



**HAL**  
open science

# Optimiser la consommation énergétique d'un robot hexapode motorisé par des servomoteurs

Julien Serres, Ilya Brodoline, Stéphane Viollet

## ► To cite this version:

Julien Serres, Ilya Brodoline, Stéphane Viollet. Optimiser la consommation énergétique d'un robot hexapode motorisé par des servomoteurs. *Mouvement Animal et Humain : Biomécanique, Biorobotique, Biomimétisme GDR 2088 Biomimétisme Bio-inspiration*, Pierre Moretto; Frédéric Guittard; Damien Chablat, Nov 2023, Toulouse, France. hal-04350996

**HAL Id: hal-04350996**

**<https://hal.science/hal-04350996v1>**

Submitted on 18 Dec 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Workshop

## « Mouvement animal et humain, biomécanique, biorobotique, biomimétisme »

Toulouse, France, 23-24 novembre 2023

Organisateurs : Pierre Moretto, Frédéric Guittard, et Damien Chablat

Titre :

Optimiser la consommation énergétique d'un robot hexapode motorisé par des servomoteurs

Julien R Serres<sup>1,2</sup>, Ilya Brodoline<sup>1</sup>, et Stéphane Viollet<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Aix Marseille Univ, CNRS, ISM, 163 Av. de Luminy, 13 009 Marseille, France

<sup>2</sup> Institut Universitaire de France (IUF), 1 rue Descartes, 72 231 Paris cedex 05, France

<sup>3</sup> Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), 3 rue Michel-Ange 75016 Paris, Paris

Auteur correspondant : [julien.serres@univ-amu.fr](mailto:julien.serres@univ-amu.fr)

Cette étude développe une procédure expérimentale calculant quatre métriques, basées sur des lois thermodynamiques de la locomotion et estimées à l'aide d'un banc d'essai MiMiC-ANT, pour évaluer les performances énergétiques d'un robot hexapode motorisé par des servomoteurs. L'analyse d'une seule patte permet alors de définir le profil énergétique global d'un robot hexapode. Contrairement aux animaux possédant des muscles, les servomoteurs possèdent un unique point de fonctionnement optimal, ce qui limite la capacité d'optimisation de la marche des robots hexapodes quel que soit leur patron de locomotion. Cette conclusion contre-intuitive remet ainsi en question la polyvalence supposée des robots hexapodes motorisés par des servomoteurs sur différents types de terrain.

Mots clés : locomotion, marche, optimisation, biomimétisme, bioinspiration, biorobotique, fourmi, imitation, bionique, robotique à pattes, robotique bio-inspirée.

Workshop « Mouvement animal et humain, biomécanique, biorobotique, biomimétisme »

# Optimiser la consommation énergétique d'un robot hexapode motorisé par des servomoteurs

Julien R Serres, Ilya Brodoline, et Stéphane Viollet

Présenté le 24 novembre 2023 à Toulouse, France



AGENCE  
INNOVATION  
DÉFENSE



# Optimiser la consommation énergétique d'un robot hexapode motorisé par des servomoteurs

}}

« Comment construire un nouveau **robot hexapode, meilleur qu'AntBot** »

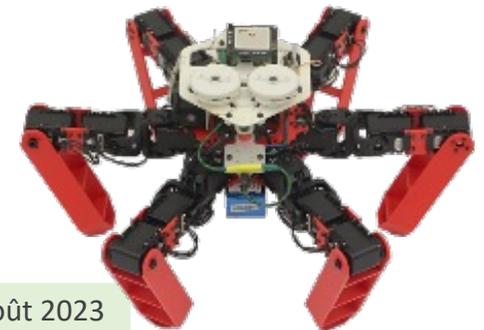
Quels types de robots existent-ils ?



Qu'est-ce qu'un robot performant ?



Quelles sont les particularités de ce robot ?



# Optimiser la consommation énergétique d'un robot hexapode motorisé par des servomoteurs

## Sommaire

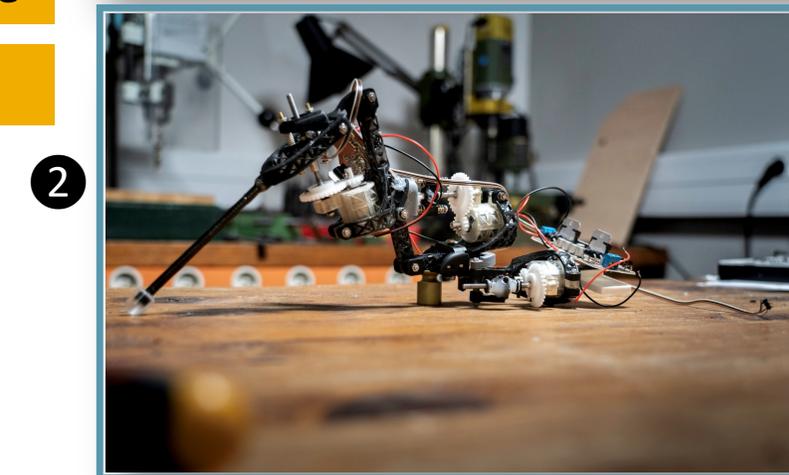
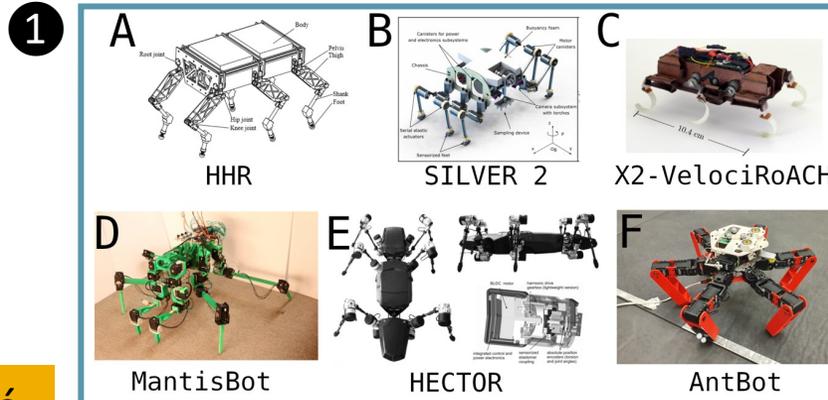
### Introduction

### I. Etat de l'art des robots hexapodes

### II. Conception et fabrication d'un hexapode bio-inspiré

### III. Evaluation des performances d'un robot hexapode

### Conclusion



Banc MiMiC-ANT voir YT : [https://www.youtube.com/watch?v=zJpk\\_\\_nVhLg](https://www.youtube.com/watch?v=zJpk__nVhLg) 3

# I. Etat de l'art des robots hexapodes

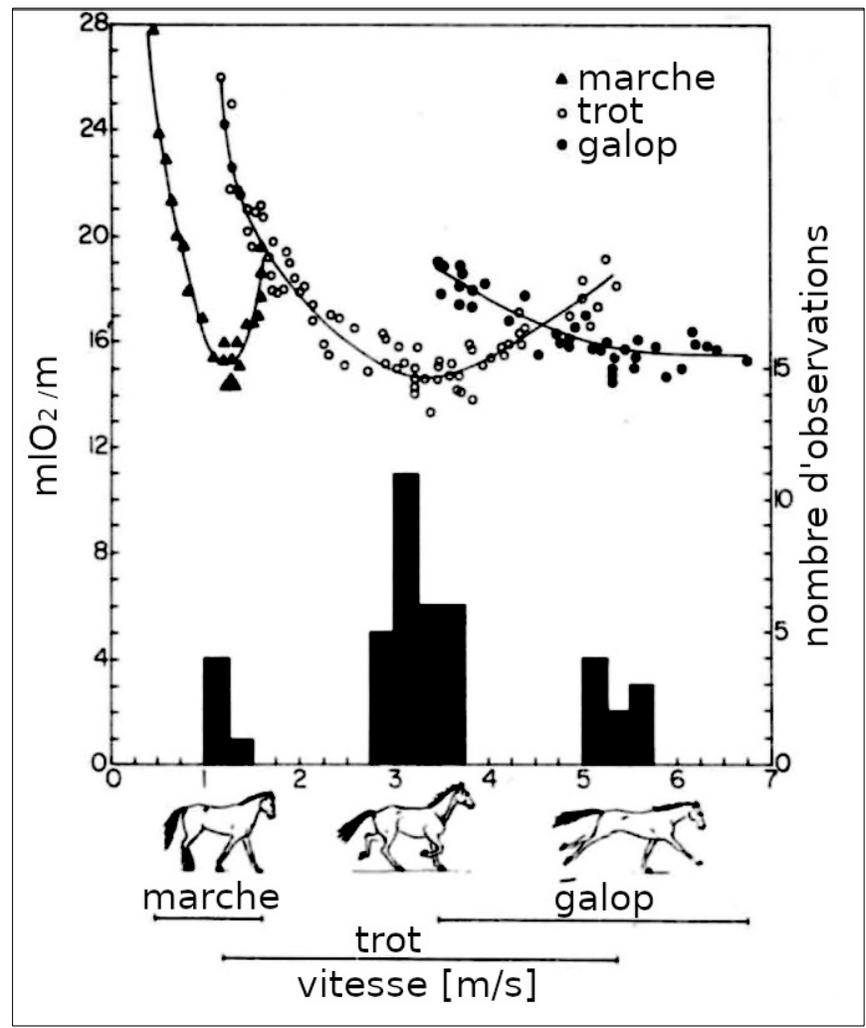
Qu'est-ce qu'un robot performant ?

