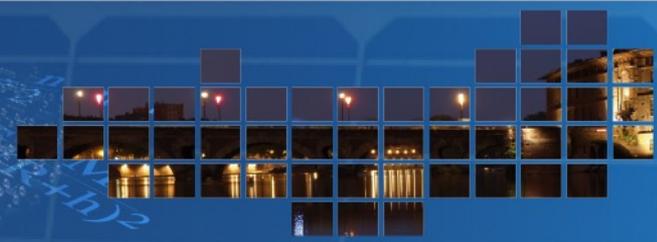


# Les Muscles Artificiels sont-ils les Actionneurs de la Robotique du Futur?

Bertrand Tondu (INSA-Toulouse and LAAS-CNRS)  
Novembre 2023



## Introduction: Comment expliquer les difficultés actuelles de la robotique humanoïde?



En 2018, Honda renonce au robot ASIMO, 18 ans après ses débuts en robotique humanoïde



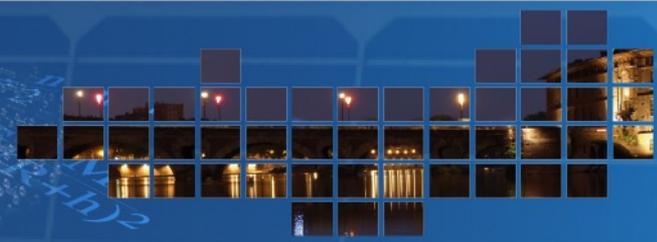
Travaille t-on encore sur le robot ROMEO, projet initié en 2009?

- ✓ Est-ce un problème de commande qui limiterait, voire empêcherait le mimétisme de la marche humaine?
- ✓ Est-ce un problème d'actionneur, les moteurs classiques (électriques, thermiques, fluidiques) étant mal adaptés à gérer un processus de marche qui mêle phases de stabilité et phases d'instabilité?



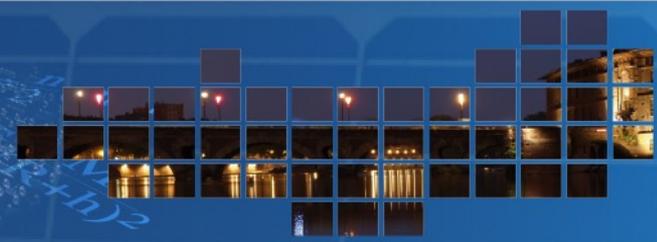
**Un biomimétisme du système musculo-squelettique est-il nécessaire pour mieux intégrer la robotique à notre environnement quotidien?**





## Plan

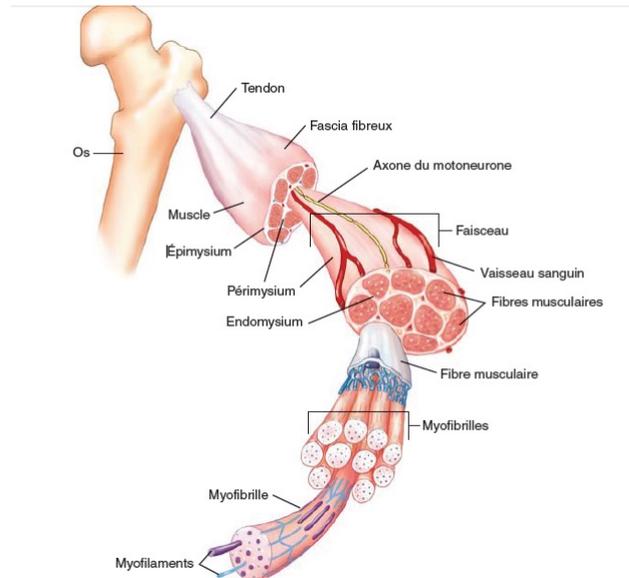
1. Définition du concept de muscle artificiel
2. Intérêt du muscle artificiel pour la robotique
3. Le biomimétisme du muscle artificiel nécessite t-il un biomimétisme plus large pour être efficace?
4. Approche pragmatique du problème: Comparer les apports respectifs du moteur électrique et des muscles artificiels.



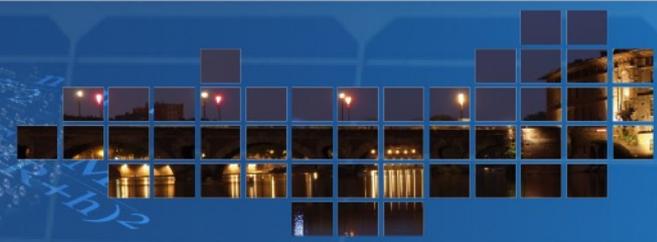
## 1. Définition du concept de muscle artificiel

### 1.1. Biomimétisme physiologique

Complexité du muscle du squelette dont les propriétés d'actionnement résultent d'une structure hiérarchisée du niveau microscopique au niveau macroscopique



Impossibilité actuelle d'aborder la conception du muscle artificiel comme un dispositif technique mimant une telle complexité systémique



## 1. Définition du concept de muscle artificiel

1.2. Biomimétisme phénoménologique: le muscle artificiel est défini à partir de deux caractéristiques phénoménologiques de sa contraction en réponse à une commande nerveuse.

