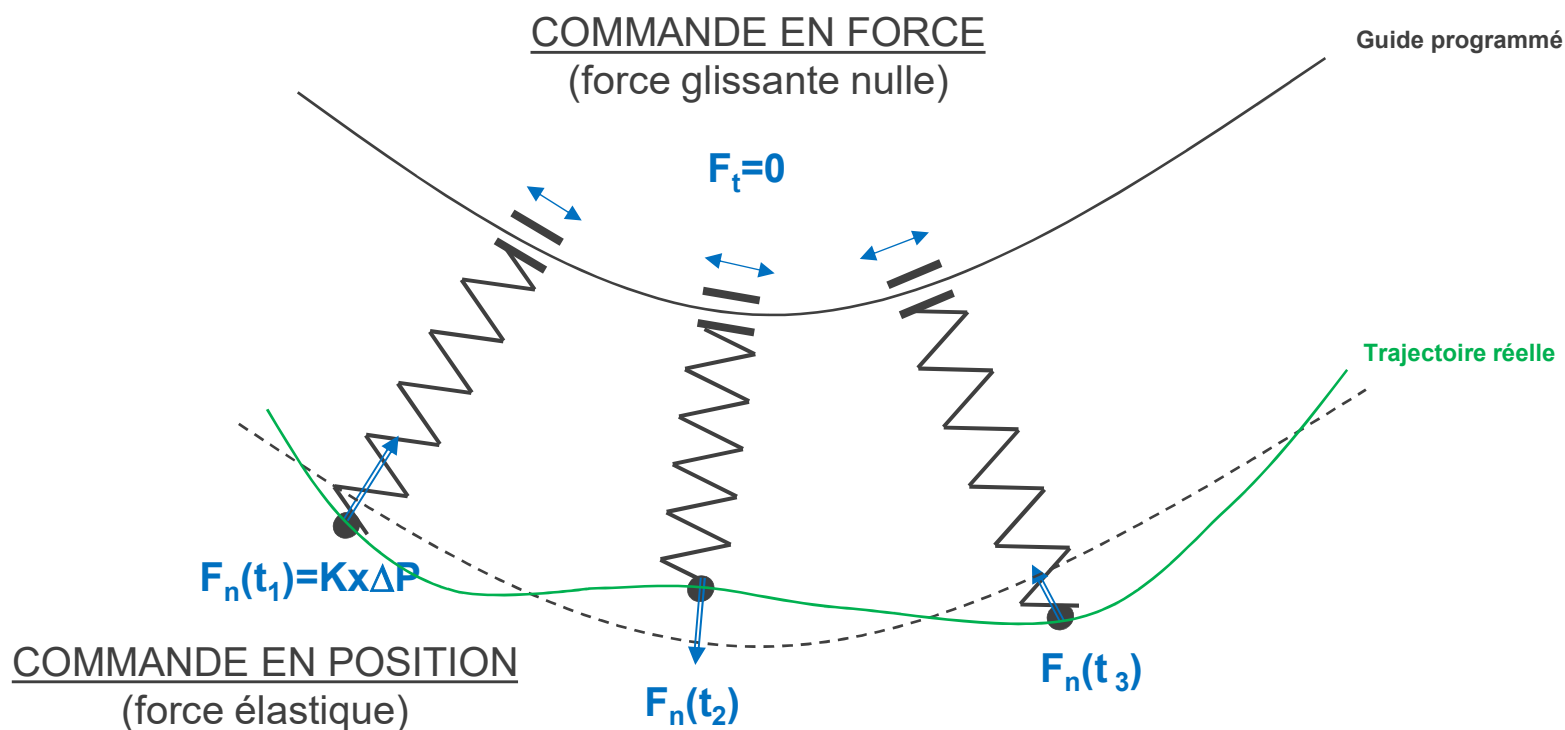
- Calculée par un modèle (équilibre)
- Asservie à un capteur de force (amplification)

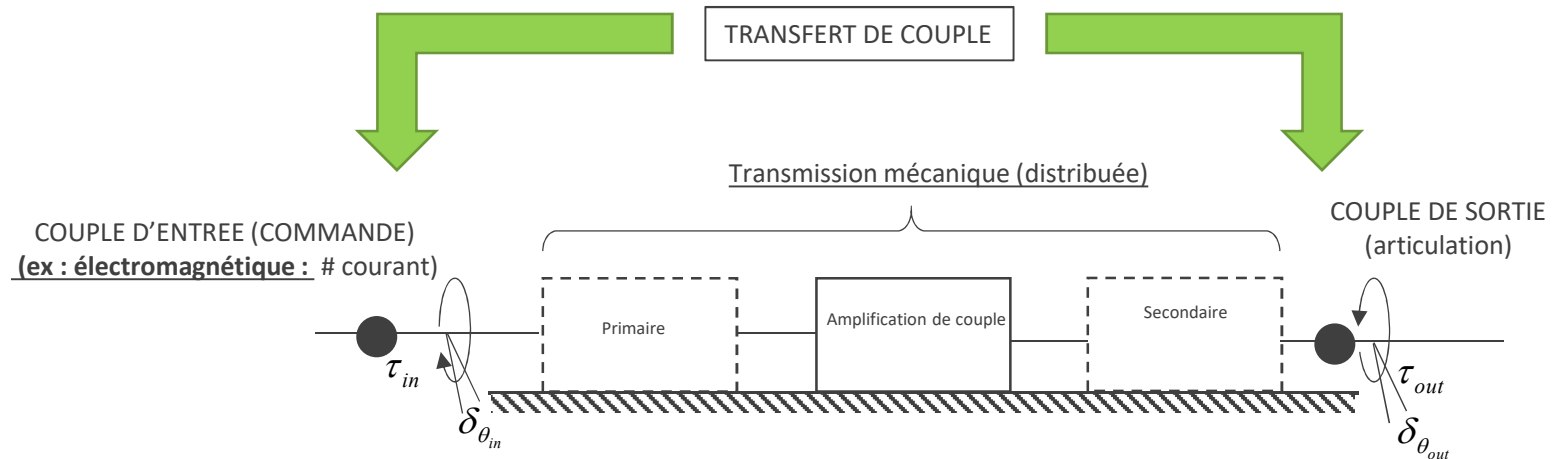


EXEMPLE : GUIDAGE MÉCANIQUE « VIRTUEL »

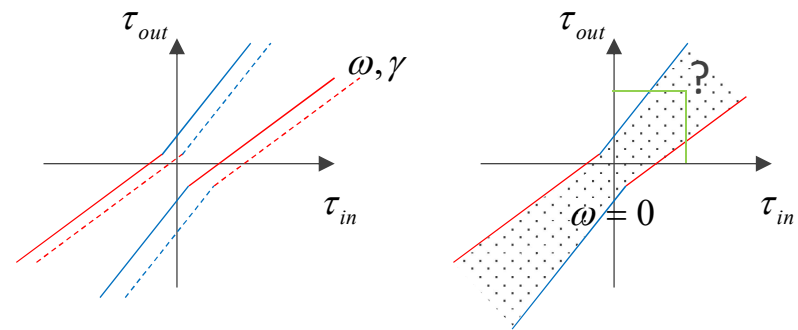
PROBLÉMATIQUE

- ▶ Raideur limitée par la transparence (force résistante tangentielle)
- ▶ Transparence fonction de la charge (coefficient de frottement apparent (résistance fonction de la charge))

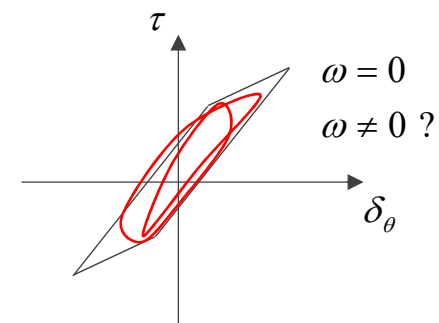


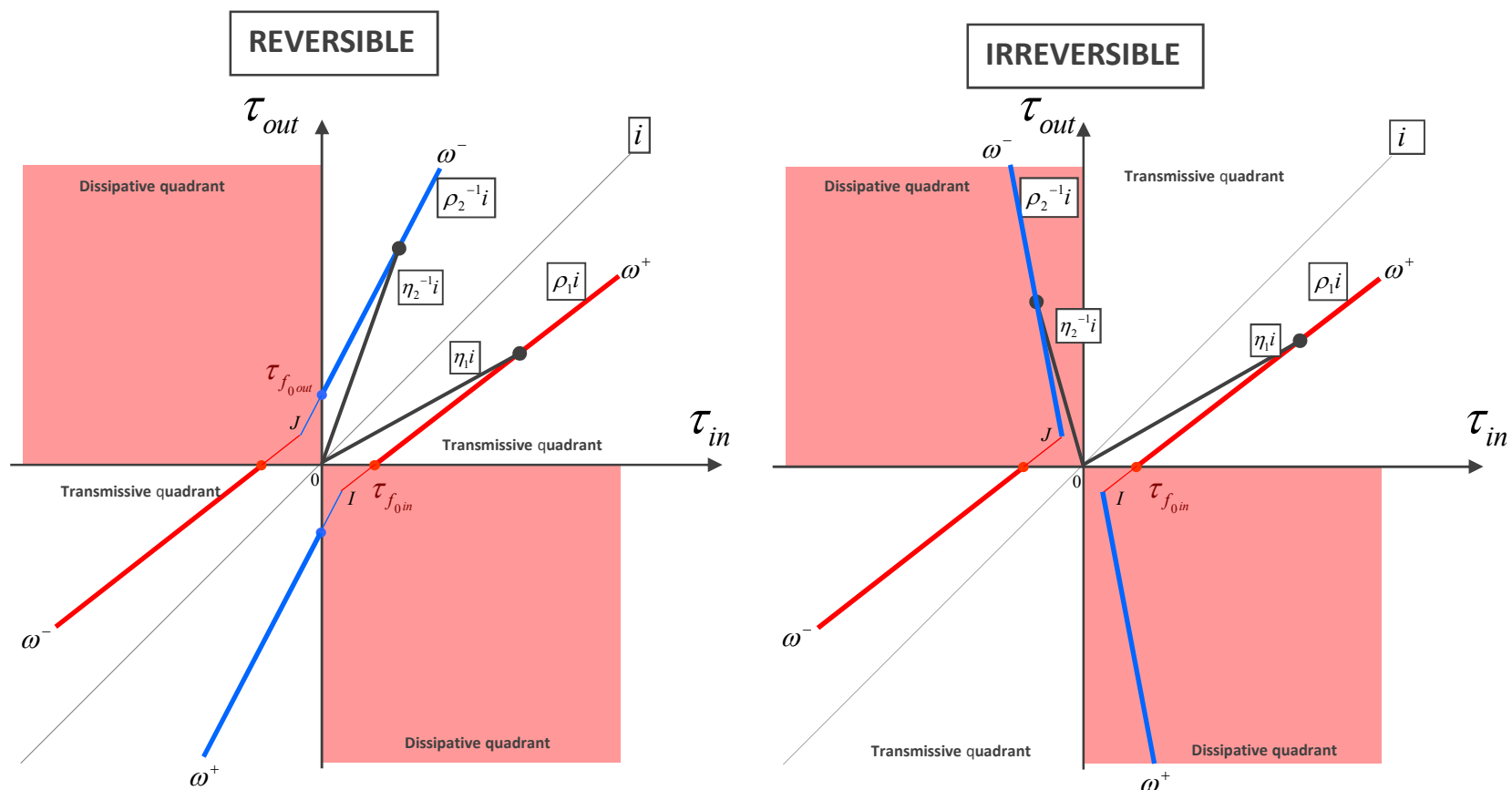


- Défaut de linéarité du transfert de couple
(statique et dynamique)
modèle dynamique de l'actionneur



- Défaut de linéarité de la loi couple-déformation
(raideur variable, jeu)





Coefficient de transfert net de couple (quasi-statique)

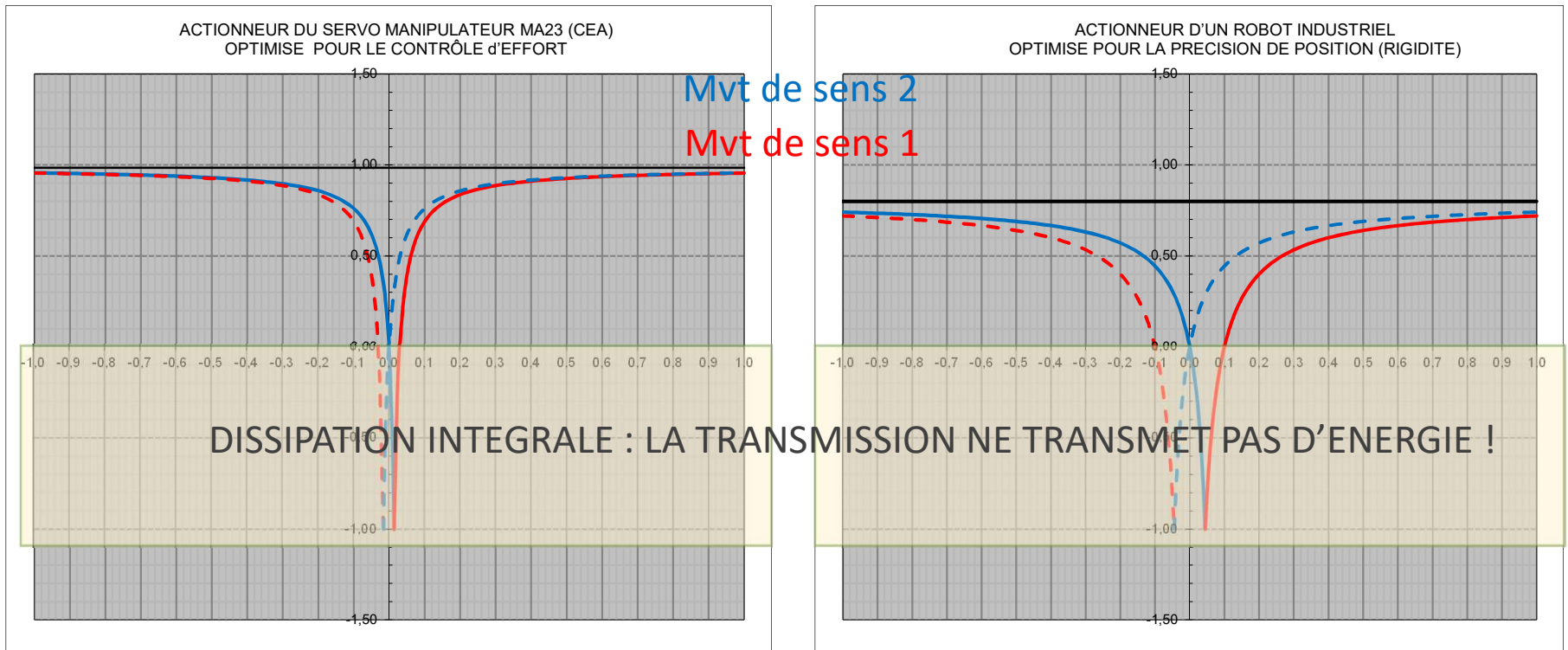
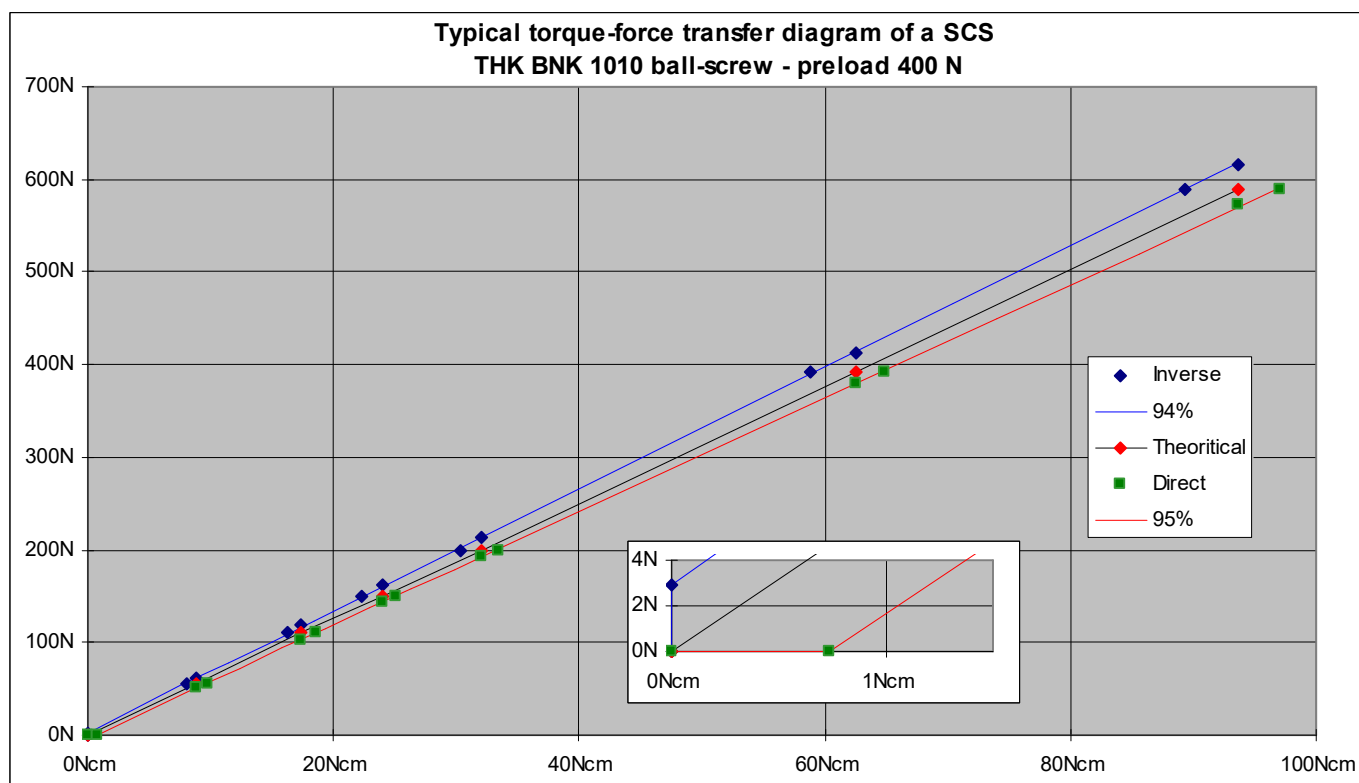
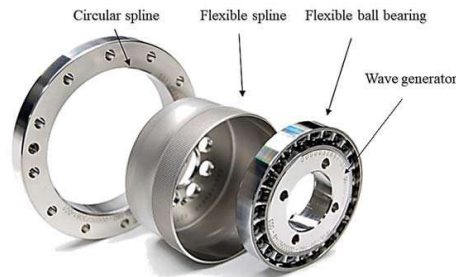