## Coût du Transport animal

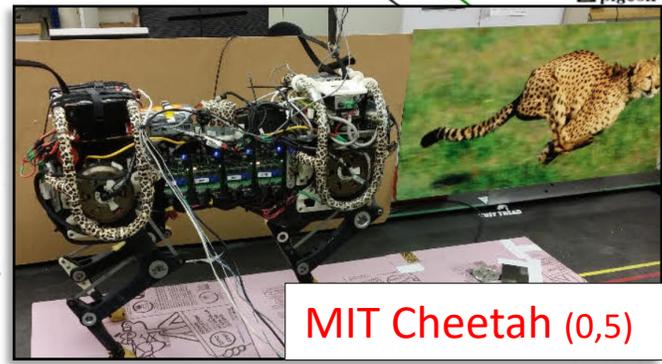
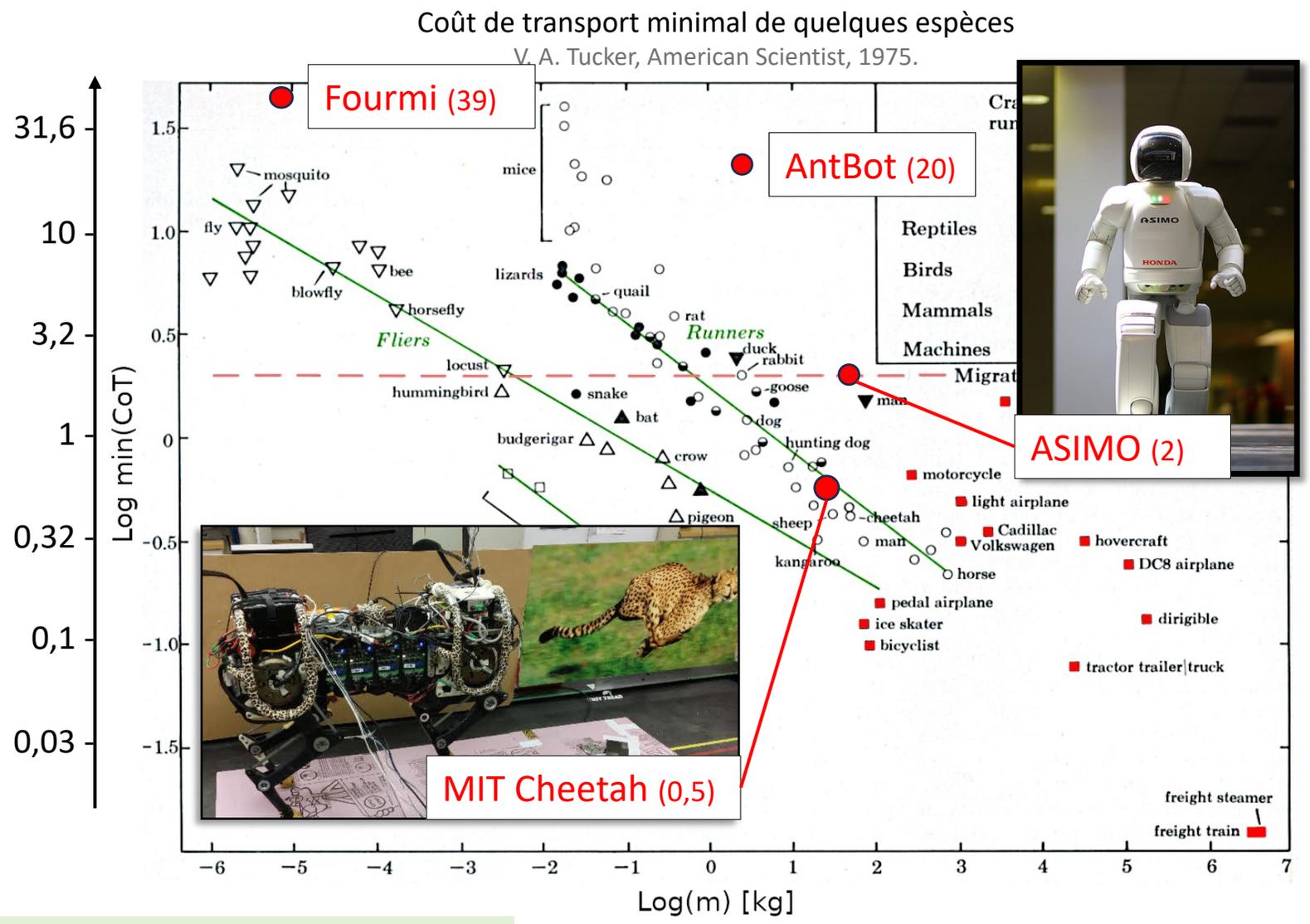
$$CoT [ml \cdot m^{-1} \cdot kg^{-1}] = \frac{\Phi_{O_2}}{v \cdot m}$$

## Résistance spécifique

$$\varepsilon [\emptyset] = \frac{P_{in}}{m \cdot g \cdot v}$$

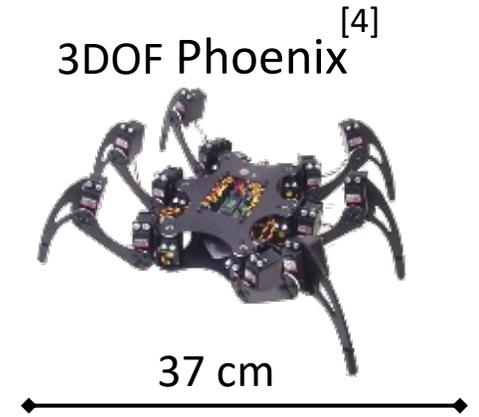
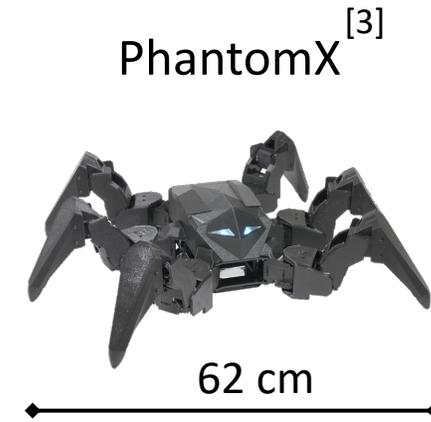
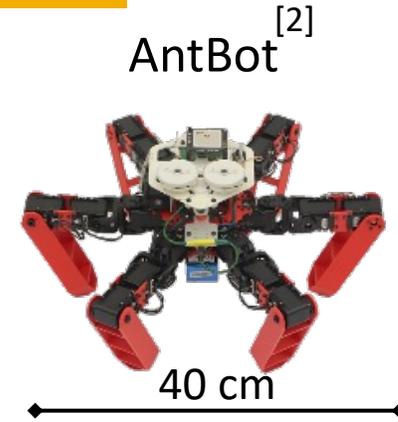
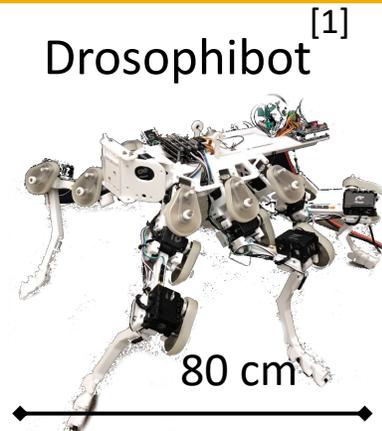


Coût du transport du cheval  
D. F. Hoyt et C. R. Taylor, Nature, 1981.



# I. Etat de l'art des robots hexapodes

## Etat de l'art des robots hexapodes mimant l'insecte



Masse [kg]	1 kg	2,3 kg	2 kg	1,3 kg
Autonomie (approx.)	30 min	15 min	20 min	20 min
Vitesse angulaire des actionneurs	59 tr/min	90 tr/min	106 tr/min	50 tr/min
Charge maximale	700 g	700 g	700 g	700 g
Prix	1k €	2k €	3,3k €	1k €
Année	2019	2019	2020	2015

[1] C. Goldsmith, N. Szczecinski and R. Quinn, *Living Machines*, 2019.

[2] J. Dupeyroux, J.R. Serres, S. Viollet, *Science Robotics*, 2019.

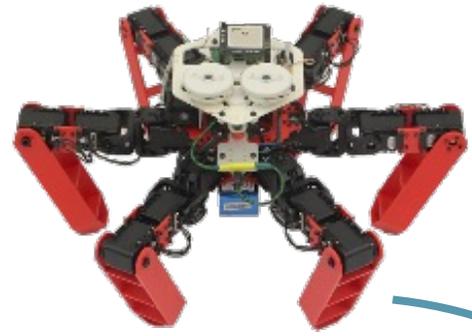
[3] PhantomX Metal Hexapod MK-III Kit, Ref. KIT-MKIV-XL-S, 2020.

[4] J. H. Barron-Zambrano, C. Torres-Huitzil, B. Girau, *Neurocomputing*, Volume 170, 2015.

# I. Etat de l'art des robots hexapodes

Les enjeux de la biorobotique : construction de robot expliquant le fonctionnement animal

**Cataglyphis nodus**  
Masse : 10~20 mg  
Trajets : 150 m  
Charge : 10~15 x masse



**AntBot**  
Masse : 2,3 kg  
Trajets : 15 m  
Charge : 0,3 x masse



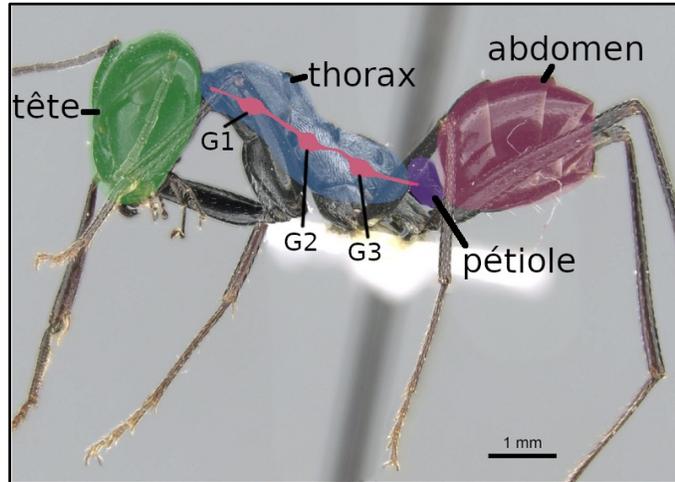
Connaissances & modélisation de la fourmi

Innovation robotique



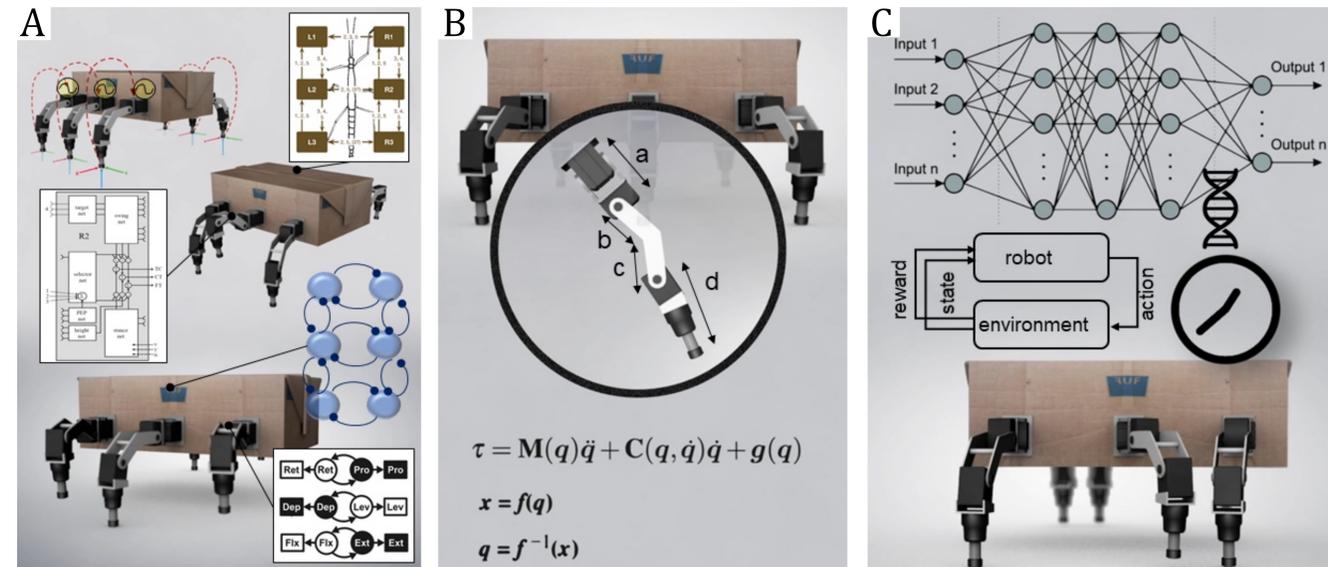
# I. Etat de l'art des robots hexapodes

## Les enjeux de la biorobotique



Anatomie de la fourmi. G1, G2 et G3 correspondent aux ganglions thoraciques.