- ✓ Caractéristique statique  
Tension-Longueur ,
  
- ✓ Caractéristique dynamique  
sous forme de la courbe de Hill exprimant la vitesse maximale de contraction pour une masse entraînée donnée

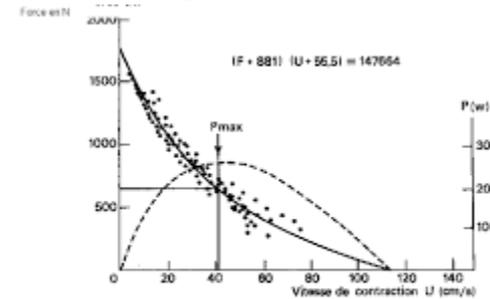
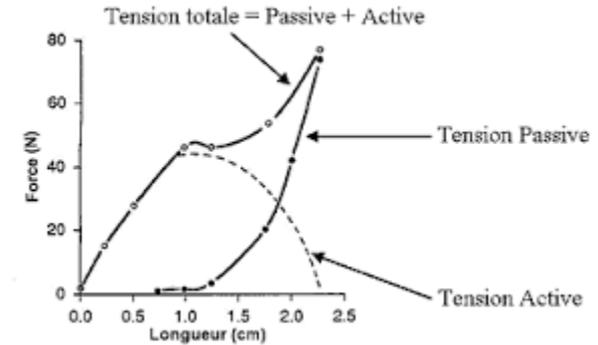
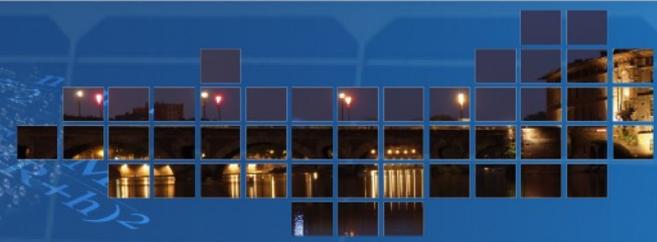


Fig. 51. Diagramme force-vitesse instantané. Contractions maximales du biceps brachial réalisées contre six inerties différentes. En pointillés, puissance calculée à partir de la force (F) et de la vitesse (U) (d'après Pertuzon et Boulset, in : Biomechanics II, Karger éd., 1971, 1 vol.).



## 1. Définition du concept de muscle artificiel

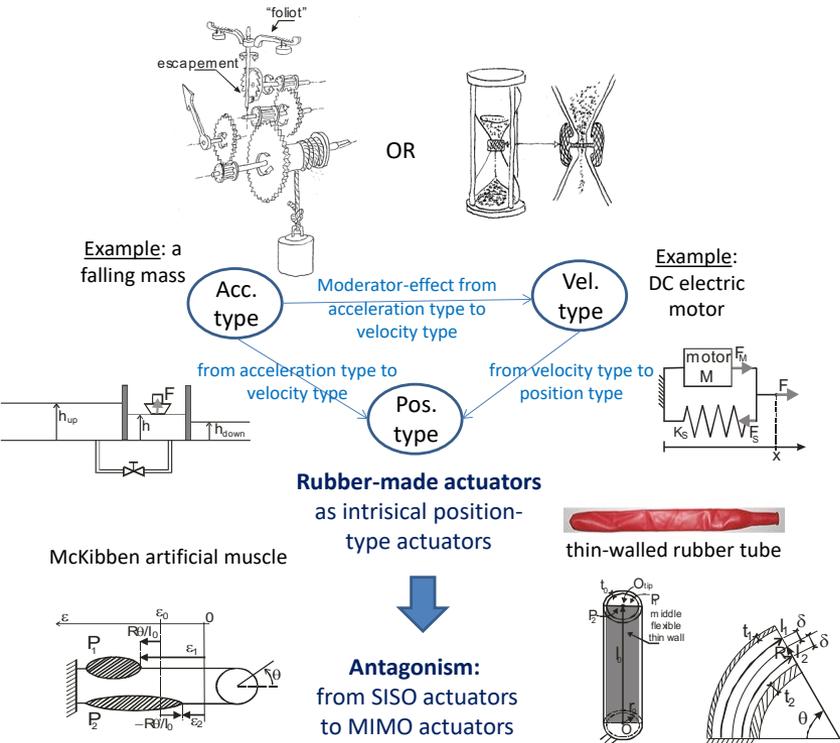
1.3. Le muscle artificiel comme nouveau type d'actionneur: actionneur dont le positionnement est stable en boucle ouverte en réponse à une variable de commande provoquant sa contraction.