Diagramme de transfert de couple typique du vérin à câble

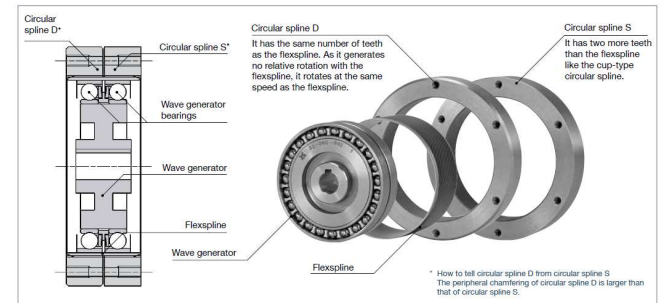


2021

Type cloche



Type différentiel



Load-dependent Friction Laws of Three Models of Harmonic Drive Gearboxes Identified by Using a Force Transfer Diagram

Ponce Quiruga Carlos, Wilfrido, Abba Gabriel, Antoine Jean-François, Raharisona Thibaut
LCPC
Université de Lorraine, Arts et Métiers, HESAM
Université, F-57070 Metz, France
e-mail: (carlos-wilfrido.ponce-quiruga, gabriel.abba, antoine.jean-francois, thibaut.raharisona)@univ-lorraine.fr

Garrec Philippe
Inserme Robotics Unit
CEA LIST
Palaiseau, France
e-mail: philippe.garrec@cea.fr

Abstract—Industrial robotics and aerospace engineering today use harmonic drive gearboxes for their reliability, high accuracy with zero backlash and high ratio torque transmission. However, they present known problematic behaviors that affect their performance. The article deals with the first step towards the improvement of torque control of collaborative robots. We designed and developed two experimental setups to study three types of Harmonic Drive gearboxes. We identify the friction laws by using Force Transfer Diagrams. The results exhibit a new parabolic law of friction torque as a function of the transmitted torque.

The paper is organized as follows: Section II presents an overview of the HD; section III, the torque friction in gearboxes and the pertinence of FTD; section IV, the experimental setup developed and the procedure to obtain the FTD; section V, the experiments results and section VI, the discussion and future work.

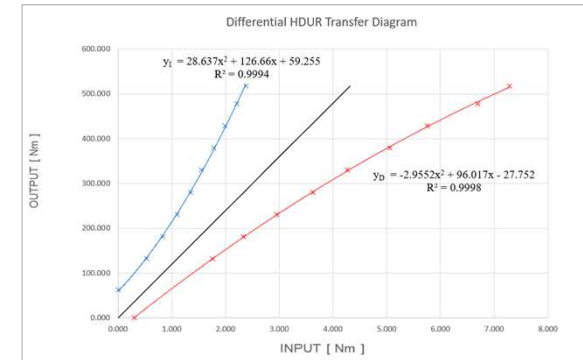
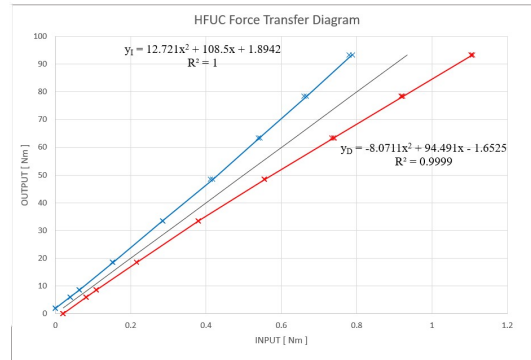
II. THE STRAIN WAVE GEAR (HARMONIC DRIVE TYPE) AND ITS APPLICATION IN COLLABORATIVE ROBOTS

A. Harmonic Drive Operation

Unlike a classical gear, the HD gearbox kinematic principle uses a continuous propagation of a strain wave thanks to the elastic properties of the chosen material [4]. The three main components of a HD are (1) the wave generator, (2) the flexspline and (3) the circular spline as depicted in Fig. 1. The wave generator is an elliptical ball bearing assembly that is inserted into the bore of the externally toothed flexspline. The elastic properties of the flexspline allow it to take on the elliptical shape of the wave generator. The outer teeth of the flexspline engage with the inner teeth of the crown along the major axis of the ellipse while they disengage along the minor axis. Hence there are many more engaged teeth than with a traditional gear. In a basic configuration, the wave generator induces the rotation of the flexspline in an opposite direction relative to the circular spline due to the difference in the number of teeth. This leads to the definition of its input-output velocity ratio (reduction ratio) formula. Depending on the choice of fixed and drives element, various ratios and signs can be obtained.

B. Harmonic Drive Drawbacks

However, several drawbacks have been identified, such as some kinematic error [5], [7], hysteresis [1], [9], some inertia and a somewhat complex friction behavior [2], identified in [2] as the responsible for most of the energy loss having an important impact on the torque transmission.



Genèse de la conception du bras exosquelette ABLE

- Un processus “inversé” : construire un système mécanique articulé (“squelette”) autour de l’actionneur à vérin à cable (“muscle”)
- Orientation et contraintes
- Mécanisme de l’articulation d’épaule
- Segment articulé de l’avant-bras et poignet

Multiple degree of freedom exoskeleton for rehabilitation



ISIR Paris/Garches/CEA/Roby-Brami/Morel

[W une page entière à la fin de la page](#)



“Technologies and combination therapies for enhancing movement training for people with a Disability», Reinkensmeyer and Boninger Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation 2012

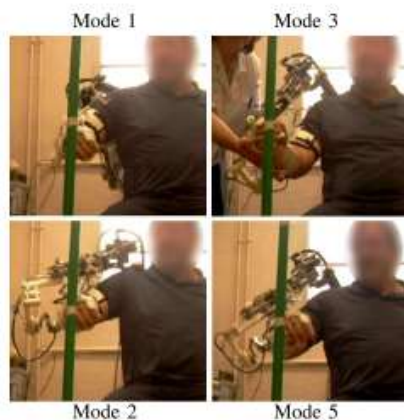


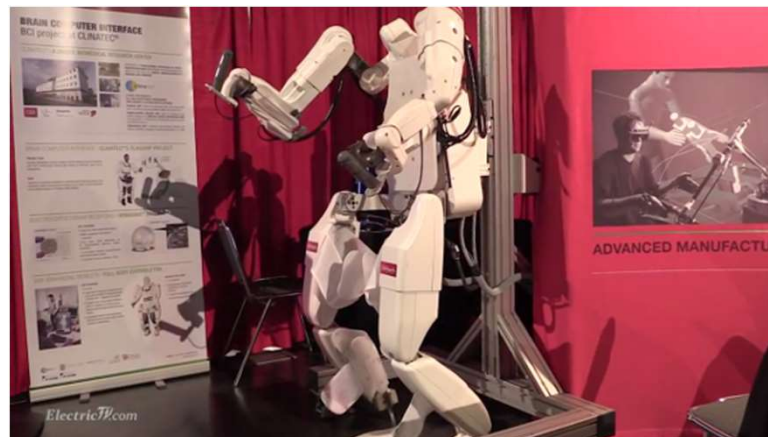
Fig. 5. Patient #5 pointing target 2 under several control modes. Mode 1: w/o robot ; Mode 2: w/ robot programmed to be transparent ; Mode 3: w/ the therapist imposing the movement while the patient is connected to the robot under transparent control mode ; Mode 5: w/ robot applying the therapeutic constraint.

Equipe UPMC – A. Roby-Brahmi/ N. Jarrassé ABLE 4D prototype

- Agnès Roby-Brahmi, Johanna Robertson, Vincent Crochet : « Joint coordination (synergies) in upper-limb rehabilitation (hemiparetic patients) »
- Nathanael Jarrassé : “Analysis and solutions for kinematic misalignment, control modes”



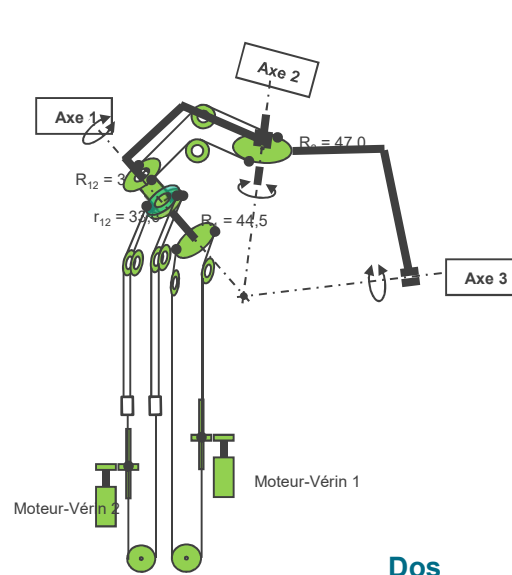
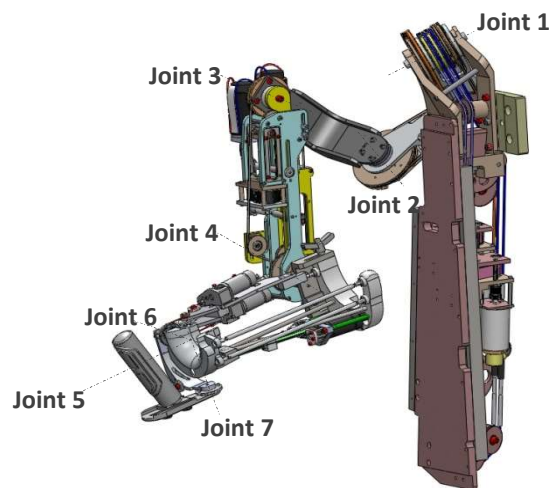
Téléopération bilatérale
à retour d'effort (ANR SCALE 1 - 2011)



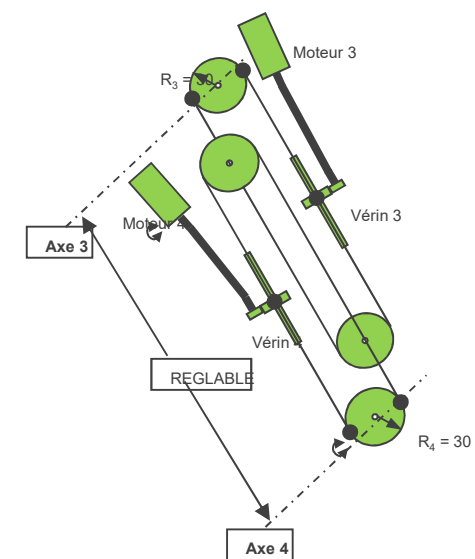
SIGGRAPH 2013 – Anaheim
Exosquelette 4 membres EMY pour tétraplégique (CEA-Clinattec)

Téléopération unilatérale
(asservissement par vision)