## L'étude de la locomotion des insectes



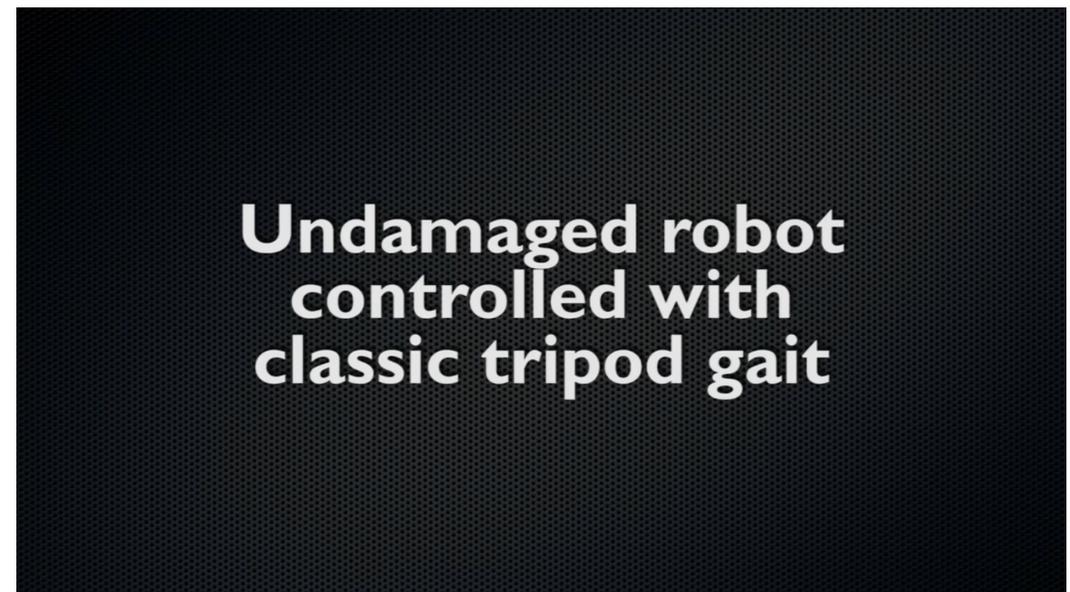
Différents types de systèmes de contrôle des robots hexapodes.

*P. Manoonpong, L. Patane, X. Xiong, I. Brodoline, J. Dupeyroux, S. Viollet, P. Arena and J. R. Serres, Sensors, 2021.*

## Pourquoi la robotique hexapode ?

### l'hexapode ...

- peut continuer à marcher lors d'une défaillance
- possède une stabilité statique
- est optimisé pour le transport de charge



A. Cully et al, Nature, 2015

Voir YT : <https://www.youtube.com/watch?v=T-c17RKh3uE>

## II. Conception et fabrication d'un hexapode bio-inspiré

### Le cahier des charges

Critères de performance	Min	Max
Envergure	10 <i>cm</i>	70 <i>cm</i>
Masse	1 <i>kg</i>	3 <i>kg</i>
Vitesse	26 <i>cm/s</i>	
Charge minimale	700 <i>g</i>	
Critères de construction	Description	
Type de corps	unique	
Source d'énergie	batterie	
Technique de fabrication	impression 3D	
Type d'assemblage	démontable	
Prix max	3000 €	

### Paramètres du design d'un robot **bio-inspiré** :

- La géométrie du robot
- L'actionnement
- Le système sensoriel

La précision  
du modèle

+

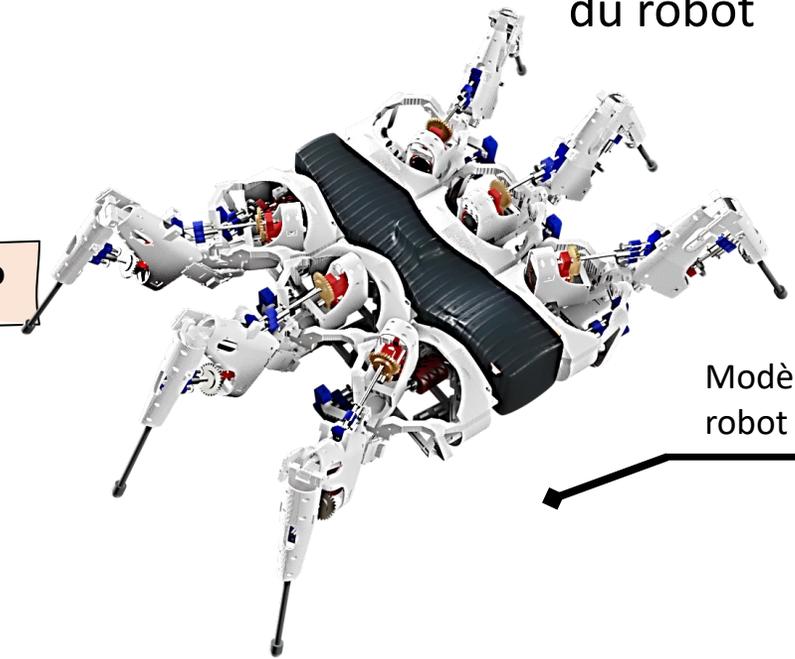
Les  
performances  
du robot

**Cahier des charges** du robot hexapode à concevoir à des fins académiques et de publication en open source.

Quelles sont les limites mécatroniques des hexapodes actuels ?

Quelles sont les incohérences biologiques ?

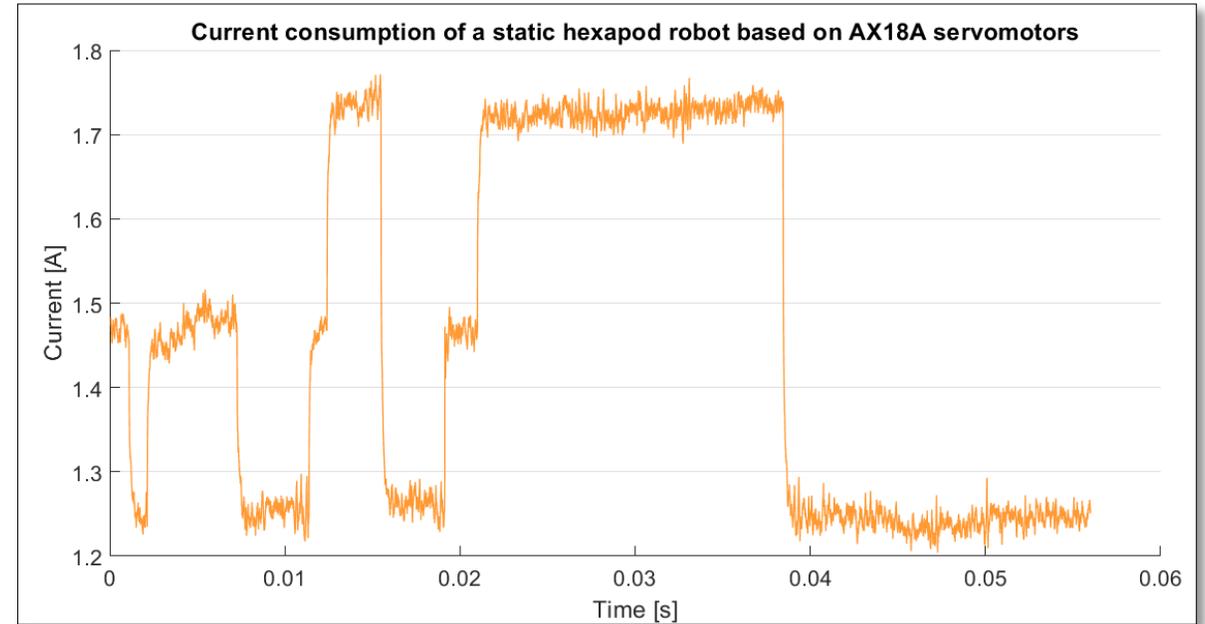
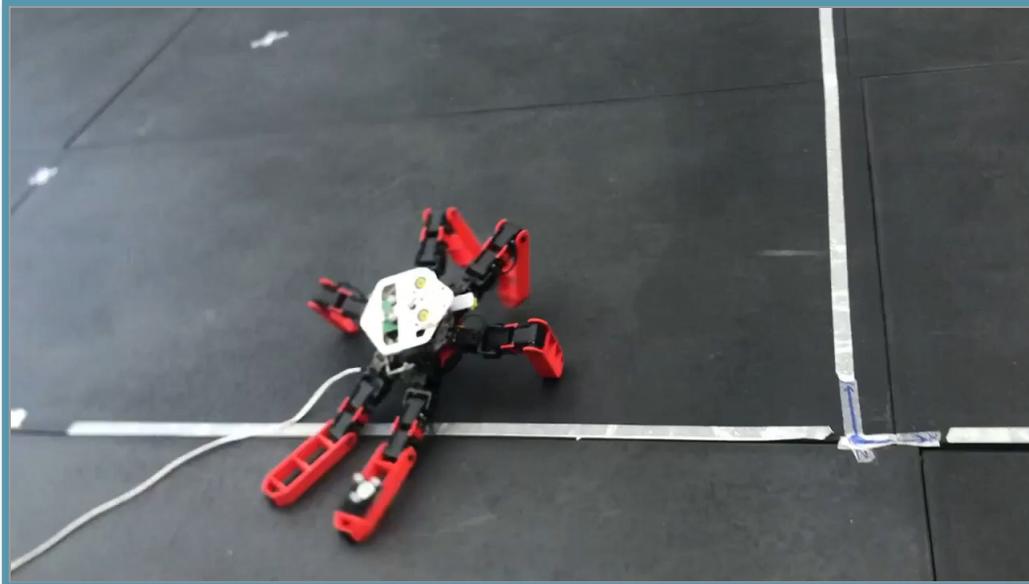
Étude d'une patte unique