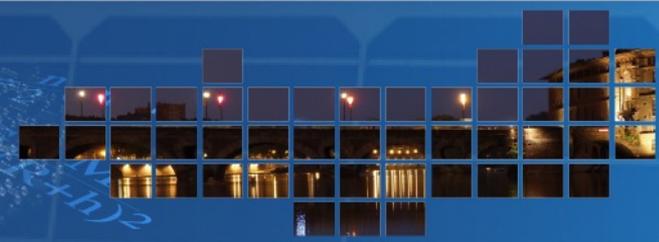


Moteur fonctionnant sur un principe de déformation de sa structure



- ✓ Complexité de modélisation,
- ✓ Présence de frottement entraînant une hystérésis entre contraction et élongation,
- ✓ Difficulté de contrôle en boucle ouverte comme en boucle fermée.



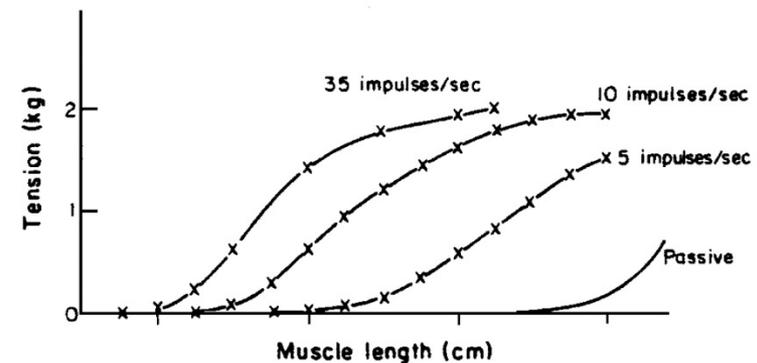


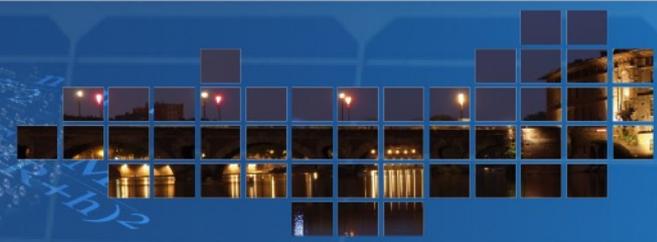
## 2. Intérêt du muscle artificiel pour la robotique

❑ L'avènement d'une robotique de service auprès de l'humain comme de l'animal impose de fortes contraintes de sécurité: Peut-on donner au robot un caractère 'human friendly' tel que tous ses mouvements soient compatibles avec une grande proximité de l'être humain?

❑ Problème mêlant :

- ✓ Le mimétisme de la peau humain et de ses capteurs intégrés,
- ✓ Le choix d'un actionneur, et de son système de commande, donnant aux articulations du robot une souplesse comparable à celle de nos articulations, fondée sur le **caractère de ressort actif du muscle du squelette.**

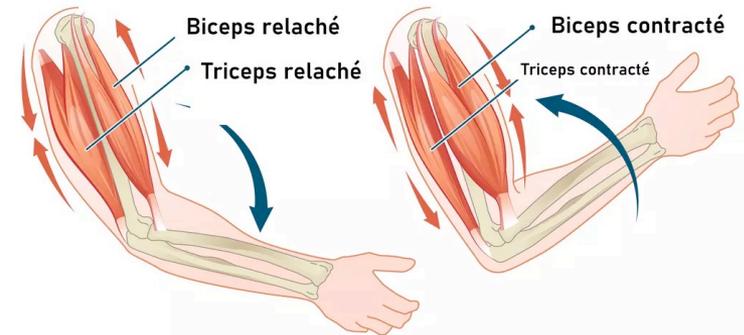




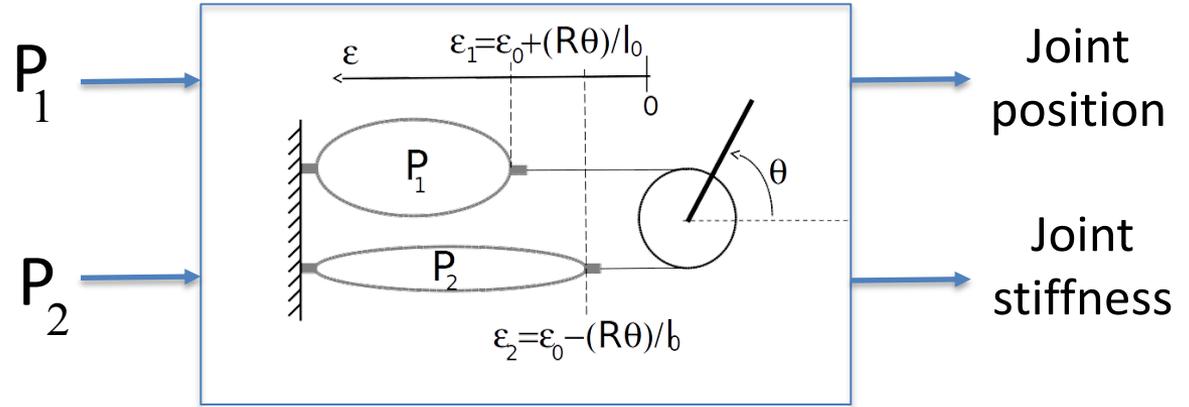
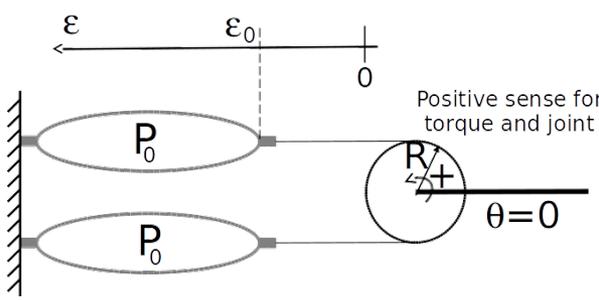
## Prépondérance des articulations en rotation dans le corps humain