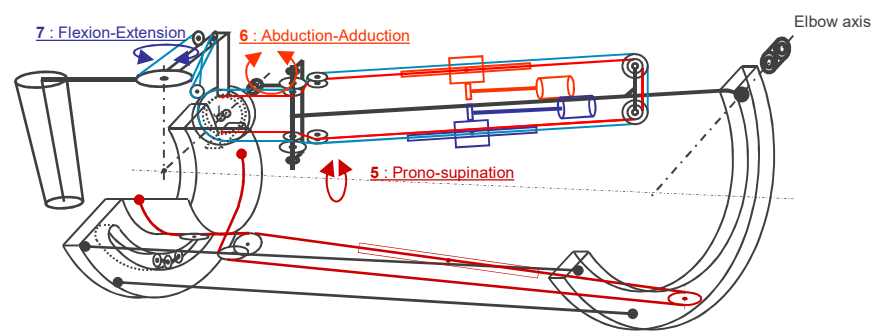




Dos



Humérus

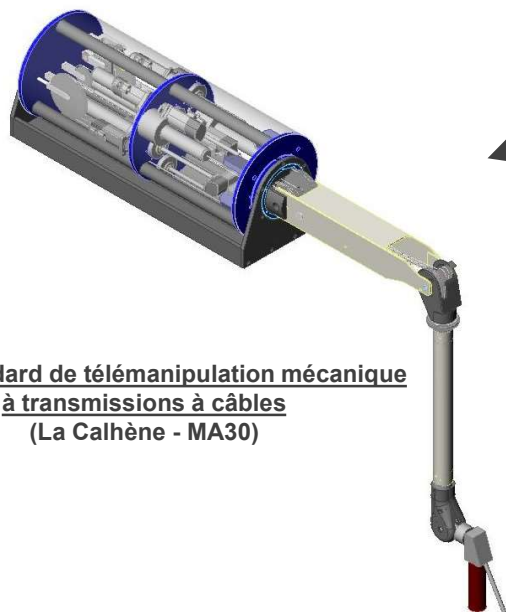


Avant-Bras-Poignet

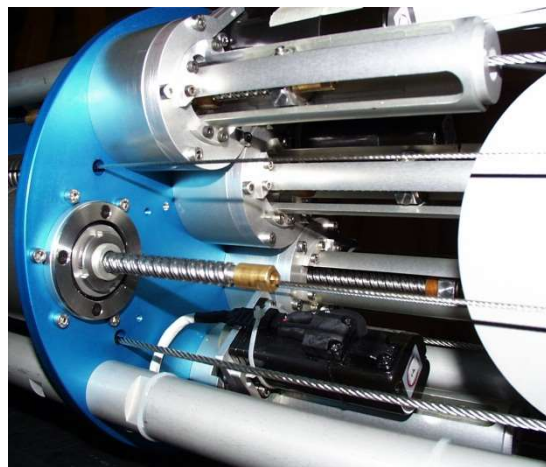
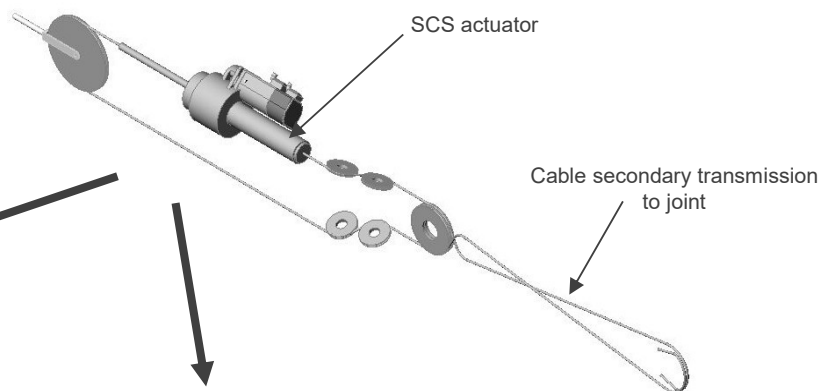
- ▶ Embarquer l'actionneur à vérin à câble sur la structure articulée (confiance acquise par le REX du bras maître Virtuose 6D, 2001)
- ▶ Réaliser et tester un module humérus à 2 vérins à câble à inertie réduite (déport « proximal » des moteurs)
- ▶ Achever une architecture 4 axes en complétant l'articulation d'épaule (type A) grâce à un module dorsal à 2 vérins à câbles
- ▶ Concevoir l'articulation de prono-supination en conservant un avant-bras mécaniquement ouvert (a priori d'acceptabilité) → Développement d'une structure articulée originale série-parallèle
- ▶ Compléter la structure d'avant-bras par un poignet à 2 articulations (cardan) et 2 actionneurs embarqués sur l'une des branches (module avant-bras-poignet)
- ▶ Développer une nouvelle épaule (type B) moins invasive et supprimant le guidage circulaire

Réponse : Utilisation d'une vis à billes pour entraîner les boucles de transmissions à câbles d'un bras standard
Le bras maître à retour d'effort Virtuose 6D (2001)

Bloc actionneur à 6 vérins à câbles

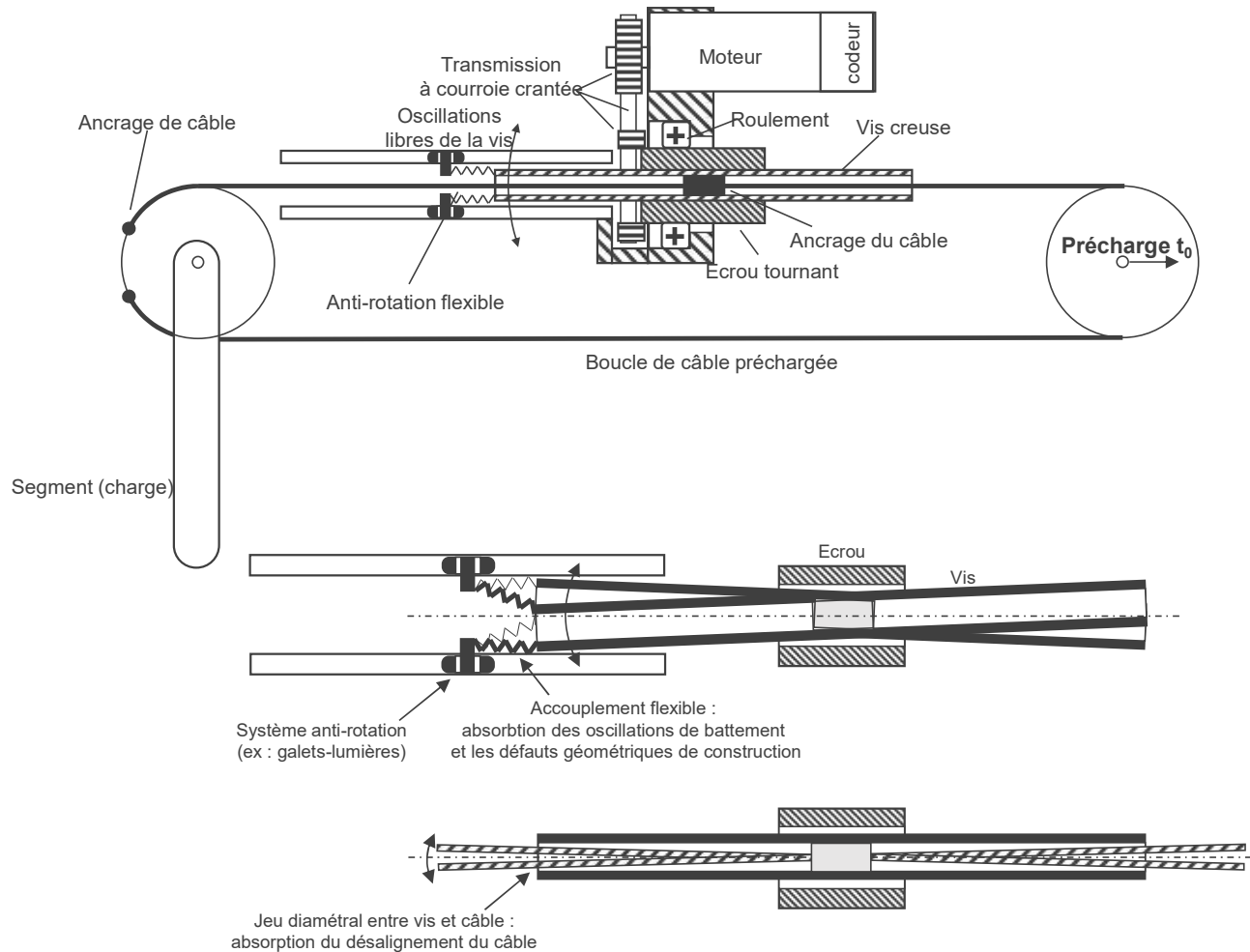


Bras standard de télémanipulation mécanique
à transmissions à câbles
(La Calhène - MA30)



Brevet du concept du 1^{er} vérin à câble (2000)

Montage flottant (sans guidage linéaire) exploitant la flexibilité du câble

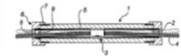


10 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE 11 N° de publication : 2 809 464
 INSTITUT NATIONAL DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE (à valoir que pour les communications de reproduction)
 PARIS 12 N° d'enregistrement national : 00 06757
 13 Int. Cl. : F 16 H 28/00

14 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

15 Date de dépôt : 28.01.00.
 16 Priorité :
 17 Demandeur(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE. Etablissement de caractère scientifique technique et industriel - IFA.
 18 Inventeur(s) : GARREC PHILIPPE.
 19 Date de mise à la disposition du public de la demande : 30.11.02 (Bulletin OJUE).
 20 Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : Se reporter à la fin du présent fascicule.
 21 Références à d'autres documents nationaux apparentés :
 22 Titulaire(s) :
 23 Mandataire(s) : BREVATOME.

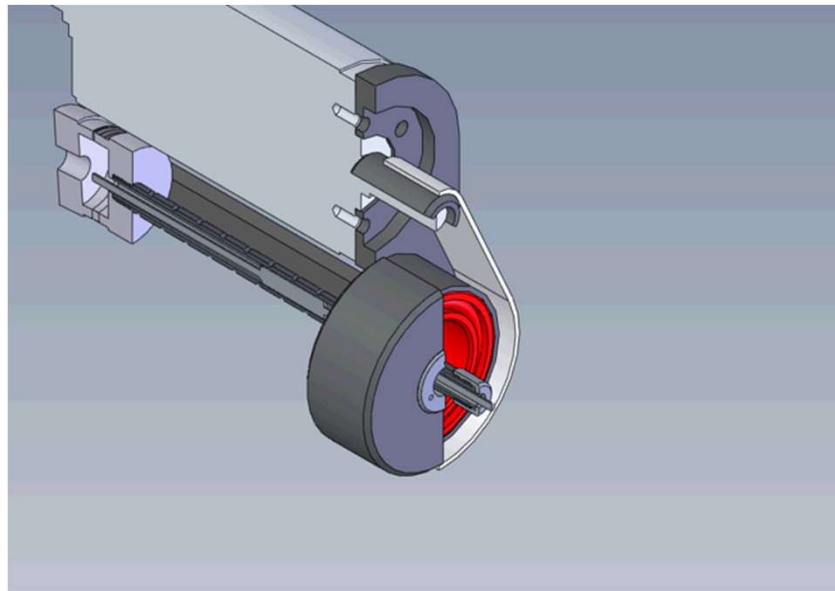
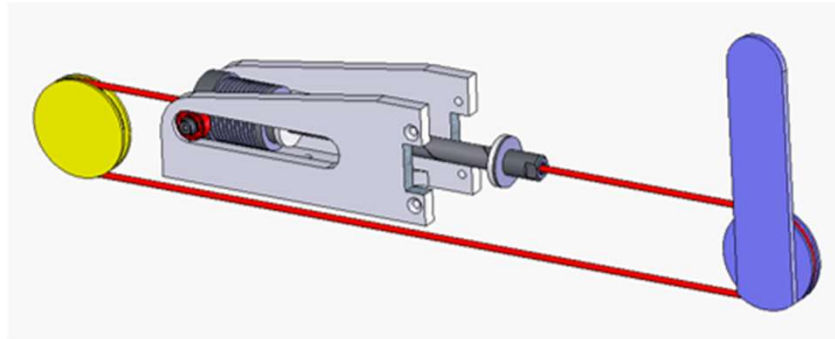
24 TRANSMISSION A VIS, ECROU ET CABLE ATTACHE A LA VIS.
 25 Un câble (4) ou un autre organe longitudinal de transmission (4) est serré (3) au centre d'une came (2) axiale d'une vis (1) équivalente à un ensemble de conversion de mouvement à vis et écrou. Grâce à cette disposition, les moments de flexion exercés sur la vis entre le point d'attache de l'organe (4) et l'écrou n'ont qu'une faible valeur, ce qui garantit la vis (1) des fissures et conséquents et fatigués du mécanisme de traitements excessifs.



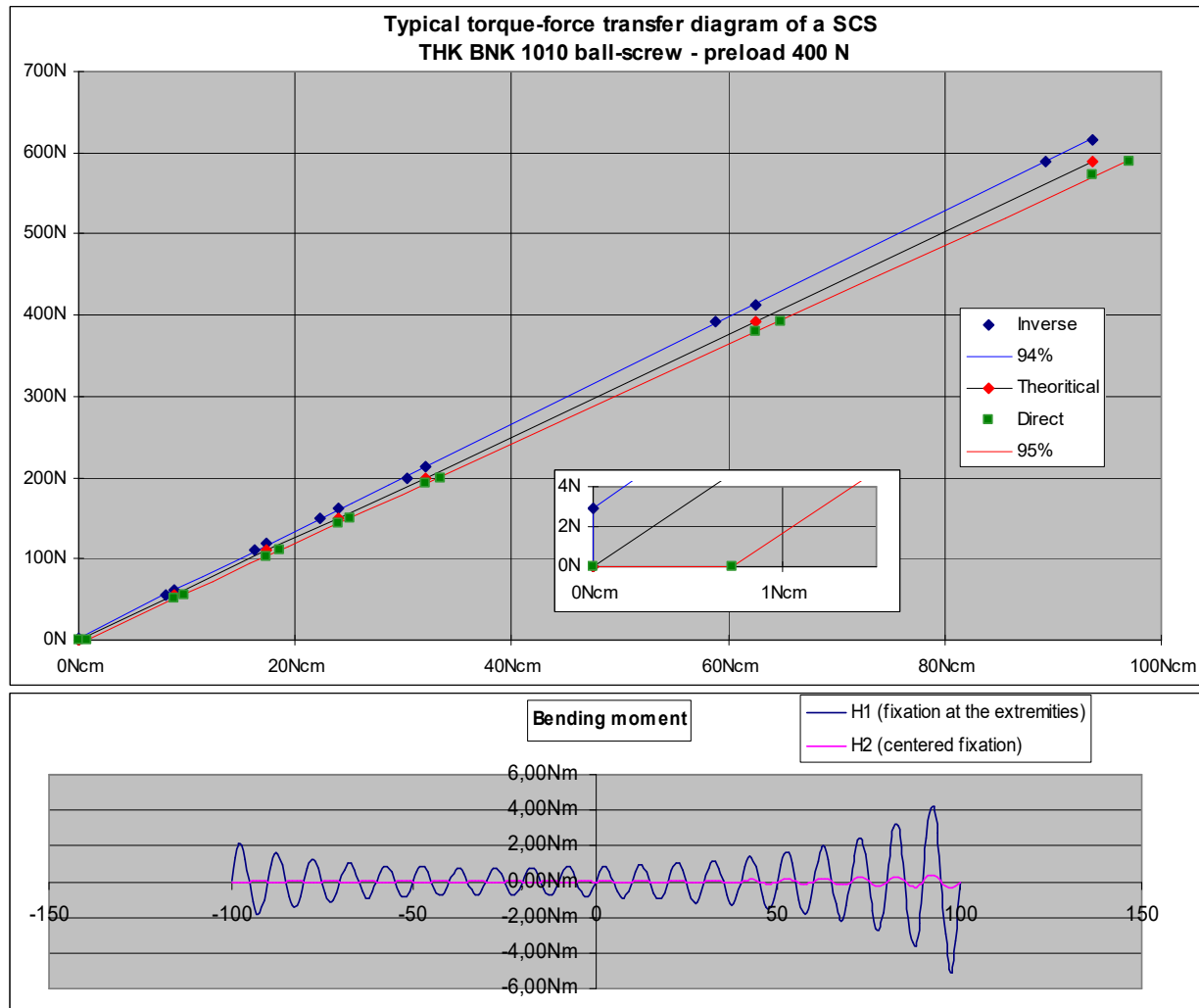
FR 2 809 464 - A1



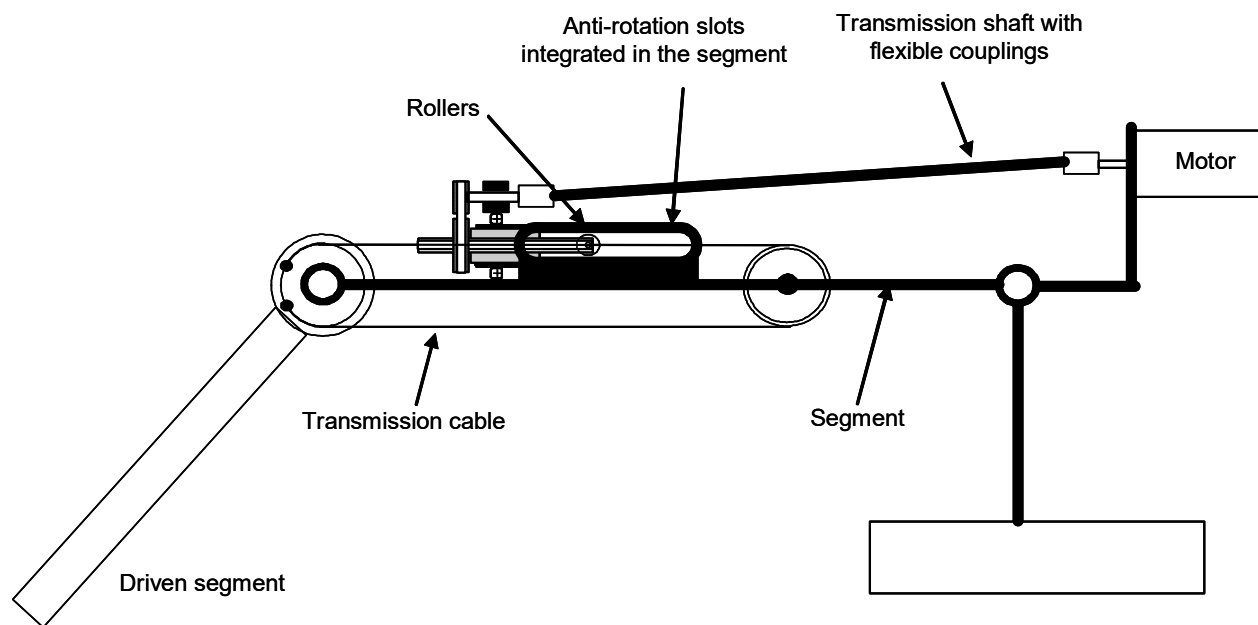
1^{er} concept de vérin à câble
SCS-A pour « Screw-Cable-System de type A »