Modèle 3D du  
robot *Pohod15*

## II. Conception et fabrication d'un hexapode bio-inspiré

### Les défauts des robots actuels



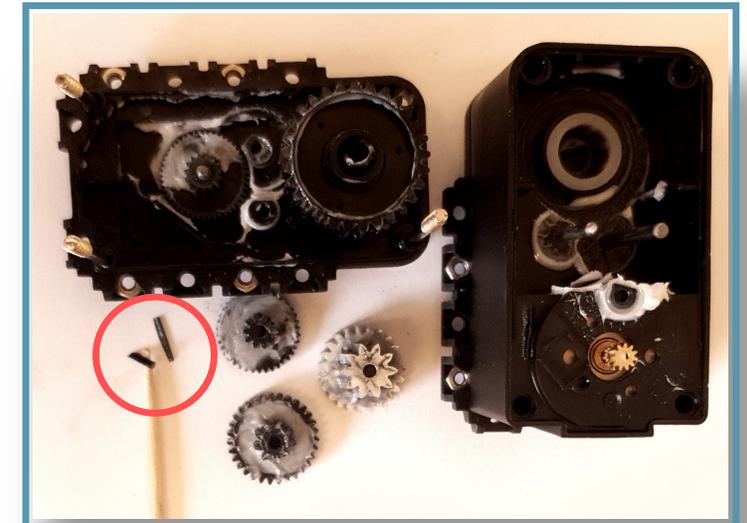
Voir YT: <https://youtu.be/kTL-rTL0UXU> et <https://youtu.be/vF6iaBn5Heg>

#### Avantages :

- Compacte
- Simple à implémenter
- Commande facile (Vitesse, position)
- Nombreux modèles disponibles

#### Inconvénients :

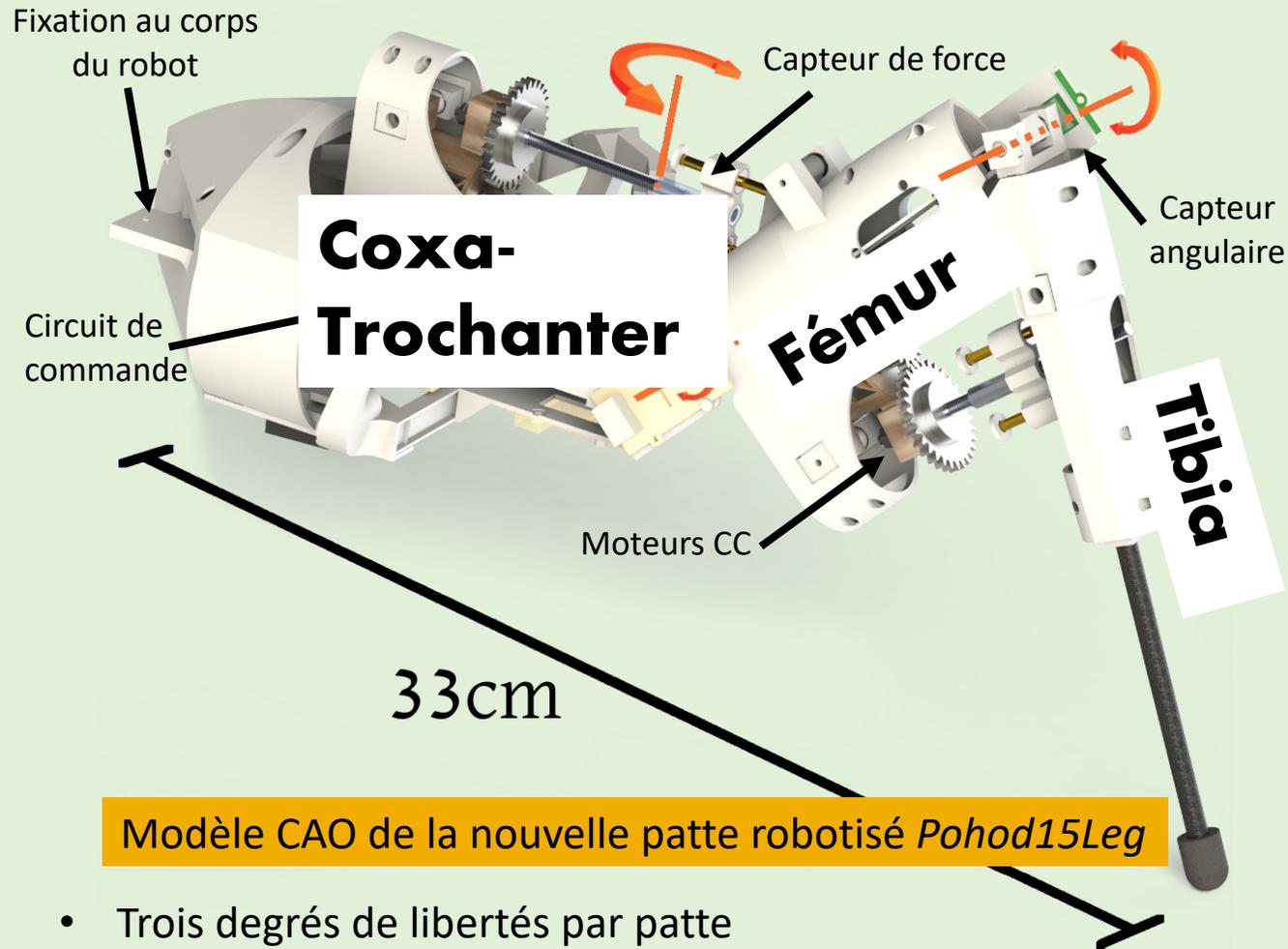
- Consommation continue d'énergie
- Surchauffe
- Engrenages fragiles
- Prix élevé



Servomoteur avec la denture cassée

## II. Conception et fabrication d'un hexapode bio-inspiré

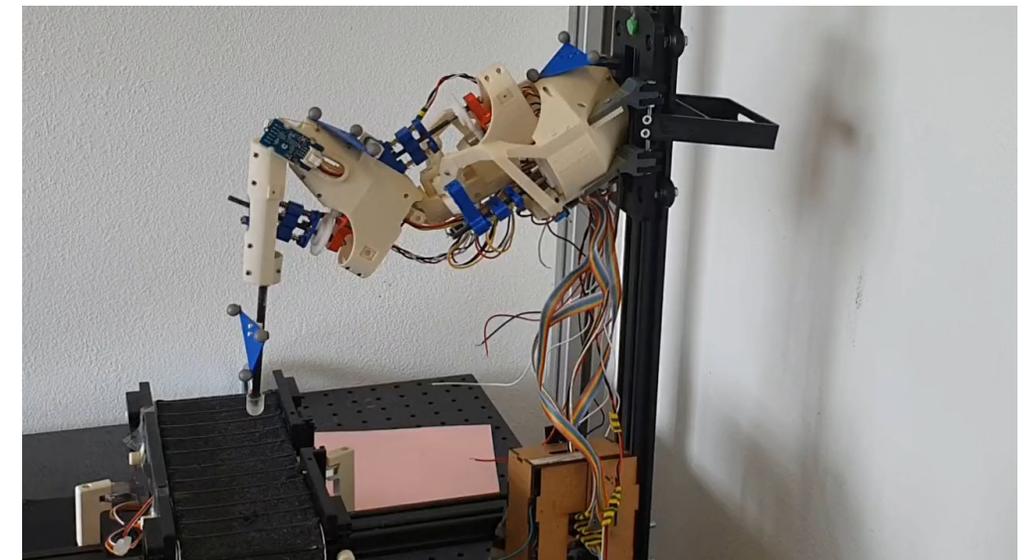
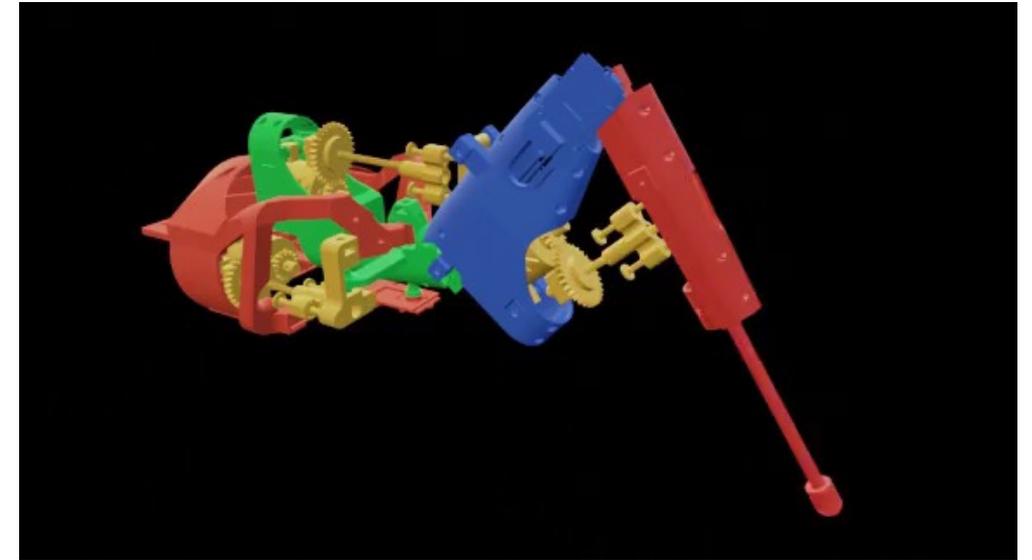
### Les choix technologiques pour la patte *Pohod15Leg*



### Modèle CAO de la nouvelle patte robotisée *Pohod15Leg*

- Trois degrés de liberté par patte
- Capteurs angulaires et capteurs de force
- Dimensions cohérentes avec la fourmi *Cataglyphis fortis* (1:30)
- Structure entièrement imprimée en 3D (420g)

### Démonstration des degrés de liberté de la patte *Pohod15Leg*



Vidéo de la patte *Pohod15* en train de marcher sur un tapis roulant.