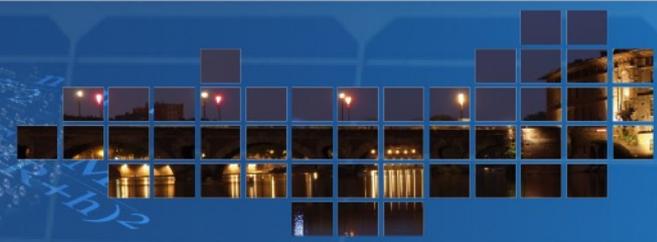


Principe d'antagonisme dans l'utilisation des muscles artificiels pour générer la rotation autour d'un axe

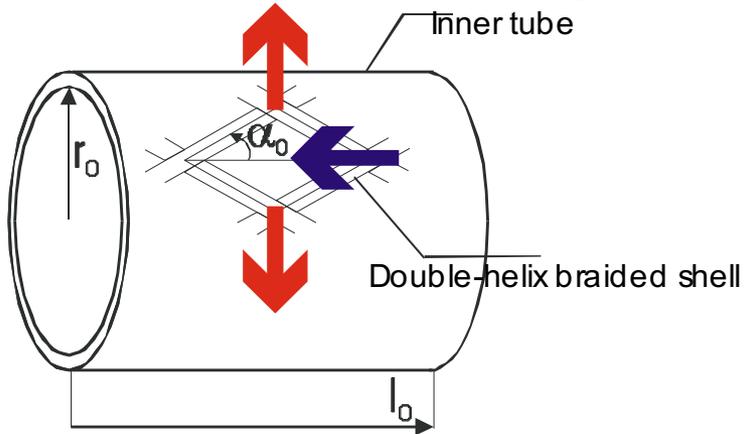


Redondance musculaire qui conduit à définir l'actionneur à muscle artificiel comme un actionneur MIMO permettant de contrôler à la fois position et raideur articulaire





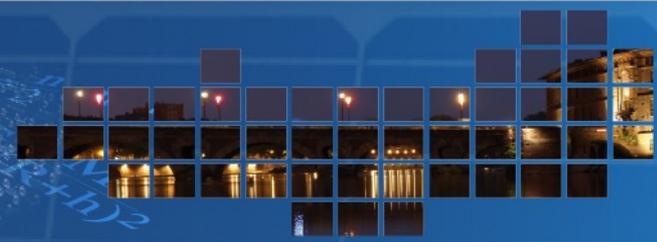
## L'actionneur à muscles antagonistes de McKibben réalise ce biomimétisme du biceps-triceps



**Mais**, malgré ses qualités biomimétiques intrinsèques, l'actionneur à muscles de McKibben, comme les autres actionneurs à muscles artificiels antagonistes, se heurte à une double difficulté pour devenir un actionneur fiable d'une robotique non fondée sur un pur apprentissage:

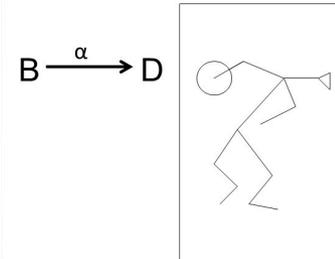
- ✓ Son hystérésis et une certaine sensibilité aux conditions extérieures qui rendent nécessaire une boucle fermée non-biomimétique qui modifie sa raideur,
- ✓ Le caractère d'entraînement direct de l'actionneur et la difficulté de modéliser l'actionneur rendent difficile l'intégration d'un modèle dynamique dans la commande.