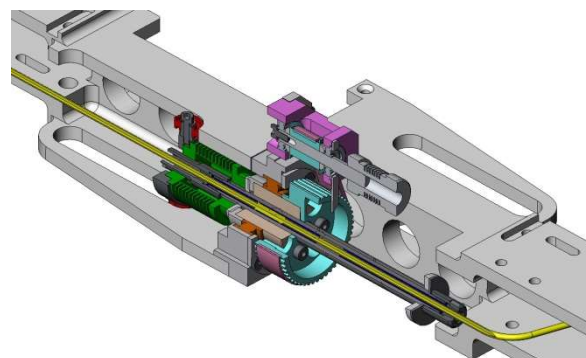
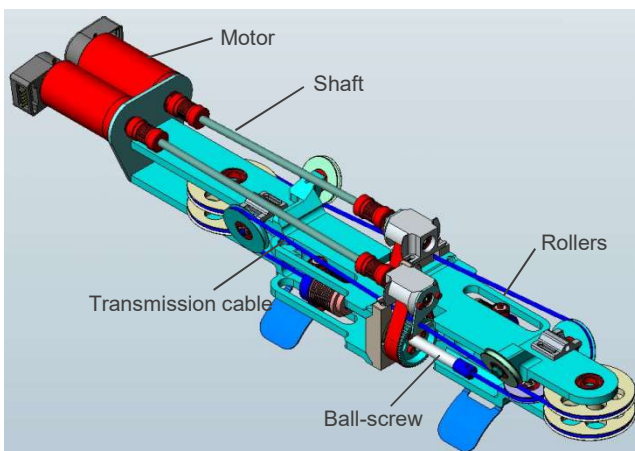
Minimisation du frottement par la réduction des moments de flexion parasites → Reproductibilité du frottement et tolérance au désalignement

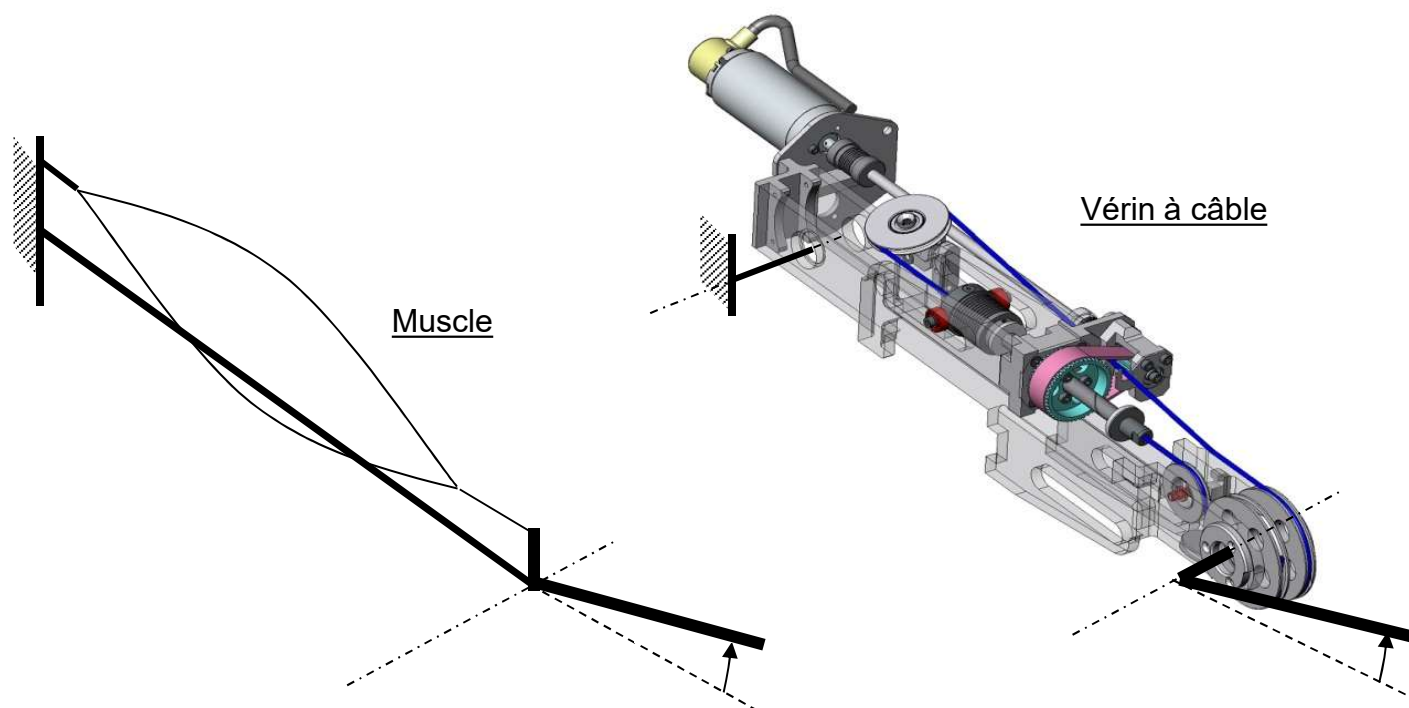


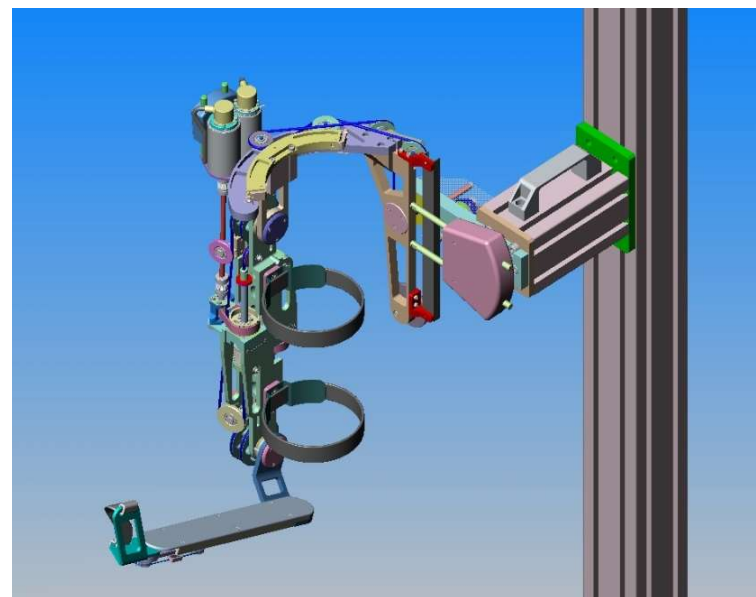
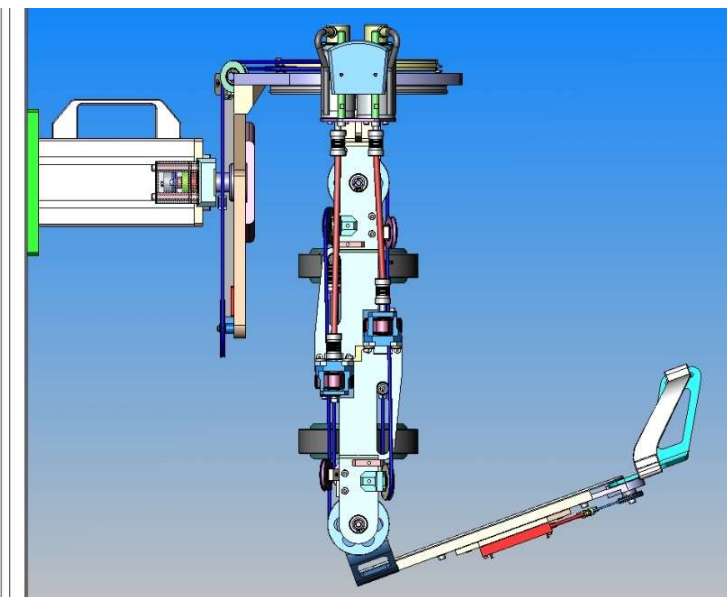
Embarquer le vérin à câble / réduire l'inertie par déport « proximal » du moteur Créer un module humérus à 2 actionneurs



HUMERUS A 2 VERINS A CABLE







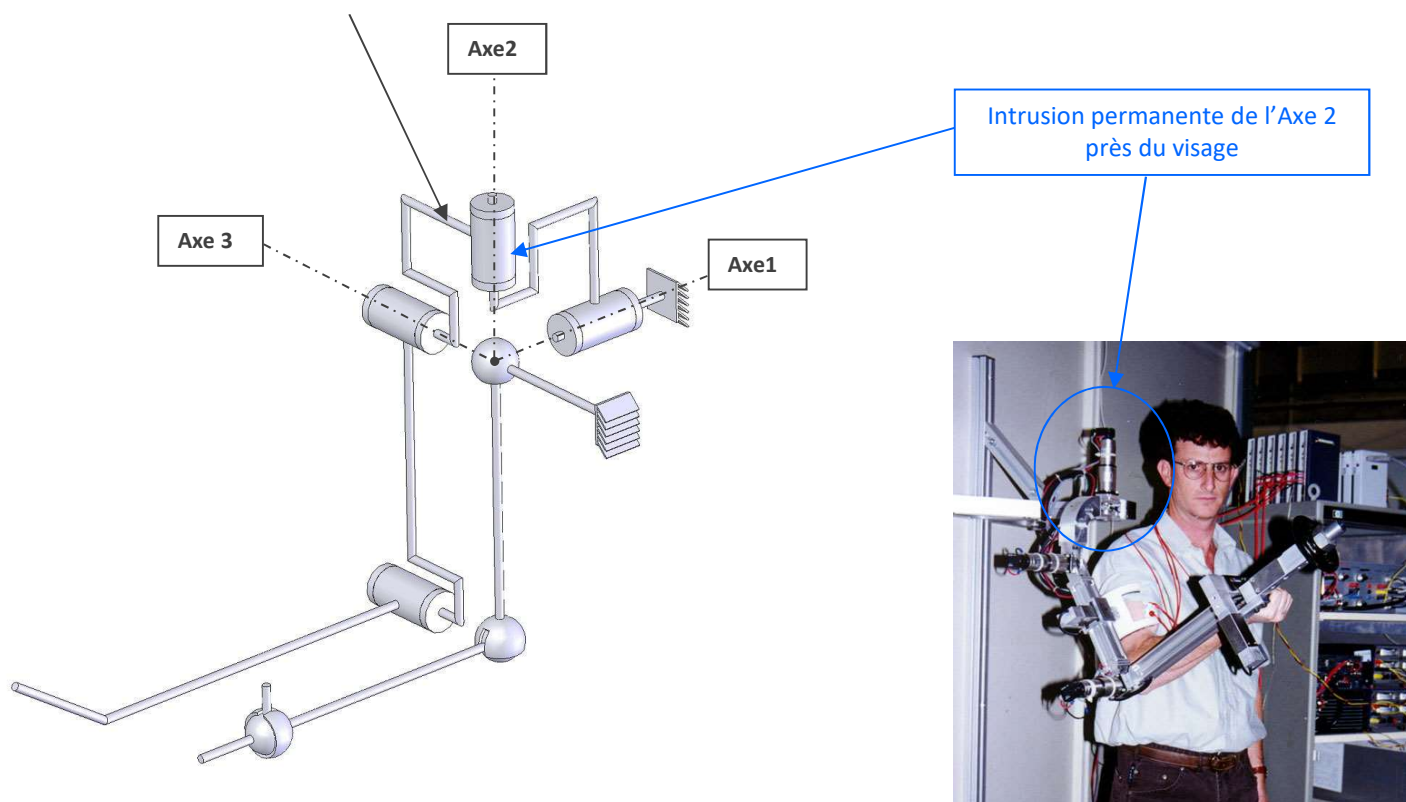
► **Objectif : créer une équivalence cinématique de l'articulation de l'épaule humaine**

► **Démarche :**

- Diminuer sa complexité en se limitant à 3 axes concourants (équivalence d'une rotule)
- Préférer des mécanismes ouverts (n'entourant pas les segments)
- Maximiser le débattement tout en évitant les interférences avec le corps humain (gêne et invasivité)