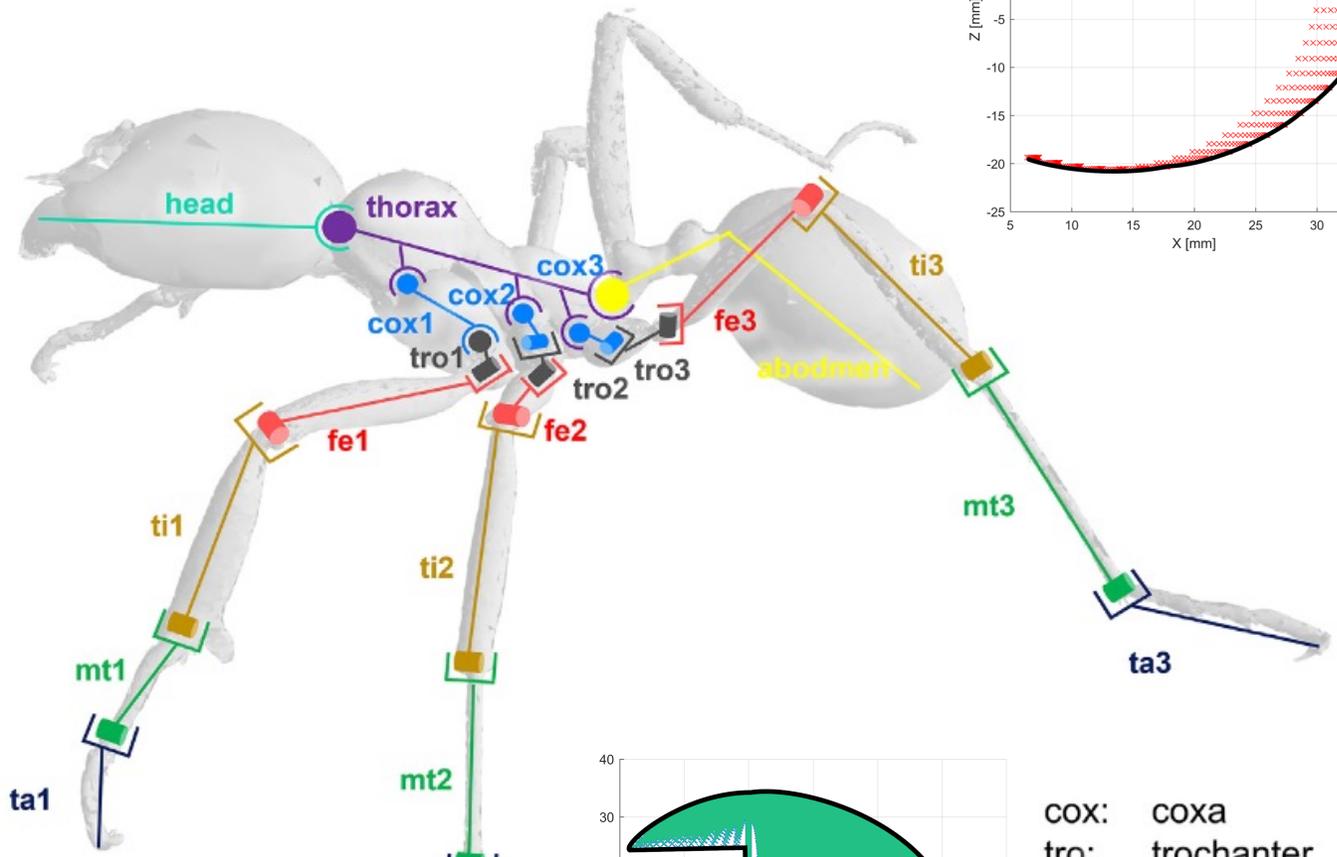
Voir YT : <https://youtu.be/dOet9Ah-644>

# II. Conception et fabrication d'un hexapode bio-inspiré

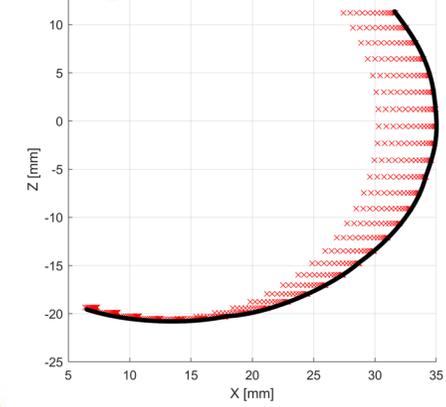
## Définition de la géométrie de la patte

Chaîne cinématique d'une fourmi *Messor Barbarus*  
 S. Arroyave-Tobon et al, Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2022

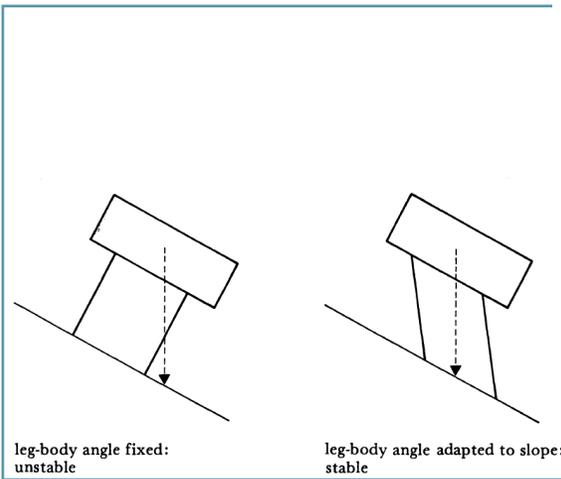
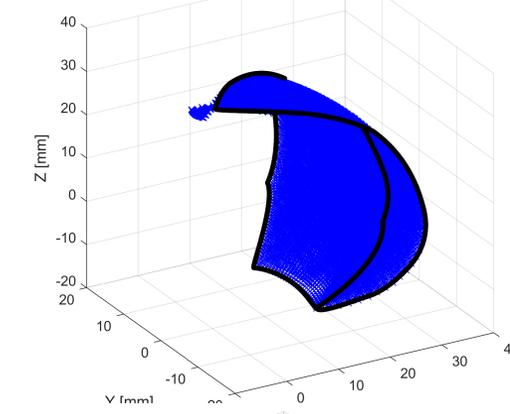
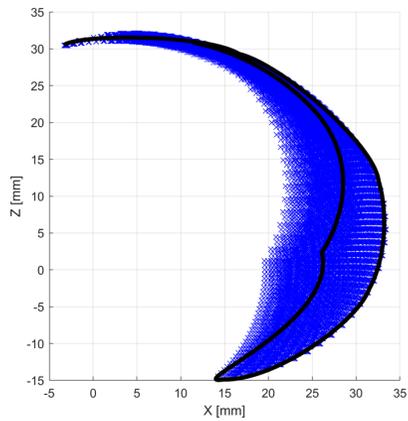
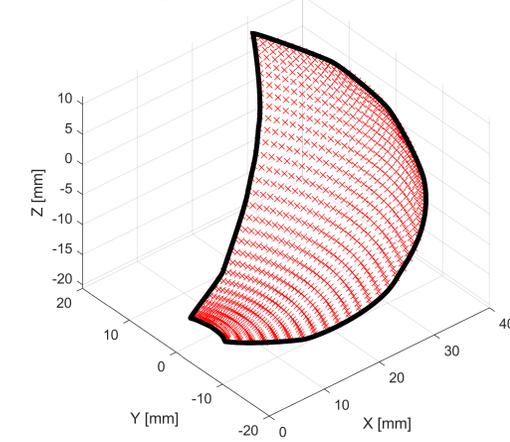
2 DDL



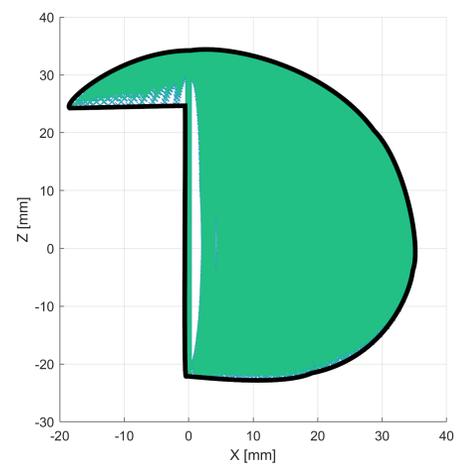
Vue de gauche



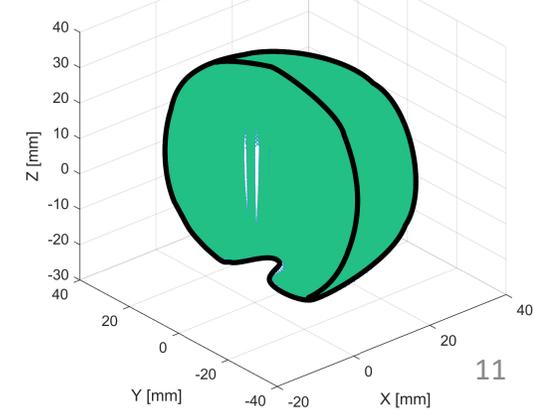
Vue en perspective



Ajustement du centre de masse pour s'adapter au terrain  
 D. J. Todd, Walking Machines: An Introduction to Legged Robots, 1985.



- cox: coxa
- tro: trochanter
- fe: femur
- ti: tibia
- mt: metatarsus
- ta: tarsus