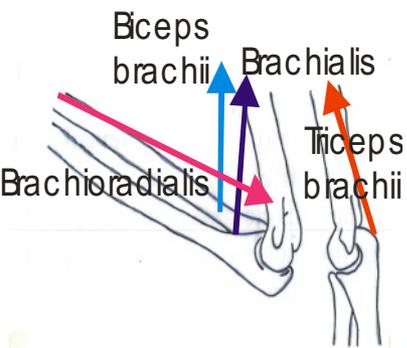


## 3. Le biomimétisme du muscle artificiel nécessite-t-il un biomimétisme plus large pour être efficace?

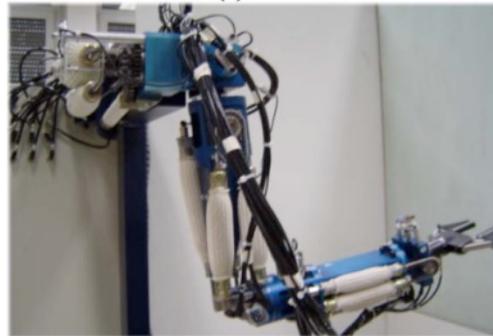
La théorie de l'anthropomorphisme (Ekiel, 1980) vise à définir une théorie globale de la modélisation des systèmes physiologiques.



Dans le cas d'un robot inspiré des membres locomoteurs, se pose la question de situer la conception de ce robot vis-à-vis, notamment, de la modélisation du système musculo-squelettique: Faut-il mimer l'ensemble des muscles d'une articulation pour que l'actionneur à muscles artificiels confère au dispositif technique une similitude gestuelle avec le corps animal?



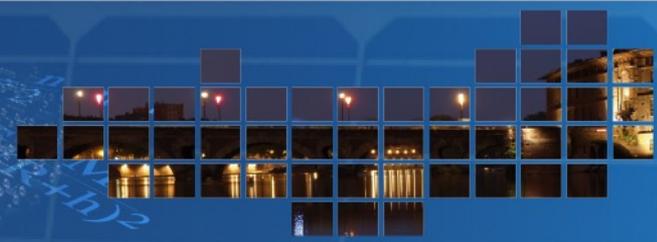
→  
Simplification  
en un système  
idéal biceps-  
triceps



→  
Tentative de  
mimer la  
musculature du  
complexe de  
l'épaule



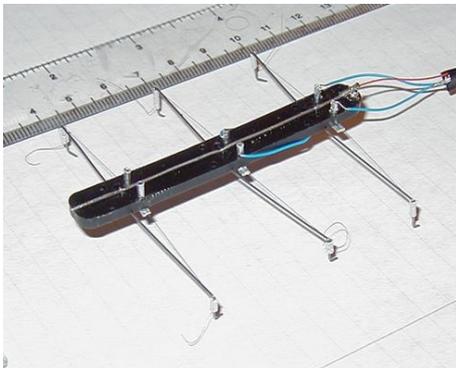
**Il est impossible aujourd'hui de répondre à cette question**



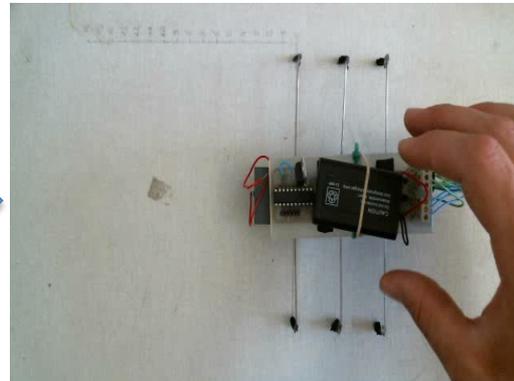
## 4. Approche pragmatique: Comparer les apports respectifs en robotique du moteur électrique et des muscles artificiels

### 4.1. Vers des robots insectes mus par des filaments contractiles: Projet de robot hexapode à filaments de NiTiinol

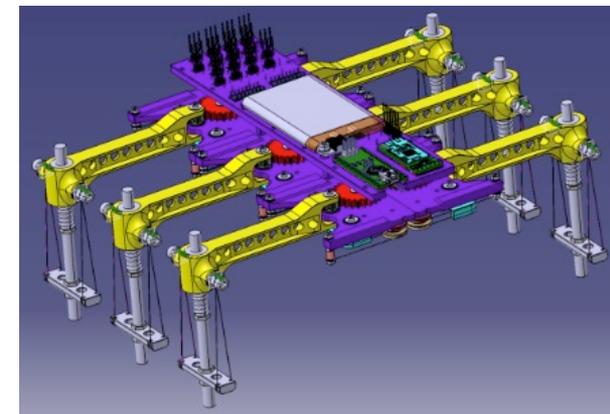
- ✓ Faible coût du Flexinol, version commerciale du NiTiinol,
- Mais** ✓ Contraction limitée à 5%,
- ✓ Difficulté de concevoir la mécanique du robot adaptée à des fils de quelques 1/10 mm.