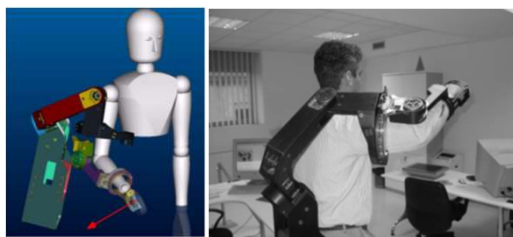
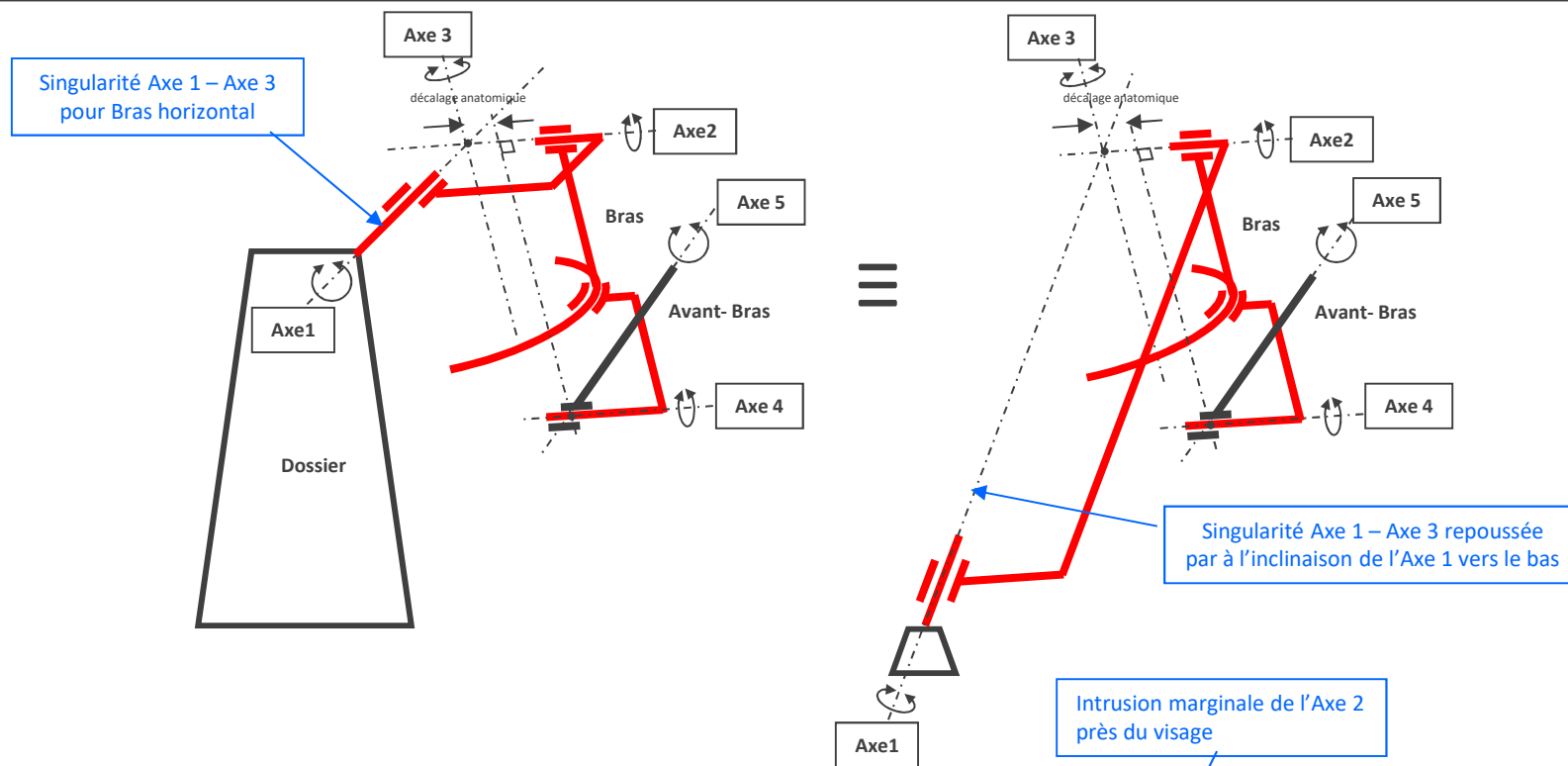
Exemple de l'état de l'art

3 axes concourants : 3 pivots en porte-à-faux (sans guidage circulaire)

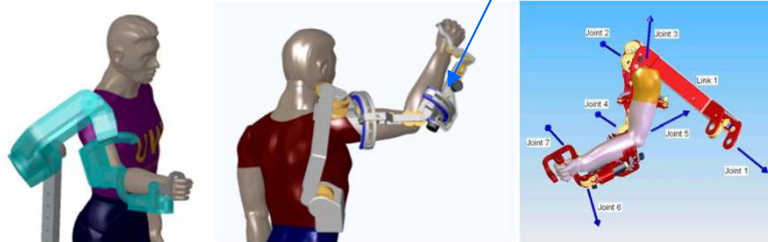


Exemples de l'état de l'art

3 axes concourants : 2 pivots consécutifs en porte-à-faux + 1 guidage circulaire ouvert épousant l'humérus

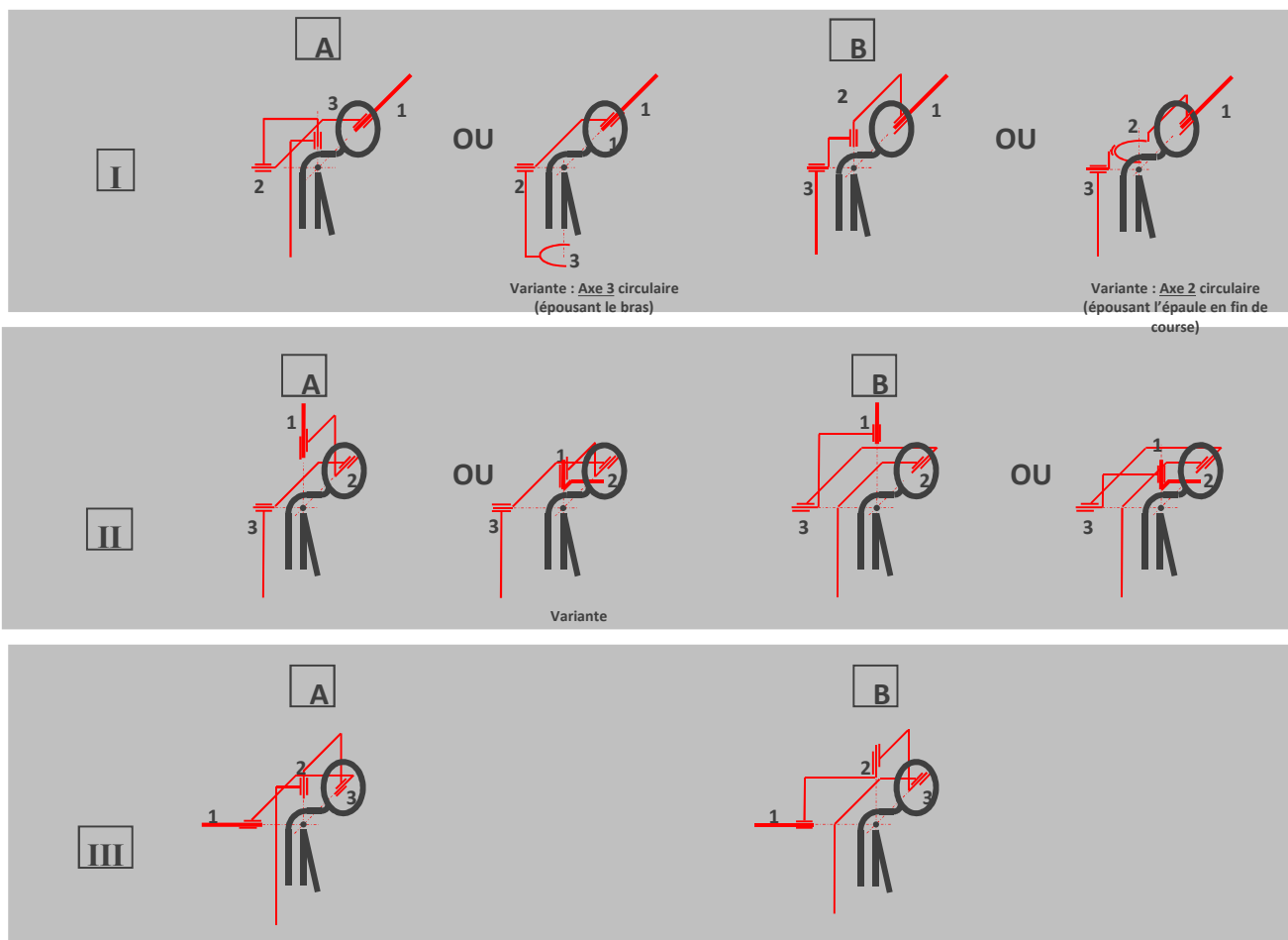


L-Exos, Santa Anna, Pisa

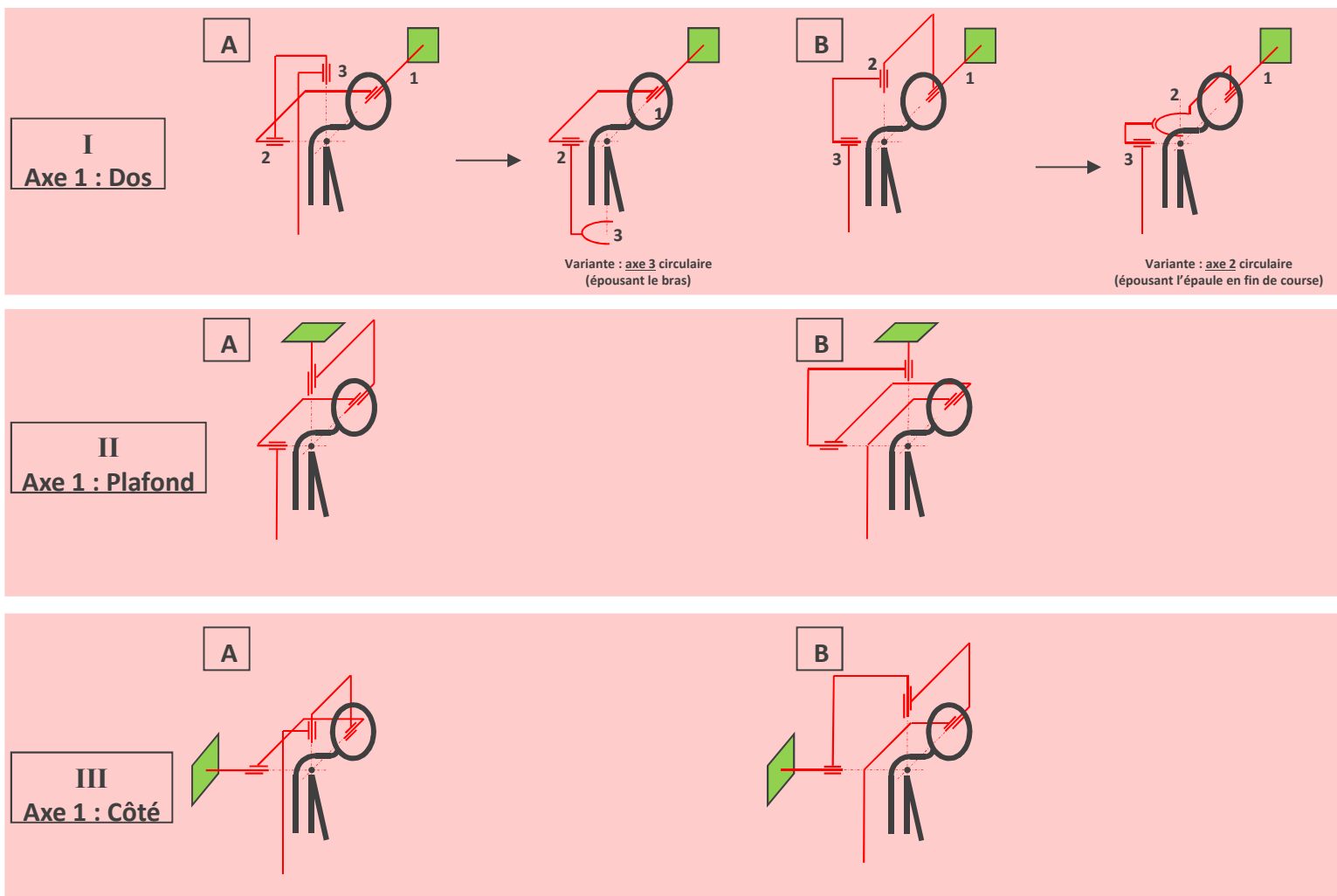


Exos, Prototype 3, Washington Univ. Seattle

Classification systématique (pivots orthogonaux)



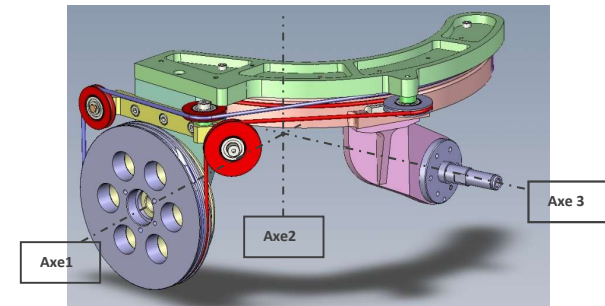
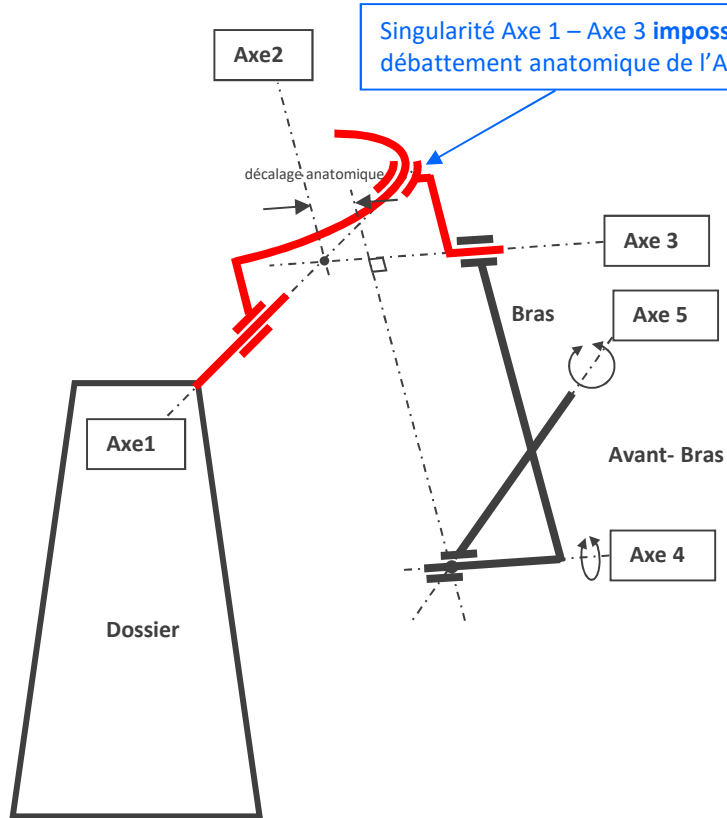
Classification systématique (pivots orthogonaux)