# II. Conception et fabrication d'un hexapode bio-inspiré

## L'actionneur de la patte

### Résistance & Surchauffe

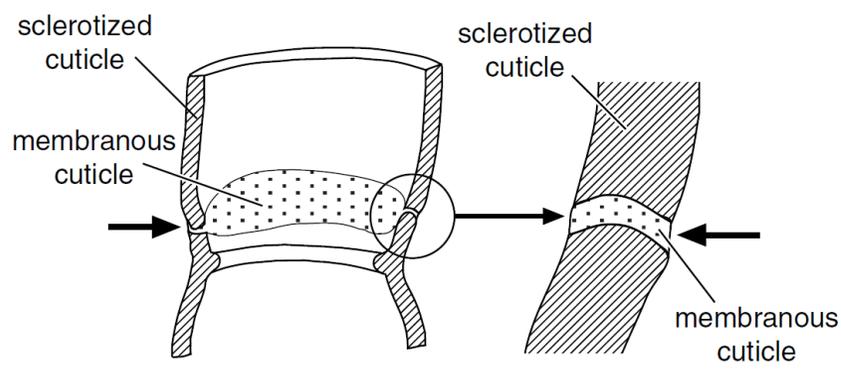
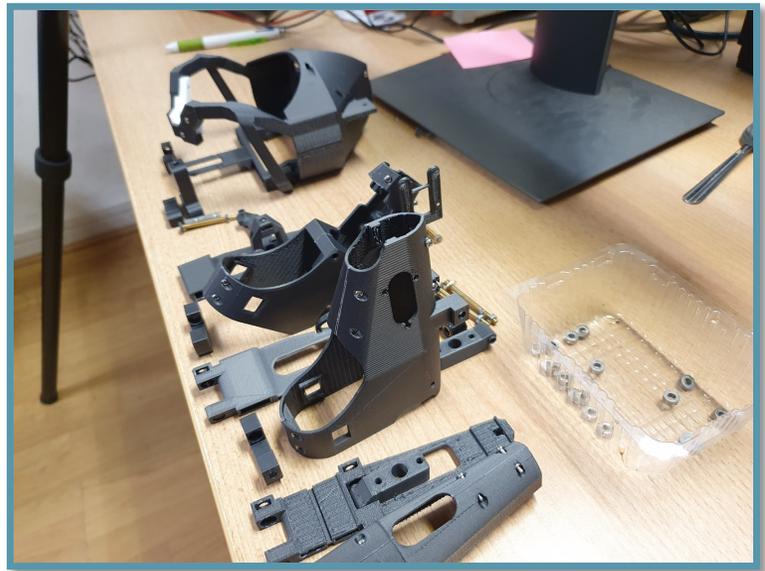
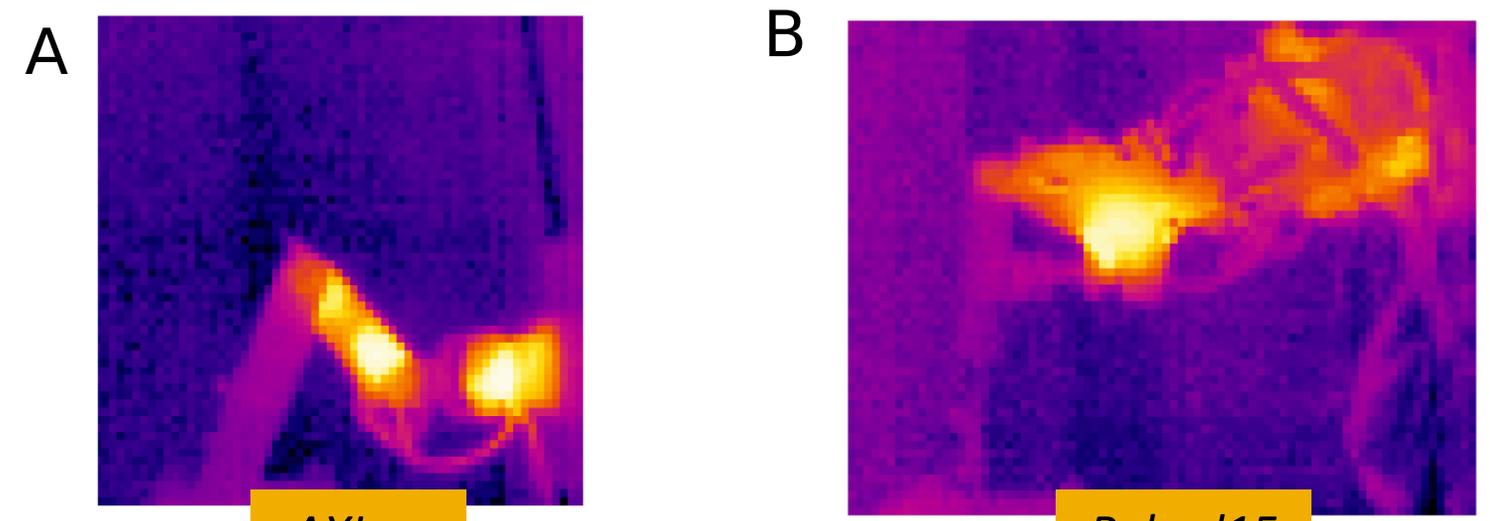


Schéma en coupe d'une articulation de patte d'insecte  
R. F. Chapman et al, The Insects Structure and Function, 2012.

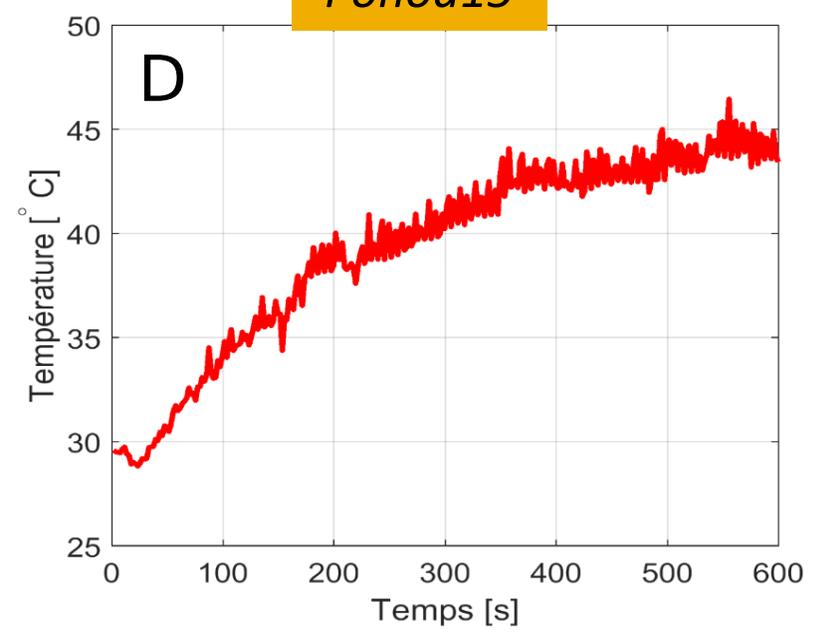
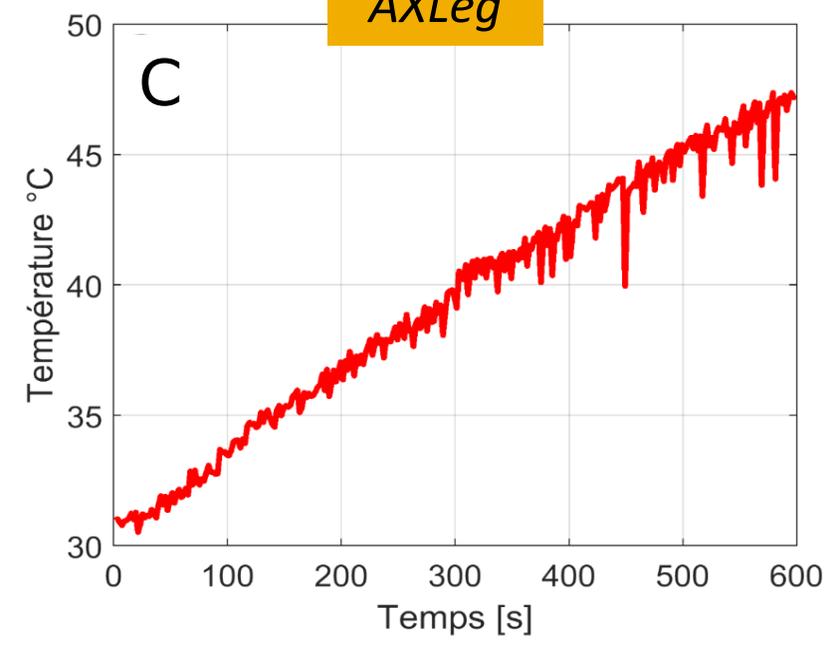