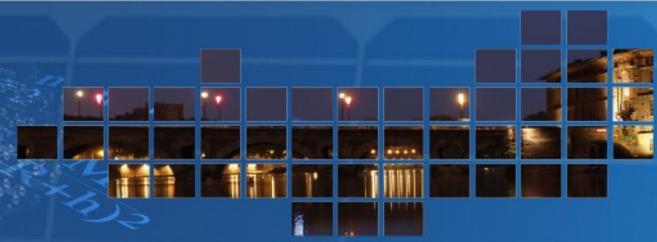
Mill's stiquito (1992)



'Big stiquito' (2013)

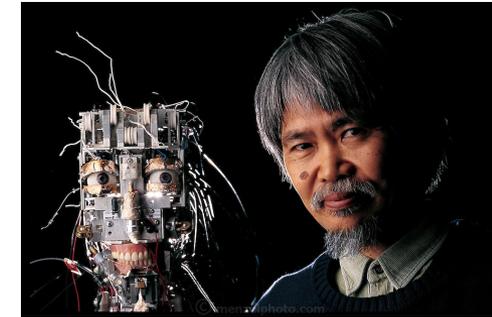


CAO du nouvel hexapode  
avec pattes à 2 d.d.l.



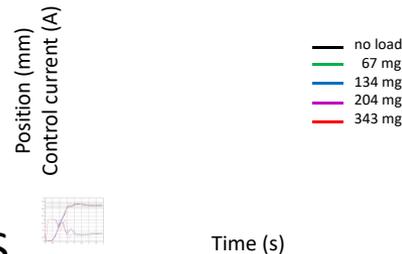
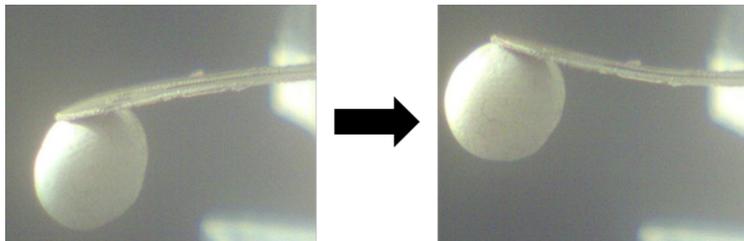
## 4.2. Muscles faciaux dérivés de la contraction de structures polymériques

- ✓ Les moteurs électriques sont mal adaptés au contrôle des expressions d'un visage robotisé,
- ✓ Des muscles artificiels sous forme de plaques souples contractiles libèreraient le volume de la tête,

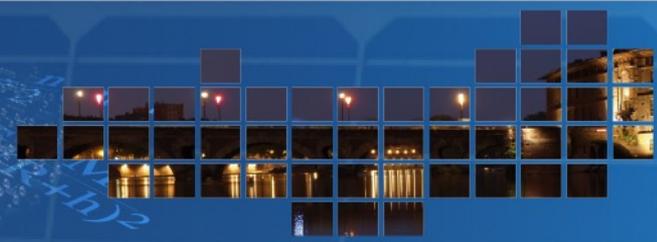


Fumio Hara's robotic head

- Mais**
- ✓ Difficulté de passer d'une bande (strip) se contractant en fléchissement (bending) à une surface contractile plus large,
  - ✓ Importance de la maîtrise de la chaleur produite lors de la contraction.



Projet ANR NAGAM dirigé par le LCC-CNRS



## 4.3. Utilisation d'actionneurs à muscles artificiels pneumatiques antagonistes pour mimer le geste humain à raideur variable: Projet de robot de rééducation post-AVC

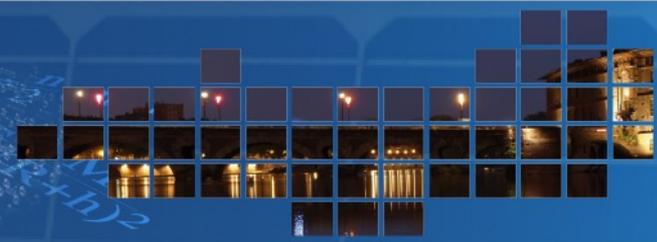
- ✓ Caractère essentiel de la rééducation post-AVC pour un accident de plus en plus fréquent du fait du vieillissement de la population, et très couteux pour la société,
- ✓ Domaine médical où la robotique est déjà présente, en rééducation de la marche et des gestes du quotidien.