Solution de l'épaule ABLE type A

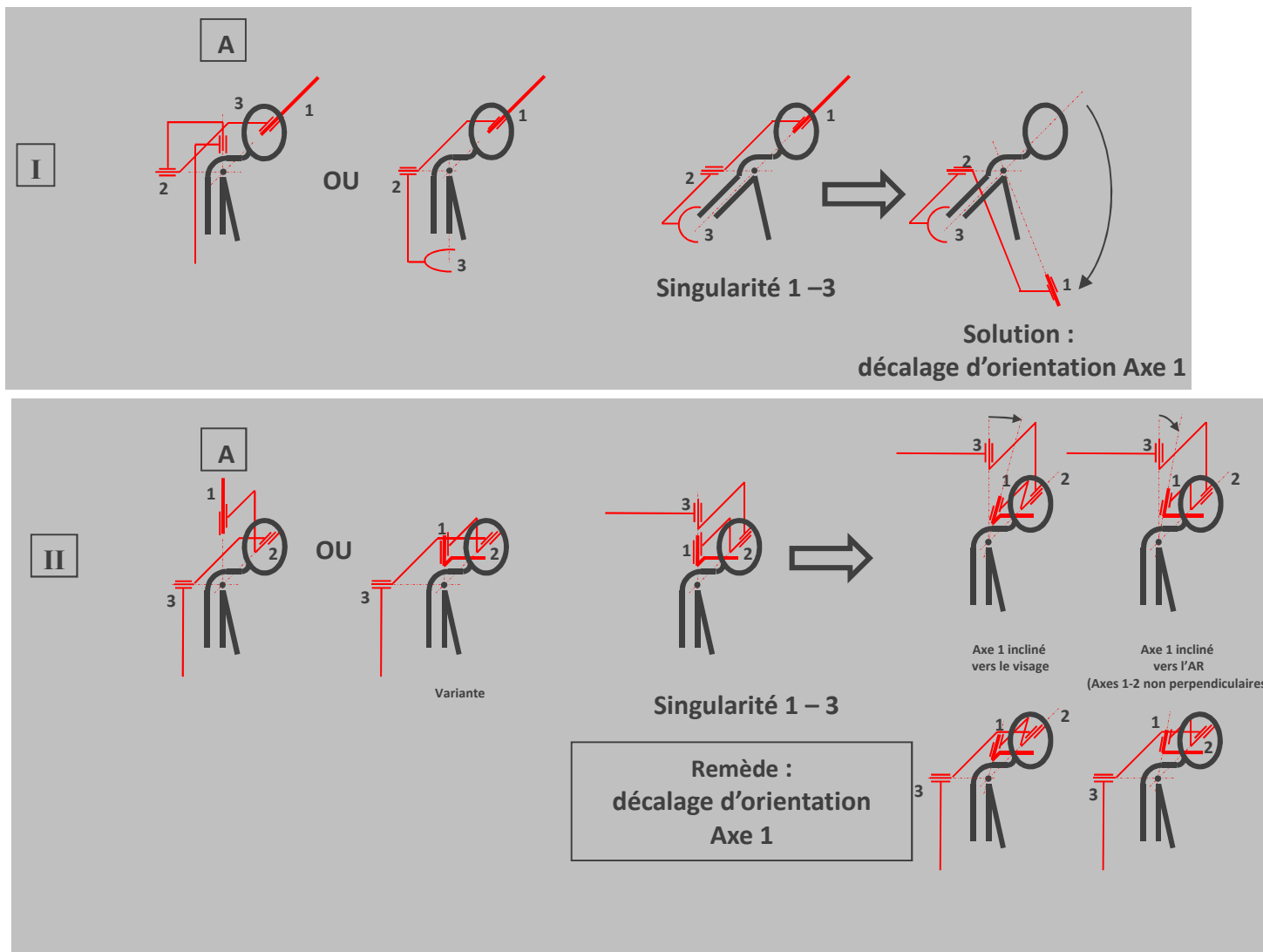
3 axes concourants : 1 pivot en porte-à-faux + 1 guidage circulaire + 1 pivot en porte-à-faux

Singularité Axe 1 – Axe 3 impossible : débattement anatomique de l'Axe 2 insuffisant





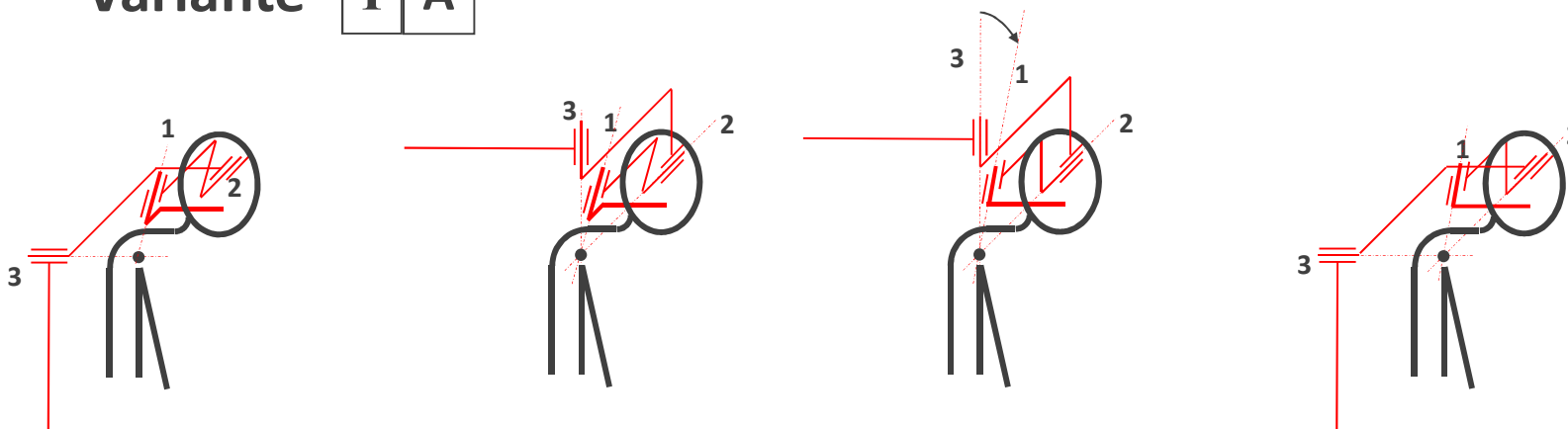
Des pivots orthogonaux aux non-orthogonaux



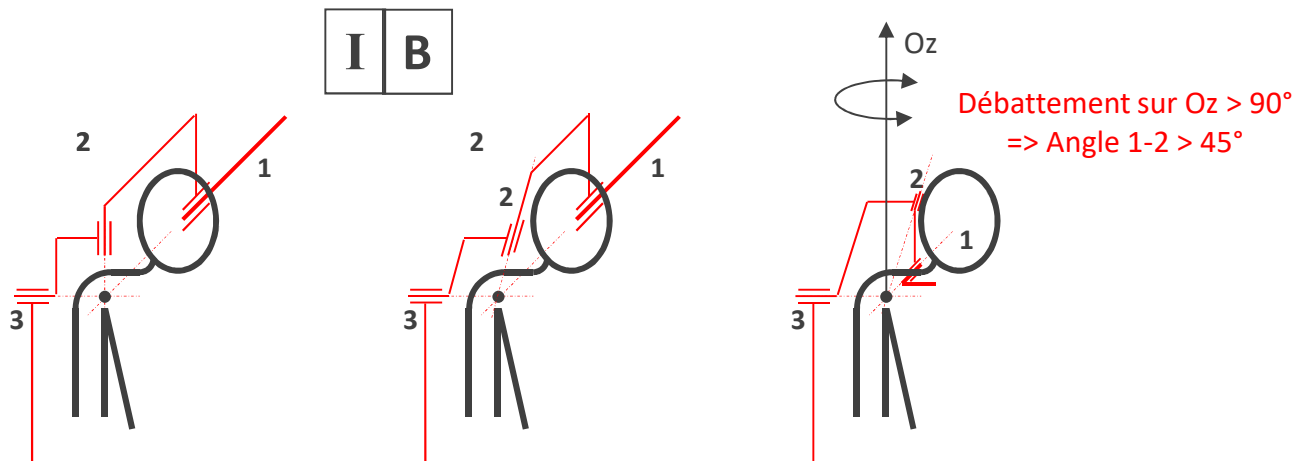
Solution à étudier

Variante

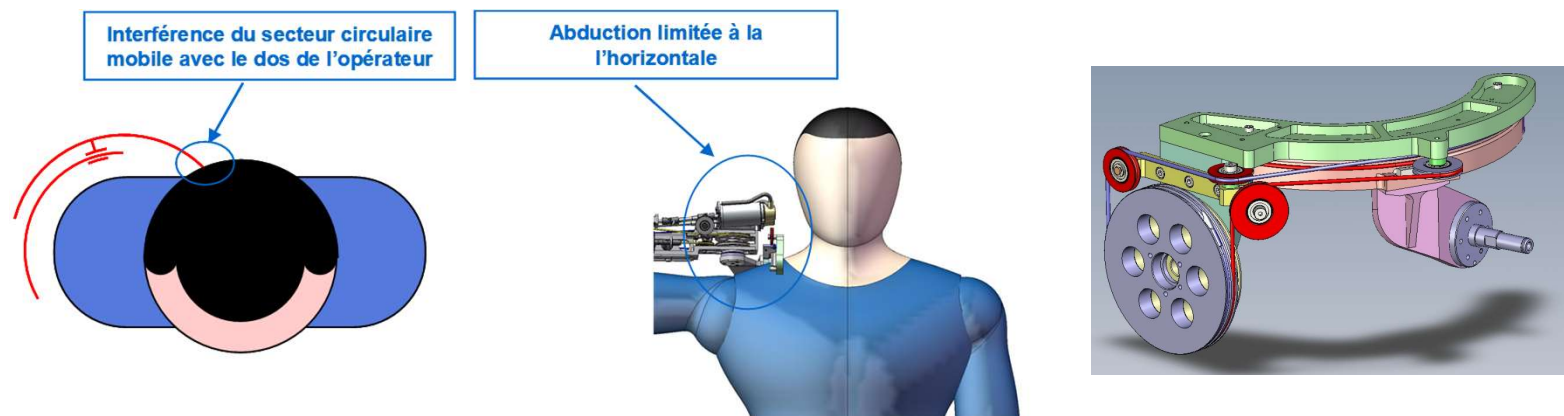
I A

Axe 1 incliné
vers le visageAxe 1 incliné
vers l'AR
(Axes 1-2 non perpendiculaires)

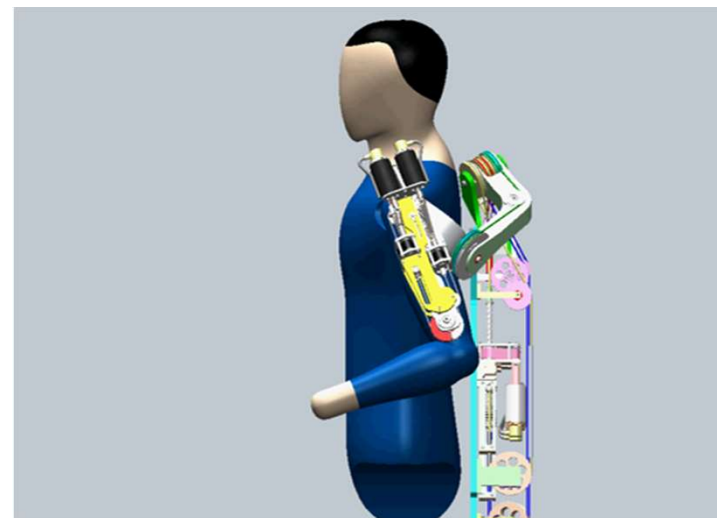
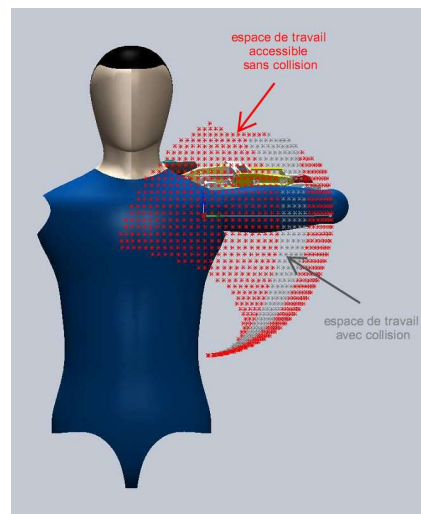
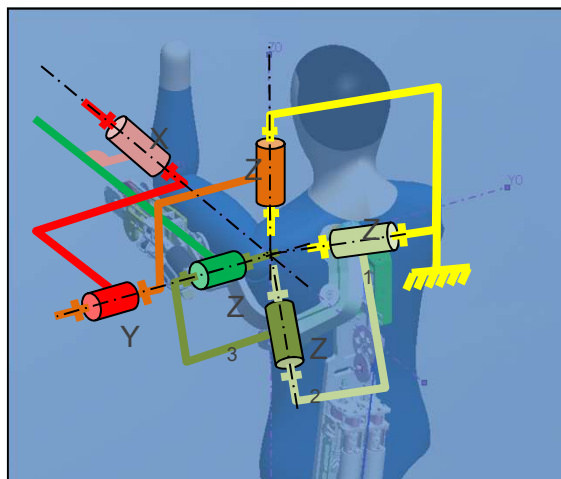
I B



Défauts du mécanisme Type A (3 pivots orthogonaux avec guidage circulaire)



Confirmation des choix et recherche d'optimisation du mécanisme Type B (3 pivots simples non orthogonaux)





① RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
 INSTITUT NATIONAL
 DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
 PARIS

⑪ N° de publication : **2 949 669**
 (à utiliser que pour les
 commandes de reproduction)

⑫ N° d'enregistrement national : **09 04313**

⑬ Int Cl⁸ : **A 61 F 5/01 (2006.01)**

⑭ **DEMANDE DE BREVET D'INVENTION** **A1**

⑮ Date de dépôt : 09.09.09.
 ⑯ Priorité :

⑰ Date de mise à la disposition du public de la
 demande : 11.03.11 Bulletin 11/10.

⑱ Liste des documents cités dans le rapport de
 recherche préliminaire : Se reporter à la fin du
 présent fascicule

⑲ Références à d'autres documents nationaux
 apparentés :

⑴ Demandeur(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE Etablissement public à caractère industriel et commercial — FR.

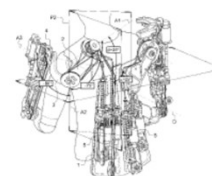
⑵ Inventeur(s) : GARREC PHILIPPE.

⑶ Titulaire(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE Etablissement public à caractère industriel et commercial.

⑷ Mandataire(s) : CABINET BOETTCHER.

⑳ **MÉCANISME D'EPAULE POUR ORTHÈSE.**

㉑ L'invention est relative à un mécanisme d'épaule pour orthèse comportant successivement :
 - un premier élément (1) fixe par rapport à l'utilisateur ;
 - un deuxième élément (2) articulé sur le premier élément selon un premier axe d'articulation (A1) ;
 - un troisième élément (3) articulé sur le deuxième élément selon un deuxième axe d'articulation (A2) ;
 - un bras (4) qui est articulé au troisième élément selon un troisième axe d'articulation (A3) ;
 Selon l'invention, les axes d'articulation (A1, A2, A3) sont inclinés par rapport aux directions verticale et horizontale lorsque le bras de l'utilisateur est au repos.