Évolution de la température moyenne d'une patte d'hexapode après 10min de marche



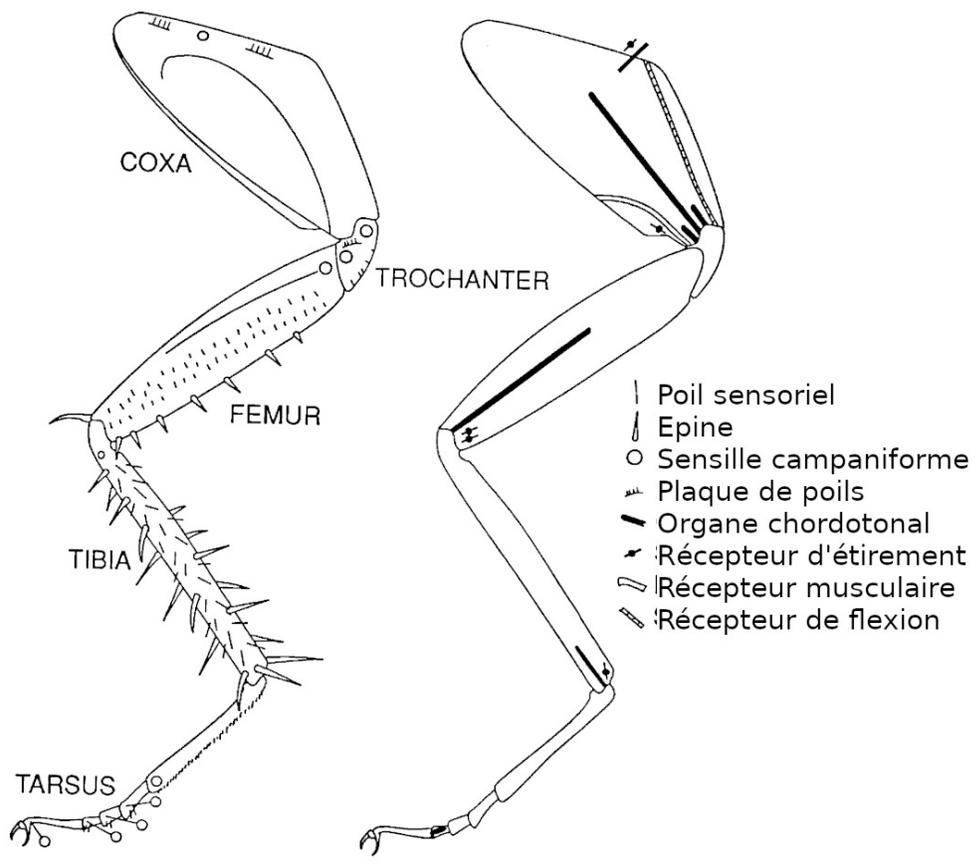
AXLeg

Pohod15



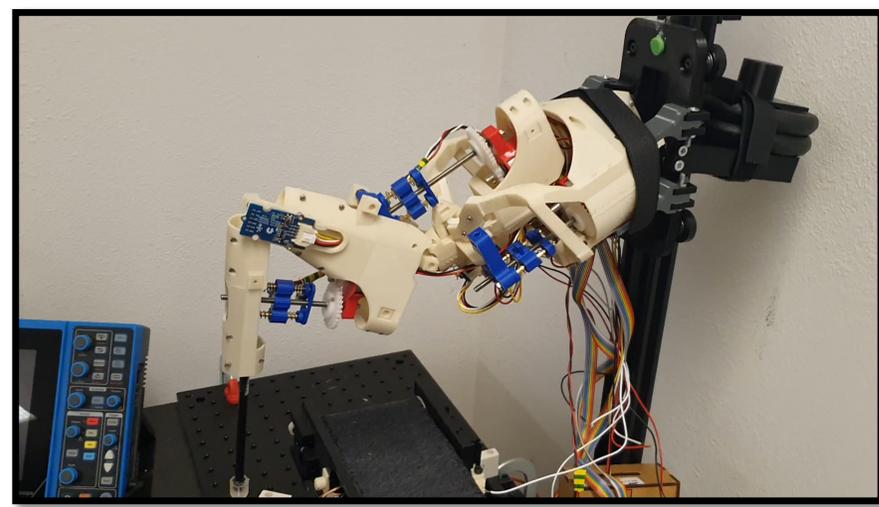
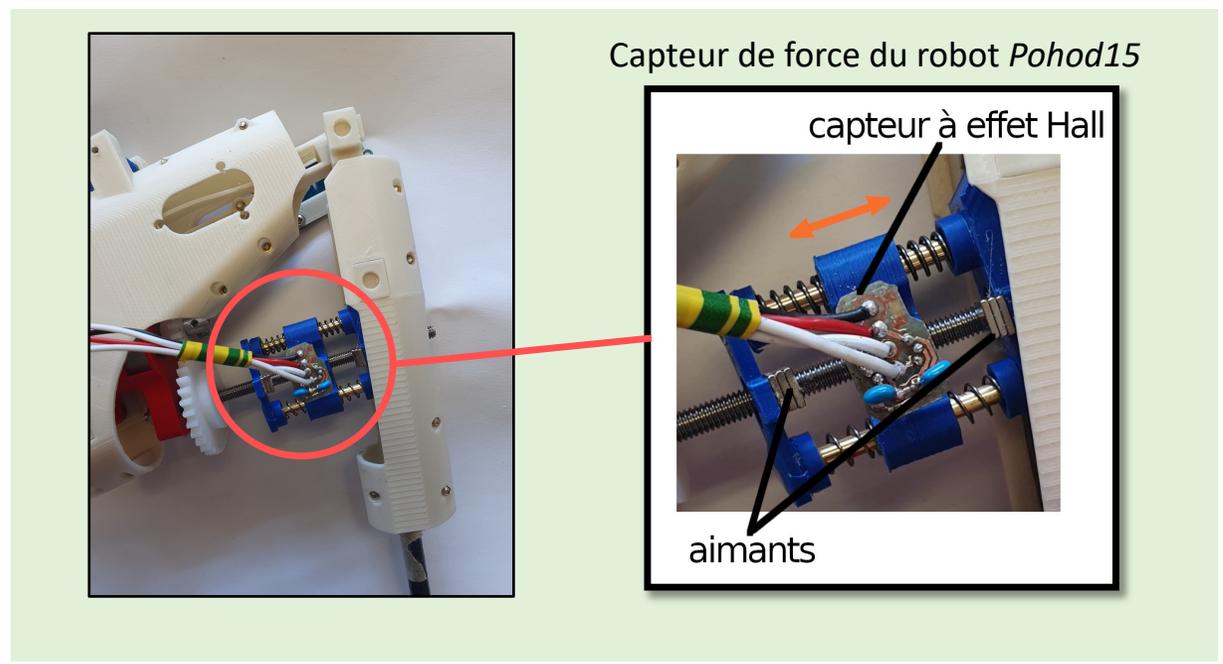
# II. Les étapes de fabrication d'un robot bio-inspiré

## Le système sensoriel



Organes sensoriels de la patte d'un insecte  
F. Delcomyn et al, The International Journal of Robotics Research, 1996.

Contrainte sur le tibia d'une patte de robot. Réponse du modèle d'un *campaniform sensilla*.  
W. P. Zyhowski et al, Frontiers in Neurobotics, 2023.



Engrenages fragiles

### III. Evaluation des performances d'un robot hexapode

#### Description de la marche de l'hexapode



Vidéo d'un *Messor Barbarus* marchant en ligne droite (400 fps)

© P. Moretto, CRCA-CAB (UMR CNRS-UPS 5169), 2013.

#### Les paramètres de la marche :

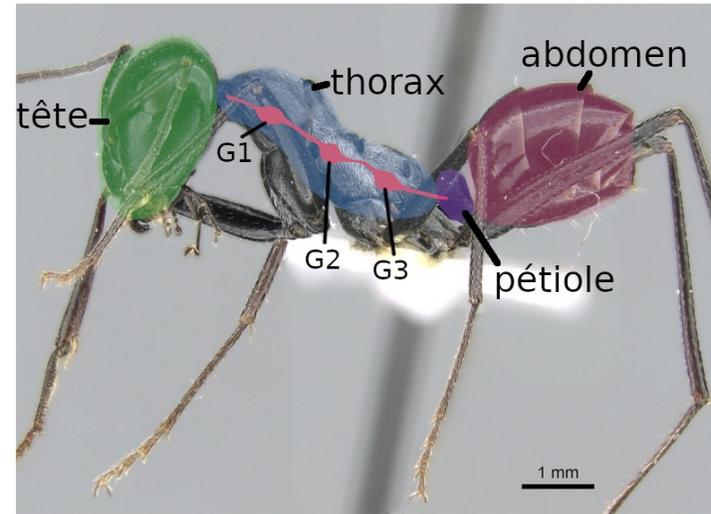
Longueur du pas :  $L$

Période :  $T = T_{st} + T_{sw}$

Vitesse :  $v = \frac{2 \cdot L}{T}$

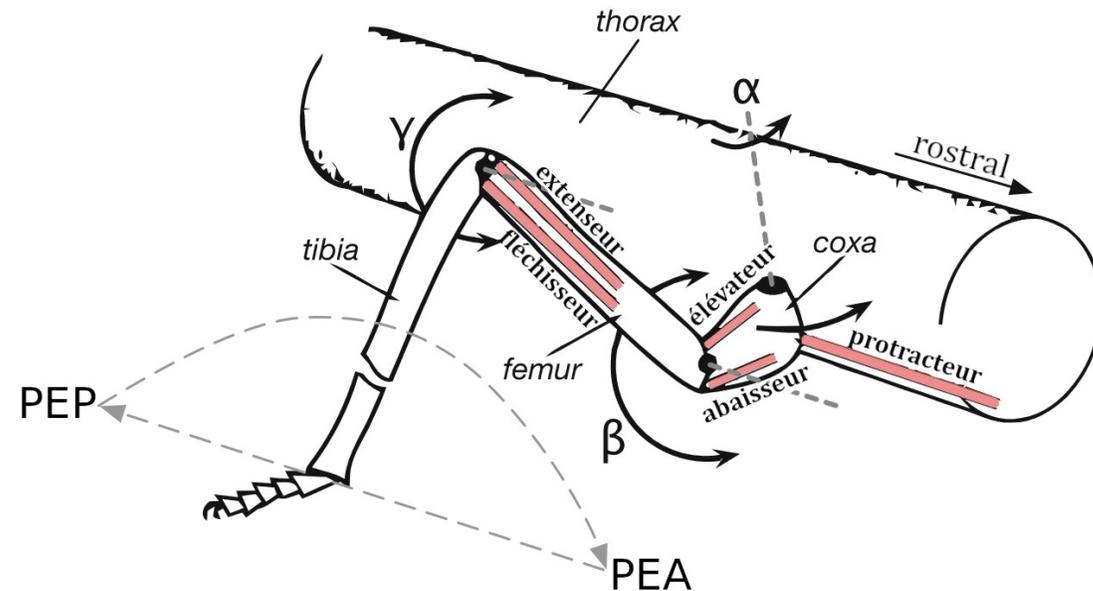
Rapport cyclique :  $\beta = \frac{T_{st}}{T}$

Phase relative :  $\theta_i = \frac{\Delta t}{T} \in [0,1]$



Anatomie de la fourmi *Cataglyphis Fortis*. G1, G2 et G3 correspondent aux ganglions thoraciques.

© Estella Ortega, AntWeb.org



Modèle conventionnel d'une patte d'insecte

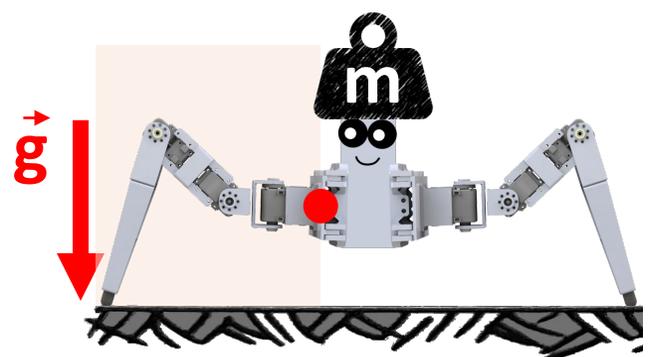
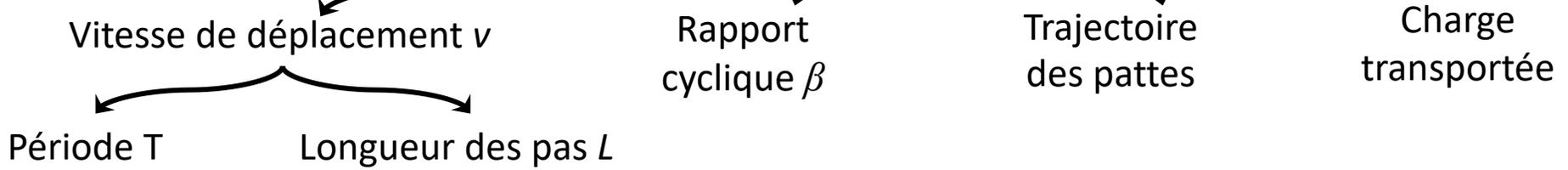
M. Schilling et al, Biological Cybernetic, 2013.



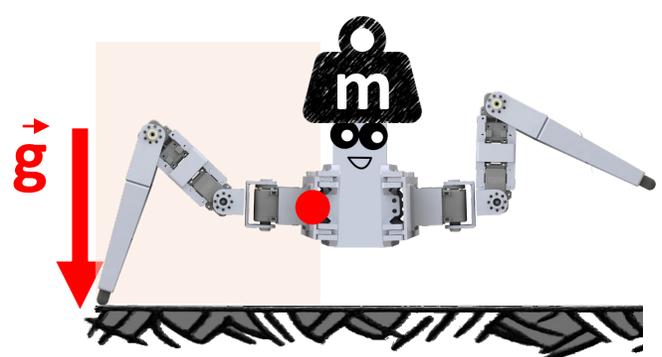
### III. Evaluation des performances d'un robot hexapode

#### Description de la marche de l'hexapode

Quelle est la consommation énergétique du robot en fonction des paramètres de marche ?