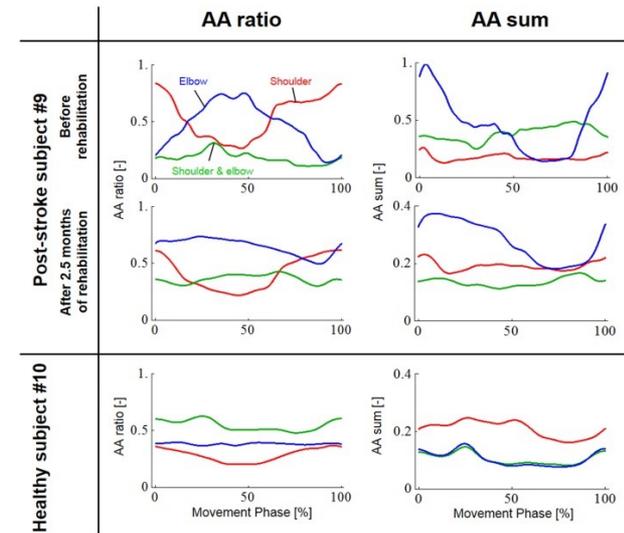
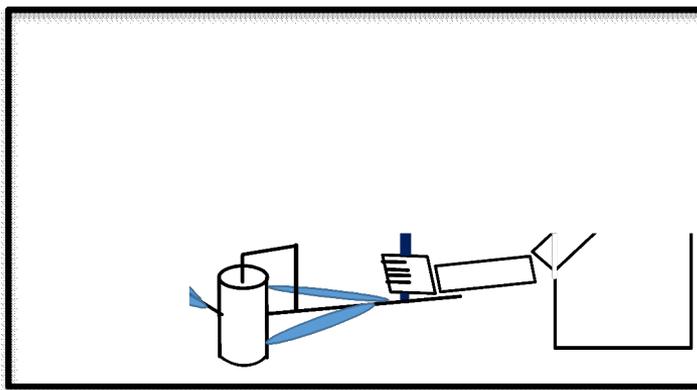
*G-EO system device  
(Reha Technology,  
Olten, Switzerland)*

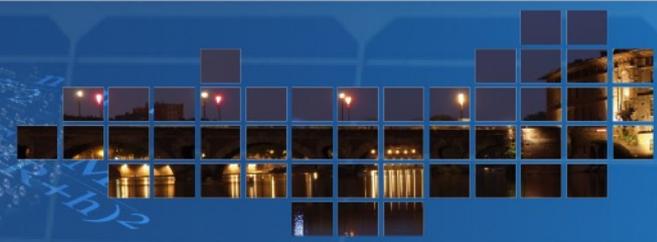


*Armeo (Hocoma,  
Switzerland)*

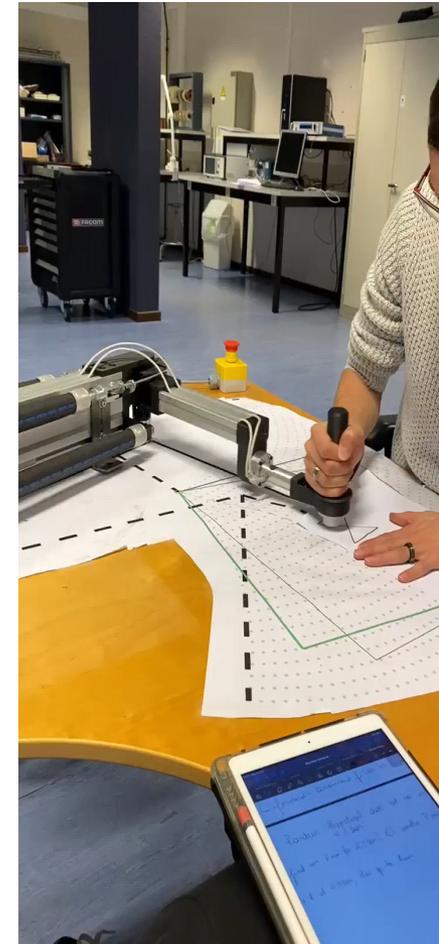
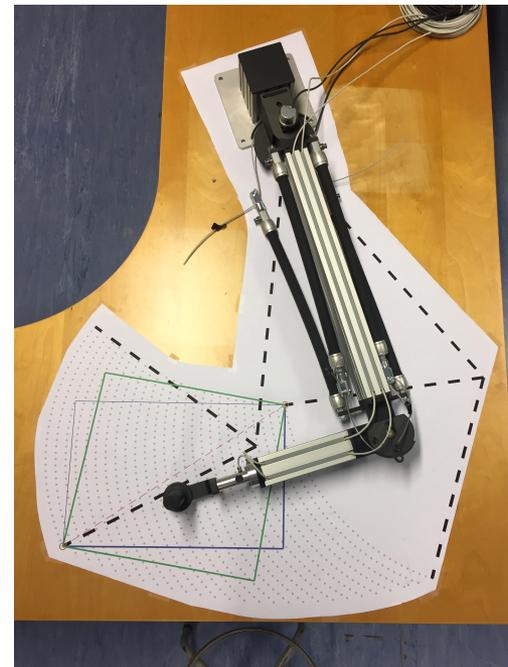


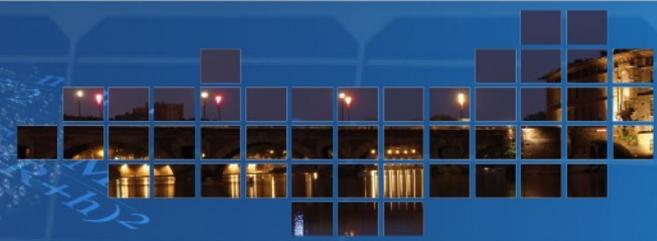
- ✓ Des bras-robots actionnés par des moteurs électriques ont déjà été développés pour une rééducation fondée sur un guidage de la main du patient dans des exercices de trajectoires supervisées (exemple: MIT-MANUS, 2010),
- ✓ Utiliser les muscles artificiels pour aider à la récupération des profils d'activation nerveuses agoniste (A) et antagoniste (A) en utilisant l'analogie entre 'AA ratio' et 'AA sum' avec le rapport et la somme des pressions de commande des muscles artificiels de chaque axe.