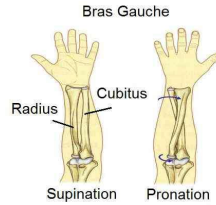
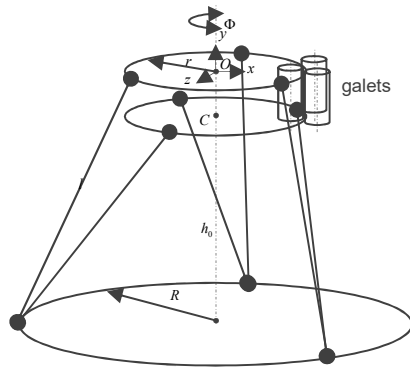


FR 2 949 669 - A1

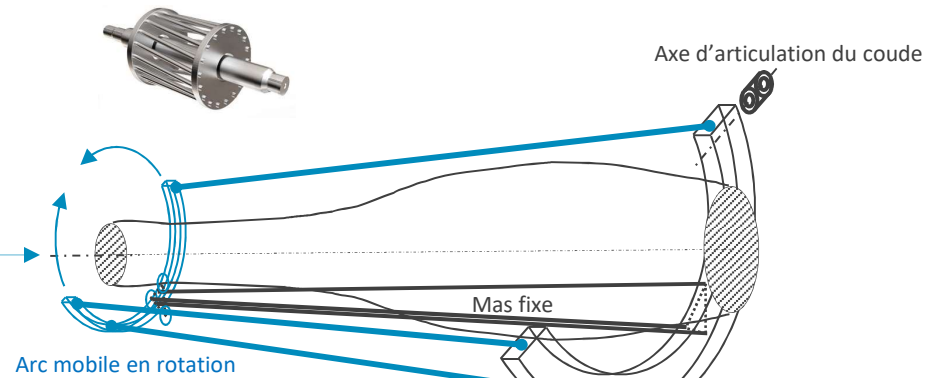


PRONO-SUPINATION (Brevet 2007)

Principe : parallélogramme "spatial" + guidage circulaire
 Bio- ou Techno- inspiré ? → consciemment techno-inspiré



Mouvement parasite



(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle
 Bureau International

(43) Date de la publication internationale
 24 décembre 2008 (24.12.2008)

(51) Classification internationale des brevets
 A61F 8/00 (2006.01) B21J 9/00 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale
 FR 07 00001738

(22) Date de dépôt internationale
 12 juin 2007 (12.06.2007)

(23) Langue de dépôt
 français

(24) Données relatives à la priorité
 12 juin 2007 (12.06.2007) FR 0755761

(71) Demandeur (pour les États-Unis) : COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE (FR/92) 25
 rue Lavoisier, Bâtiment "La Fontaine", F-75003 Paris (FR)

(72) Inventeur(s)
 (73) Bénéficiaire(s) (pour les États-Unis) : GARREC, Philippe (FR/92) 3, Résidence les Fonds Français, F-91190 Gif sur Yvette (FR)

(18) Numéro de publication internationale
 WO 2008/155286 A1

(54) Titre : FOREARM ROTATION MECHANISM AND ORTHESIS INCLUDING SUCH MECHANISM

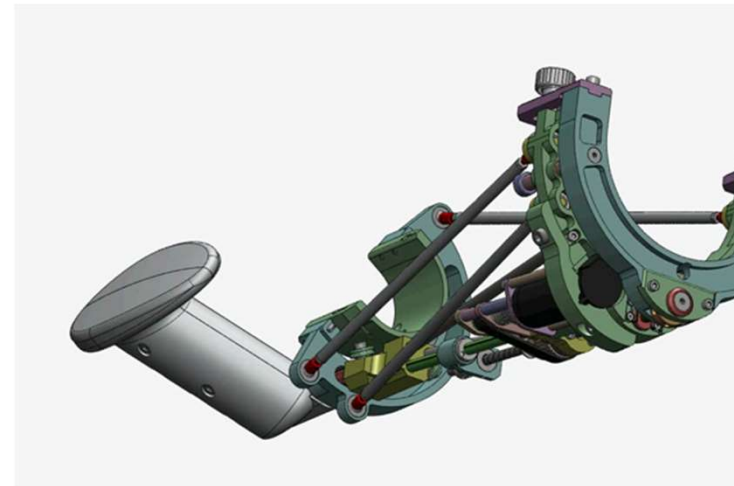
(54) Titre : MÉCANISME DE ROTATION D'AVANT-BRAS ET ORTHÈSE COMPORTANT UN TEL MÉCANISME

(57) Abstract: The invention relates to a forearm rotation mechanism, including a mobile mount (2) bearing a wrist including an arc of circular guiding track, a fixed mount (1) bearing the rear end of a forearm, rigid elongated link (12) connecting the mobile (2) and fixed mounts (1) and permitting a rotation between the mobile (2) and fixed mounts (1) about a longitudinal axis (Z) through substantially longitudinal links (14), and a rear (15) rigidly connected at one end to the fixed mount (1) and connected at the other end to a roller bearing in which the rollers are in rolling contact with the guiding track of the mobile mount (2), and imposing a pivotal movement of the mobile mount (2) about a longitudinal axis (Z), the direction of said axis (Z) intersecting the centre of the arc of circle of the guiding track and the centre of a circle defined by the ends of the link connected to the fixed mount.

(57) Abrégé : Mécanisme de rotation pour avant-bras comportant un montage mobile (2) supportant un poignet comportant une piste de guidage en arc de cercle, un montage fixe (1) supportant l'extrémité arrière d'un avant-bras, des liens (12) rigides en longueur reliant les montages mobile (2) et fixe (1) permettant une rotation entre les montages mobile (2) et fixe (1) autour d'un axe longitudinal (Z), et des liaisons articulées en rotation (14), et un roulement (15) fixé à l'une de ses extrémités rigidement au montage fixe (1), et à l'autre de son extrémité en contact avec la piste de guidage de montage mobile (2), et imposant un mouvement de rotation mobile (2) autour d'un axe longitudinal (Z), la direction dudit axe (Z) passant par le centre de l'arc de cercle de la piste de guidage et par le centre d'un cercle défini par les extrémités des liens reliant les montages fixe.

FIG. 6A
 FIG. 6B

WO 2008/155286 A1



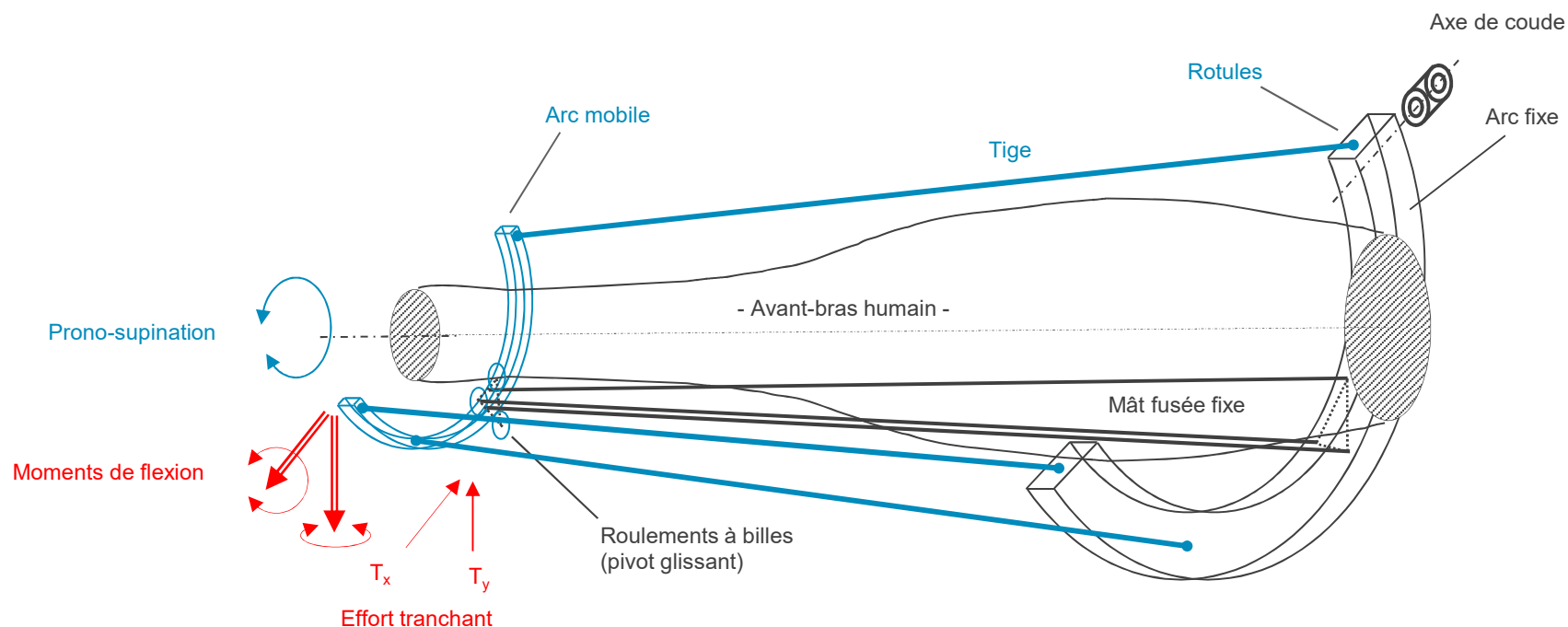
PRONO-SUPINATION

Justification du mécanisme : la RDM !

→ décomposition des sollicitations

- Moment de flexion : traction/compression des barres (effet parallélogramme) et liaisons rotules
- Effort tranchant : liaisons pivot glissant (galets roulants dans une lumière)

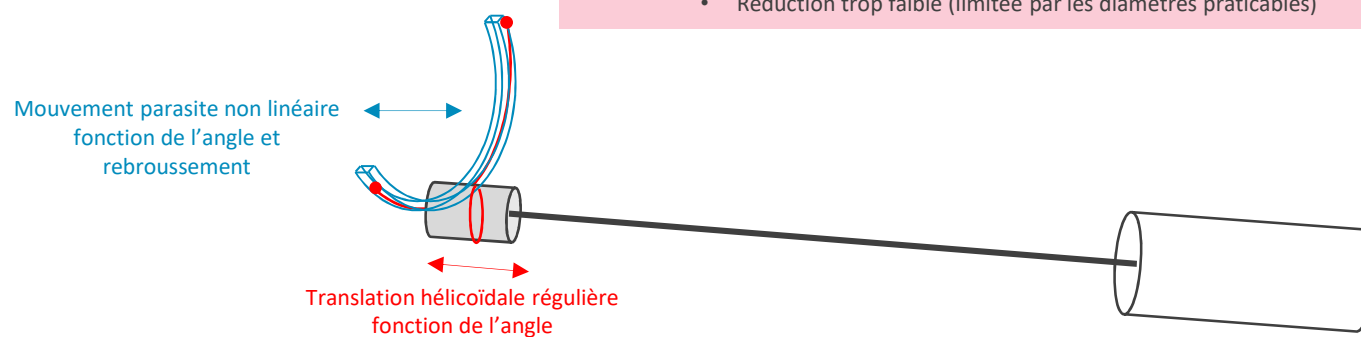
→ Transparence élevée : frottement faible et peu dépendant de la charge portée/ faible inertie



ETUDE DE L'ACTIONNEMENT DE PRONO-SUPINATION

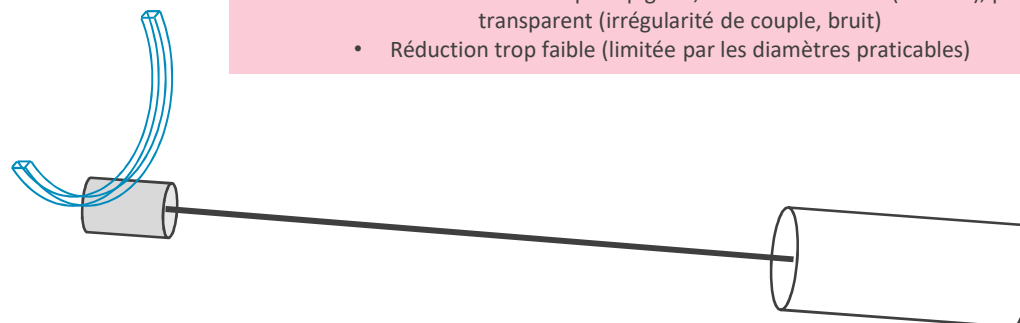
SOLUTION 1 – TRANSMISSION PARALLELE ET AMPLIFICATION PAR CABESTAN

- Incompatible avec le déplacement hélicoïdal du cabestan avec la translation parasite du mécanisme parallèle (rebroussement)
- Réduction trop faible (limitée par les diamètres praticables)



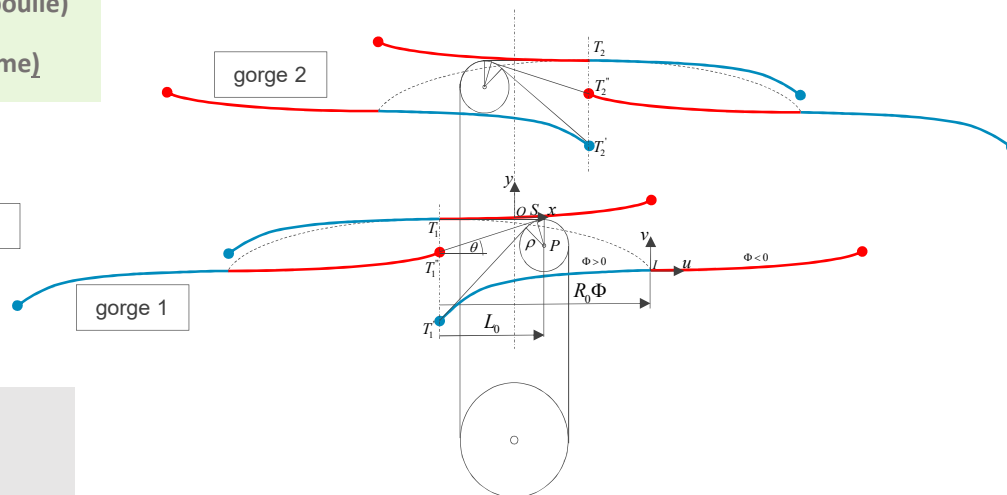
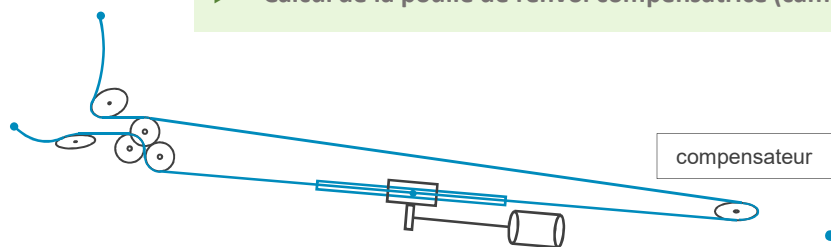
SOLUTION 2 - ENGRENAGE

- Difficulté de réalisation : petit pignon, soutien insuffisant (entraxe), peu transparent (irrégularité de couple, bruit)
- Réduction trop faible (limitée par les diamètres praticables)



Solution 3 - Vérin à câble !

- ▶ Transmission à renvoi d'angle
- ▶ Calcul des gorges spéciales (câble tangent à la poulie)
- ▶ Calcul de la poulie de renvoi compensatrice (came)



θ, v, v' are functions of the variable Φ

$$\frac{\rho(\cos\theta - 1) - y - v}{L_0 - \rho \sin\theta} = -R_0^{-1}v' = tg\theta$$

$$1/ \Rightarrow \begin{cases} \cos\theta = (1 + R_0^{-2}v'^2)^{-1/2} \\ \sin\theta = (1 + R_0^2v'^{-2})^{-1/2} \\ R_0^{-1}v'(L_0 - \rho \sin\theta) + \rho(\cos\theta - 1) - y - v = 0 \end{cases}$$

2/ \Rightarrow

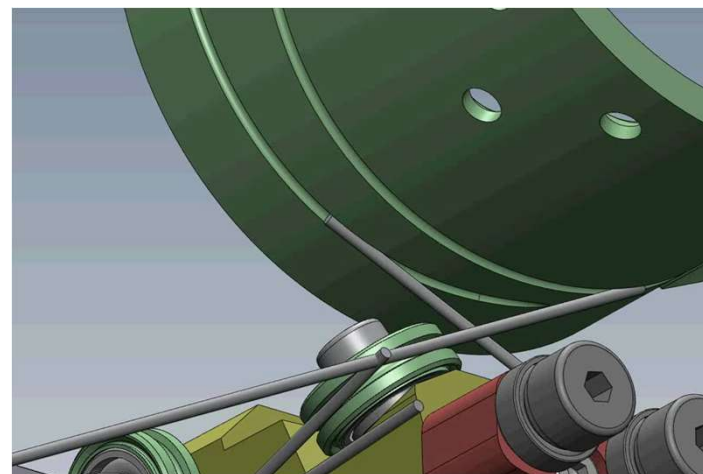
D'où l'équation différentielle non linéaire :

$$R_0^{-1}v' \left[L_0 - \rho(1 + R_0^2v'^{-2})^{-1/2} \right] + \rho \left[(1 + R_0^{-2}v'^2)^{-1/2} - 1 \right] - \sqrt{h_0^2 + 2Rr(\cos\Phi - 1)} - v = 0$$

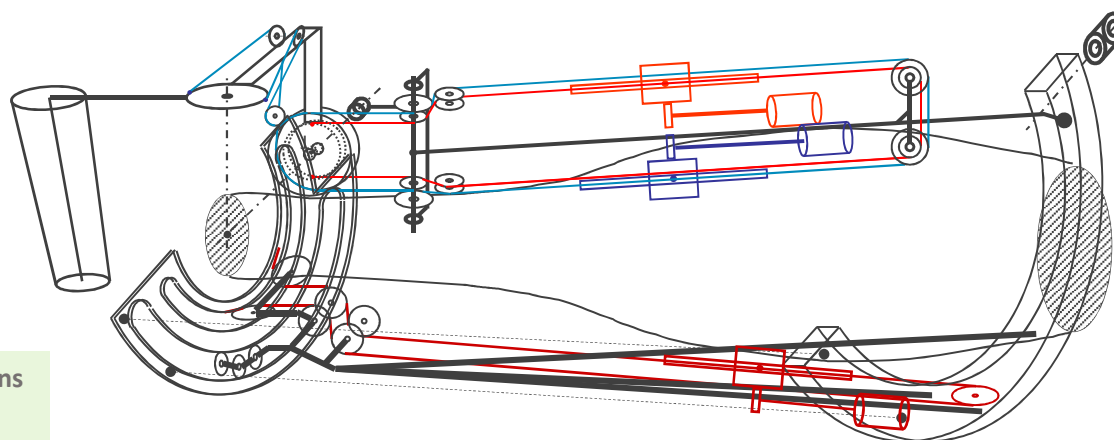
Initial conditions:

For $\Phi = 0$ we want: $\theta = 0$

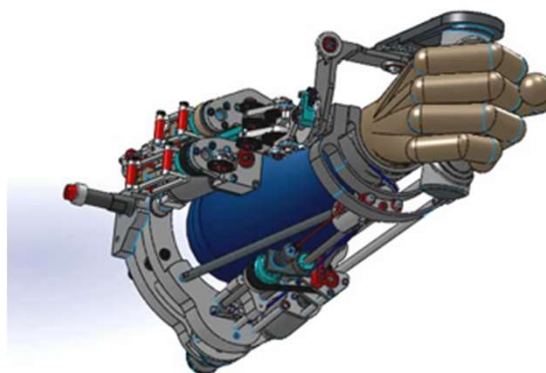
$$\Rightarrow v'(0) = v(0) = 0$$

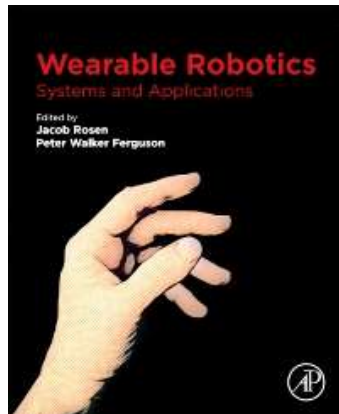


Etude du module complet “avant-bras-poignet” par adjonction de 2 vérins à câbles sur l’une des 3 branches



- ▶ Mécanisme non homogène (étude des perturbations angulaires de l’arc mobile)
- ▶ Faible rayon de gyration des masses mobiles (transparence)
- ▶ Calcul des gorges spéciales (câble tangent à la poulie)
- ▶ Calcul de la poulie de renvoi compensatrice (came)





Wearable Robotics
1st Edition
Systems and Applications
Editors: Jacob Rosen Peter Ferguson
Paperback ISBN: 9780128146590
eBook ISBN: 9780128146606
Imprint: Academic Press
Published Date: 18th November 2019

CHAPTER 3 DESIGN OF THE ARM EXOSKELETON ABLE ACHIEVING TORQUE CONTROL USING BALL SCREW AND CABLE MECHANISM

CHAPTER

3

Philippe Garrec

CEA-DRT-LIST-DIASI, Interactive Robotics Service, Saclay, France

3.1 INTRODUCTION

By the end of the 1990s, our laboratory initiated the development of the master arm Vitrosse 6D intended to succeed the MA23 for the needs of force feedback teleoperation. The MA23 is a well-known electric servomanipulator designed in 1974 by a team led by Jean Verzet which had been the first in the world where motor torque amplification (speed reduction) was achieved without gears [1,2]. Later, this innovation was acknowledged by J.K. Salisbury at MIT, who proposed a new solution—the capstan drive—an equivalent of a gear without teeth to drive the Force Reflecting Hand Controller, a 6-DOF desktop master arm implemented at the JPL [3]. This principle was proved successful especially in sensitive torque-controlled haptic devices such as the 5-DOF Phantom from Sensable [4] and on the first four joints of the 7-DOF WAM manipulator from Barrett Inc. [5]. The design of the 6-DOF Vitrosse 6D master arm (Fig. 3.1), today marketed by Haption under the name MA1700 led to the invention of the Screw-and-Cable-System (SCS) [6–8] in combining the advantages of a high-potential industrial component (the ball screw) and the preceding cable transmissions using an innovative flexible architecture.

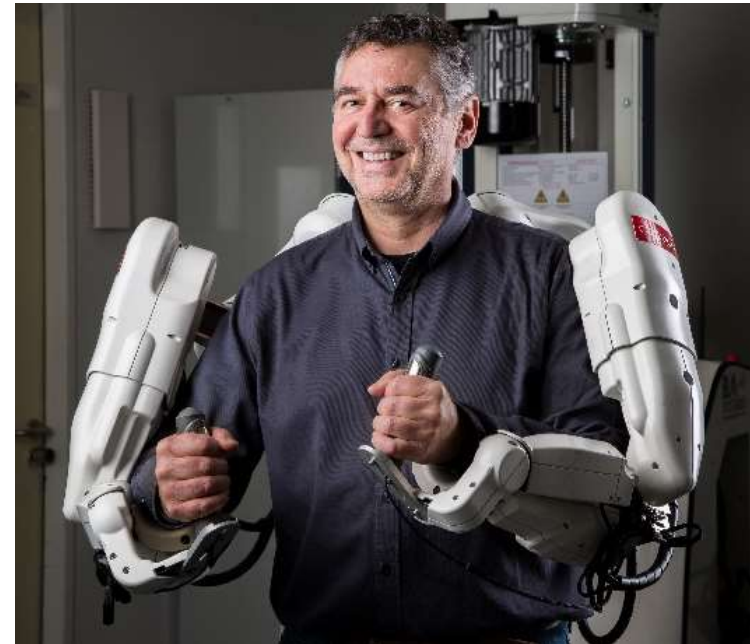
Shortly after this first achievement, the potential of the SCS as a new actuator for torque-controlled applications and its unique ease of integration into serial articulated structures was fully realized. We then decided to leverage this capital by launching the design of an exoskeleton arm as a rehabilitation device.

3.2 THE SCS MECHANISM: A NEW ANSWER TO THE CHALLENGE OF LINEAR TORQUE AMPLIFICATION

Limiting or controlling the torque in a machine using the current seems a logical, somewhat trivial principle. It was actually used early in general industry, for example, in regulating the traction on a milling mill shaft, on textile weavestock, or the traction effort of an electric locomotive. It was used as early as 1954 by R. Goetz at Argonne National Laboratory laboratories to achieve the

This article is taken from: [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54], [55], [56], [57], [58], [59], [60], [61], [62], [63], [64], [65], [66], [67], [68], [69], [70], [71], [72], [73], [74], [75], [76], [77], [78], [79], [80], [81], [82], [83], [84], [85], [86], [87], [88], [89], [90], [91], [92], [93], [94], [95], [96], [97], [98], [99], [100], [101], [102], [103], [104], [105], [106], [107], [108], [109], [110], [111], [112], [113], [114], [115], [116], [117], [118], [119], [120], [121], [122], [123], [124], [125], [126], [127], [128], [129], [130], [131], [132], [133], [134], [135], [136], [137], [138], [139], [140], [141], [142], [143], [144], [145], [146], [147], [148], [149], [150], [151], [152], [153], [154], [155], [156], [157], [158], [159], [160], [161], [162], [163], [164], [165], [166], [167], [168], [169], [170], [171], [172], [173], [174], [175], [176], [177], [178], [179], [180], [181], [182], [183], [184], [185], [186], [187], [188], [189], [190], [191], [192], [193], [194], [195], [196], [197], [198], [199], [200], [201], [202], [203], [204], [205], [206], [207], [208], [209], [210], [211], [212], [213], [214], [215], [216], [217], [218], [219], [220], [221], [222], [223], [224], [225], [226], [227], [228], [229], [230], [231], [232], [233], [234], [235], [236], [237], [238], [239], [240], [241], [242], [243], [244], [245], [246], [247], [248], [249], [250], [251], [252], [253], [254], [255], [256], [257], [258], [259], [260], [261], [262], [263], [264], [265], [266], [267], [268], [269], [270], [271], [272], [273], [274], [275], [276], [277], [278], [279], [280], [281], [282], [283], [284], [285], [286], [287], [288], [289], [290], [291], [292], [293], [294], [295], [296], [297], [298], [299], [300], [301], [302], [303], [304], [305], [306], [307], [308], [309], [310], [311], [312], [313], [314], [315], [316], [317], [318], [319], [320], [321], [322], [323], [324], [325], [326], [327], [328], [329], [330], [331], [332], [333], [334], [335], [336], [337], [338], [339], [340], [341], [342], [343], [344], [345], [346], [347], [348], [349], [350], [351], [352], [353], [354], [355], [356], [357], [358], [359], [360], [361], [362], [363], [364], [365], [366], [367], [368], [369], [370], [371], [372], [373], [374], [375], [376], [377], [378], [379], [380], [381], [382], [383], [384], [385], [386], [387], [388], [389], [390], [391], [392], [393], [394], [395], [396], [397], [398], [399], [400], [401], [402], [403], [404], [405], [406], [407], [408], [409], [410], [411], [412], [413], [414], [415], [416], [417], [418], [419], [420], [421], [422], [423], [424], [425], [426], [427], [428], [429], [430], [431], [432], [433], [434], [435], [436], [437], [438], [439], [440], [441], [442], [443], [444], [445], [446], [447], [448], [449], [450], [451], [452], [453], [454], [455], [456], [457], [458], [459], [460], [461], [462], [463], [464], [465], [466], [467], [468], [469], [470], [471], [472], [473], [474], [475], [476], [477], [478], [479], [480], [481], [482], [483], [484], [485], [486], [487], [488], [489], [490], [491], [492], [493], [494], [495], [496], [497], [498], [499], [500], [501], [502], [503], [504], [505], [506], [507], [508], [509], [510], [511], [512], [513], [514], [515], [516], [517], [518], [519], [520], [521], [522], [523], [524], [525], [526], [527], [528], [529], [530], [531], [532], [533], [534], [535], [536], [537], [538], [539], [540], [541], [542], [543], [544], [545], [546], [547], [548], [549], [550], [551], [552], [553], [554], [555], [556], [557], [558], [559], [560], [561], [562], [563], [564], [565], [566], [567], [568], [569], [570], [571], [572], [573], [574], [575], [576], [577], [578], [579], [580], [581], [582], [583], [584], [585], [586], [587], [588], [589], [590], [591], [592], [593], [594], [595], [596], [597], [598], [599], [600], [601], [602], [603], [604], [605], [606], [607], [608], [609], [610], [611], [612], [613], [614], [615], [616], [617], [618], [619], [620], [621], [622], [623], [624], [625], [626], [627], [628], [629], [630], [631], [632], [633], [634], [635], [636], [637], [638], [639], [640], [641], [642], [643], [644], [645], [646], [647], [648], [649], [650], [651], [652], [653], [654], [655], [656], [657], [658], [659], [660], [661], [662], [663], [664], [665], [666], [667], [668], [669], [670], [671], [672], [673], [674], [675], [676], [677], [678], [679], [680], [681], [682], [683], [684], [685], [686], [687], [688], [689], [690], [691], [692], [693], [694], [695], [696], [697], [698], [699], [700], [701], [702], [703], [704], [705], [706], [707], [708], [709], [710], [711], [712], [713], [714], [715], [716], [717], [718], [719], [720], [721], [722], [723], [724], [725], [726], [727], [728], [729], [730], [731], [732], [733], [734], [735], [736], [737], [738], [739], [740], [741], [742], [743], [744], [745], [746], [747], [748], [749], [750], [751], [752], [753], [754], [755], [756], [757], [758], [759], [760], [761], [762], [763], [764], [765], [766], [767], [768], [769], [770], [771], [772], [773], [774], [775], [776], [777], [778], [779], [780], [781], [782], [783], [784], [785], [786], [787], [788], [789], [790], [791], [792], [793], [794], [795], [796], [797], [798], [799], [800], [801], [802], [803], [804], [805], [806], [807], [808], [809], [810], [811], [812], [813], [814], [815], [816], [817], [818], [819], [820], [821], [822], [823], [824], [825], [826], [827], [828], [829], [830], [831], [832], [833], [834], [835], [836], [837], [838], [839], [840], [841], [842], [843], [844], [845], [846], [847], [848], [849], [850], [851], [852], [853], [854], [855], [856], [857], [858], [859], [860], [861], [862], [863], [864], [865], [866], [867], [868], [869], [870], [871], [872], [873], [874], [875], [876], [877], [878], [879], [880], [881], [882], [883], [884], [885], [886], [887], [888], [889], [890], [891], [892], [893], [894], [895], [896], [897], [898], [899], [900], [901], [902], [903], [904], [905], [906], [907], [908], [909], [910], [911], [912], [913], [914], [915], [916], [917], [918], [919], [920], [921], [922], [923], [924], [925], [926], [927], [928], [929], [930], [931], [932], [933], [934], [935], [936], [937], [938], [939], [940], [941], [942], [943], [944], [945], [946], [947], [948], [949], [950], [951], [952], [953], [954], [955], [956], [957], [958], [959], [960], [961], [962], [963], [964], [965], [966], [967], [968], [969], [970], [971], [972], [973], [974], [975], [976], [977], [978], [979], [980], [981], [982], [983], [984], [985], [986], [987], [988], [989], [990], [991], [992], [993], [994], [995], [996], [997], [998], [999], [1000].

45



Able 7D bilatéral, Haption™

CHAPTER 3 - DESIGN OF THE ARM EXOSKELETON ABLE ACHIEVING TORQUE CONTROL USING BALL SCREW AND CABLE MECHANISM

Philippe Garrec

CEA-DRT-LIST-DIASI, Interactive Robotics Service, Saclay, France

2019

- ▶ **Bio- ou Techno- inspiration consciente ?**
- ▶ **Le vérin à câble une solution performante pour la commande linéaire du couple mais « bizarre » (boucle asymétrique)**
- ▶ **L'épaule à 2 pivots non-orthogonaux : une solution cinématiquement non optimale pour un meilleur mariage homme-exo ?**
- ▶ **Le mécanisme d'avant-bras-poignet :**
 - Réponse optimisée pour l'acceptabilité et le vêtement et la transparence (découplage moment/résultante et optimisation du guidage mécanique associé)
 - Est-il bio- ou techno- inspiré ?
 - La synergie du mécanisme articulé avec le vérin à câble est-elle optimale ?
 - Prono-supination : une adéquation a priori peu évidente
 - Transmission parallèle à cabestan (envisagée)
 - Transmission parallèle à engrenage
 - **Vérin à câble (renvoi d'angle à câble, gorges spéciales, compensateur)**
 - Poignet : une adéquation évidente
- ▶ **Bénédiction des contraintes ou choix d'une contrainte génératrice ?**