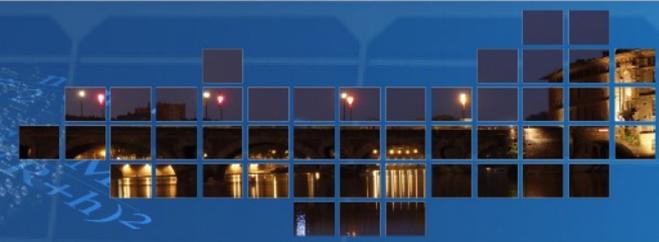
- ✓ Réalisation d'un robot plan, faite dans le cadre d'une collaboration avec le *Louvain Bionics*, à deux axes actionnés par la version commerciale du muscle de McKibben (Festo fluidic muscle),
- ✓ Développement d'un premier contrôleur sous LabView,
- Mais** ✓ Etendue de variation de la raideur des muscles Festo trop limitée, qui va nous conduire à retravailler la conception de nos muscles de McKibben (couplage avec ressort, choix d'un caoutchouc moins dur,...).





## Conclusion: Malgré plusieurs décennies de travaux, la recherche sur les muscles artificiels demeure un domaine controversé

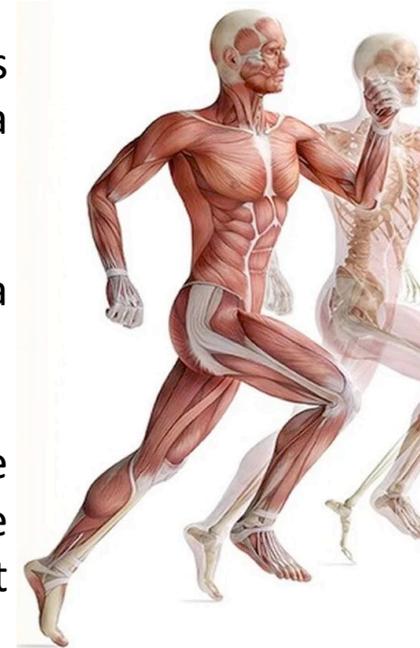
- ❑ Difficulté à cerner l'étendue du biomimétisme nécessaire à une bonne intégration des muscles artificiels en robotique: système musculo-squelettique, système nerveux, système digestif (apport énergétique),...
- ❑ Concurrence avec le moteur électrique qui pose clairement une opposition entre biomimétisme du muscle artificiel et non-biomimétisme du moteur électrique,
- ❑ Chercher des champs d'application où le muscle artificiel s'avère supérieur au moteur électrique:
  - ✓ Soit en permettant une miniaturisation à coût moindre et meilleures puissances massique et volumique,
  - ✓ Soit en apportant un biomimétisme du geste qui fait défaut à la robotique tournée vers l'humain.



C'est sans doute en précisant ce rapport entre biomimétisme du geste humain et muscle artificiel que l'on pourra répondre à la question posée  
 'le muscle artificiel est-il l'actionneur de la robotique du futur?'

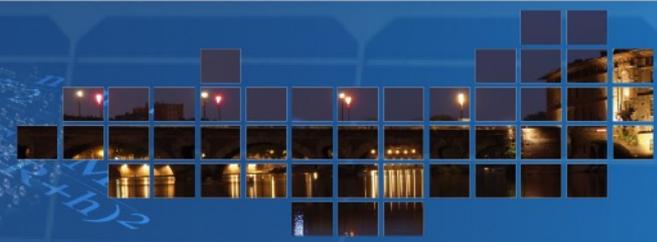
En particulier, les points suivants ne sont pas résolus:

- ✓ Disposer d'un muscle adapté à la taille humaine, de puissances massique et volumique (incluant sa source d'énergie) comparables à celles du muscle du squelette,
- ✓ Définir pour chaque membre locomoteur le bon niveau de la redondance musculaire à répliquer,
- ✓ Choisir entre commande par asservissement sur une trajectoire définie mathématiquement et pur apprentissage du geste ou de la marche (le robot Honda, par exemple, mêlait apprentissage du pas et asservissement de la commande de chaque axe).



# LAAS

Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes du CNRS



# Thanks for your attention



LAAS-CNRS