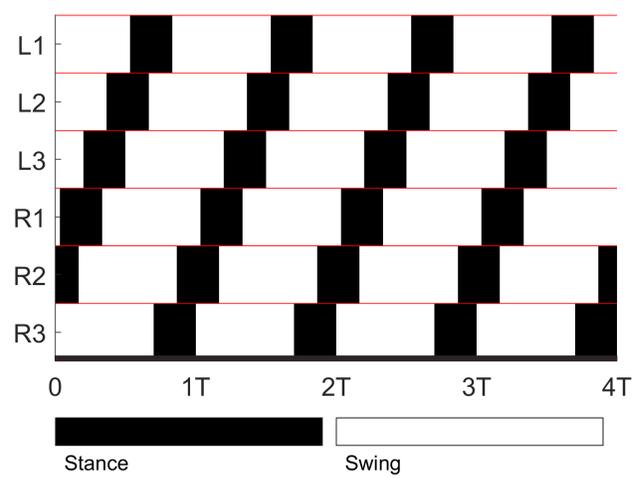


$$m_{base} = \frac{m + m_{corps}}{2}$$



$$m_{base} = m + m_{corps} + m_{patte}$$

+



$$m_{base}(t) = \frac{m + m_{corps} + (n_{pattes} - L(t)) \cdot m_{patte}}{L(t)}$$

Avec 
$$L(t) = \sum_{i=1}^{n_{pattes}} 1 - \frac{\text{sgn}(\sin\left(\frac{(t - \theta_i \cdot T) \cdot \pi}{T}\right))}{2} \cdot \frac{\text{sgn}(\sin\left(\frac{(t - (\theta_i + \beta) \cdot T) \cdot \pi}{T}\right)) + 1}{2}$$

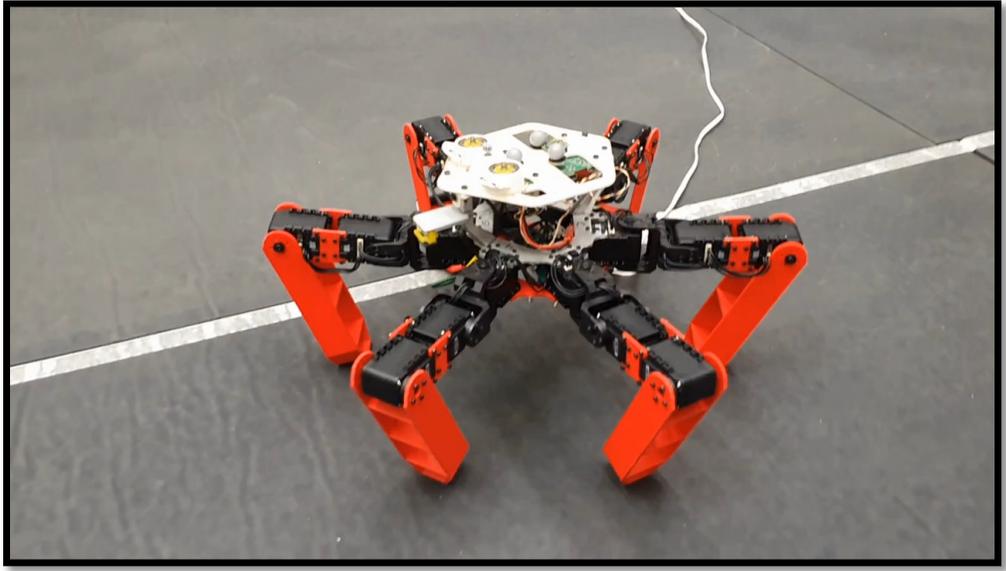
$$t \in [0, T]$$

(en revision) I. Brodoline et al. Scientific Reports, 2023.

# III. Evaluation des performances d'un robot hexapode

## Mesure du coût du transport

Expérience menée sur *AntBot*, dans l'arène de vol de la Méditerranée



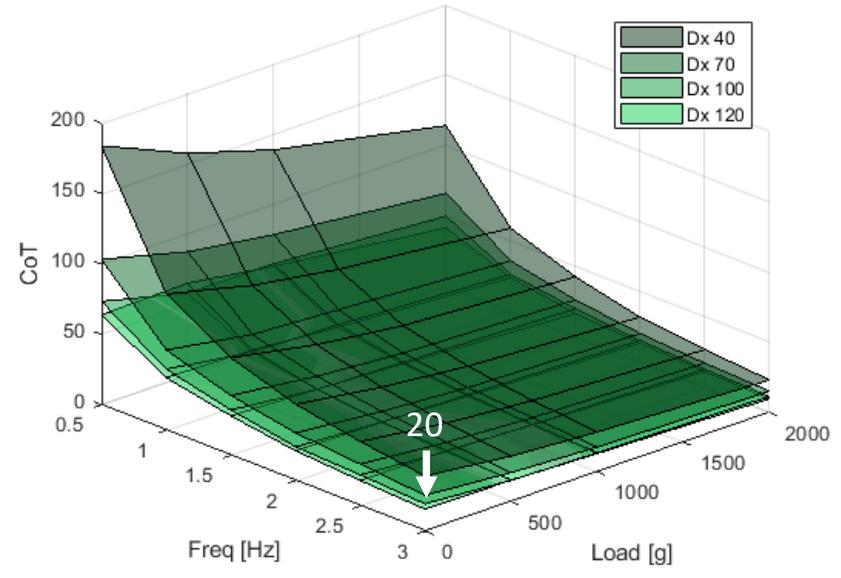
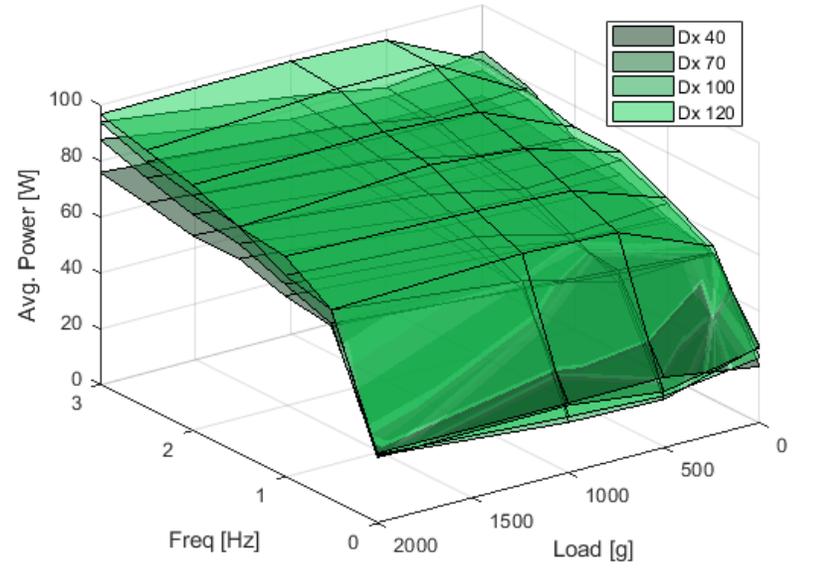
Résistance spécifique

$$\varepsilon [\emptyset] = \frac{P_{in}}{m \cdot g \cdot v}$$

$P_{in}$  : puissance utilisée pour se déplacer [W]  
 $m$  : masse mise en mouvement [kg]  
 $g$  : accélération de pesanteur [m/s<sup>2</sup>]  
 $v$  : vitesse [m/s]

Voir YT :  
<https://youtu.be/M3Y3cLfUc8c>  
<https://youtube.com/shorts/gv6EfhQTYao>

Puissance moyenne consommée par *AntBot*



CoT mesuré pour *AntBot*

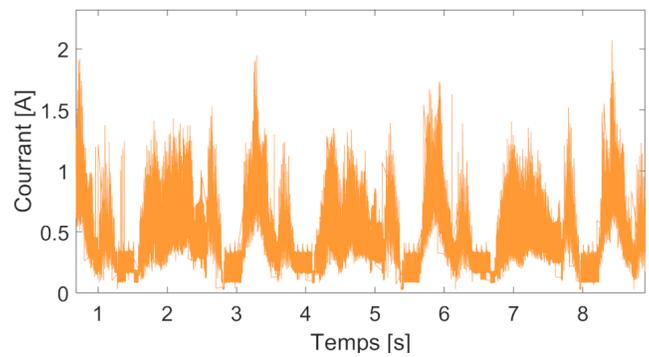
# III. Evaluation des performances d'un robot hexapode

## Le banc de test MiMiC-Ant

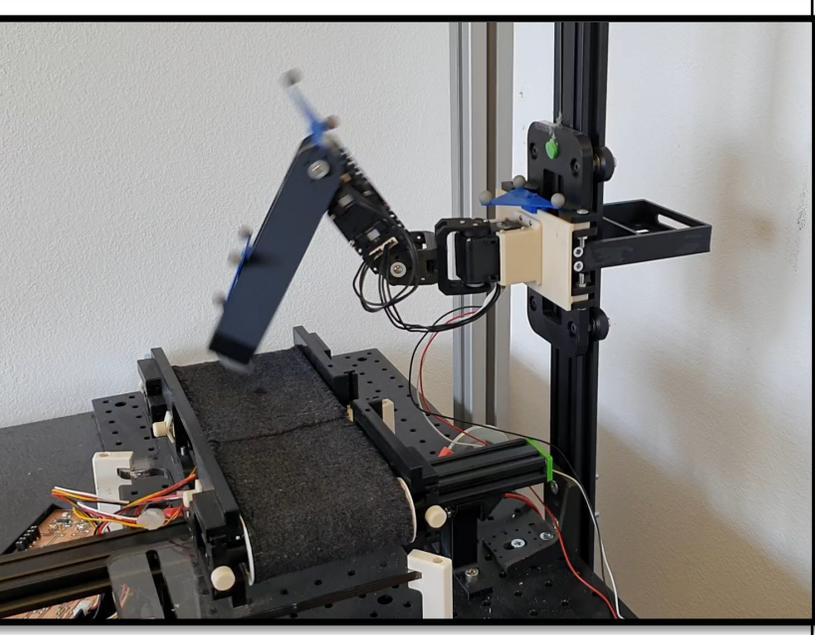
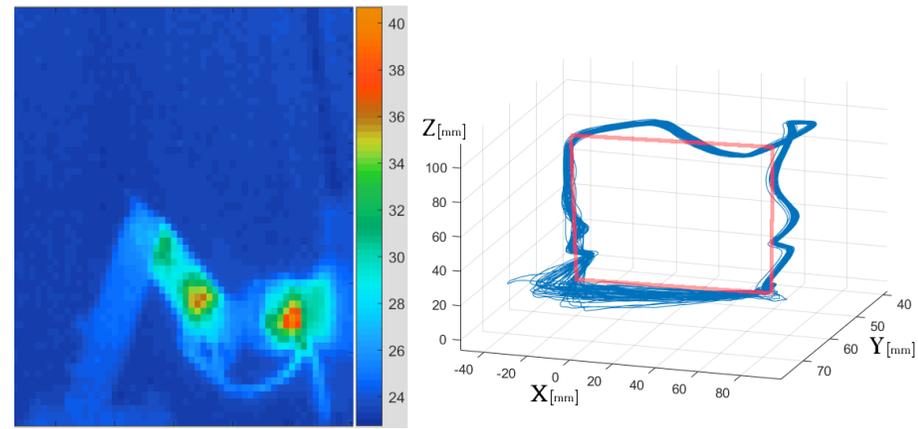
➔ Définir une procédure standardisée pour l'identification du profil énergétique d'un **robot** hexapode



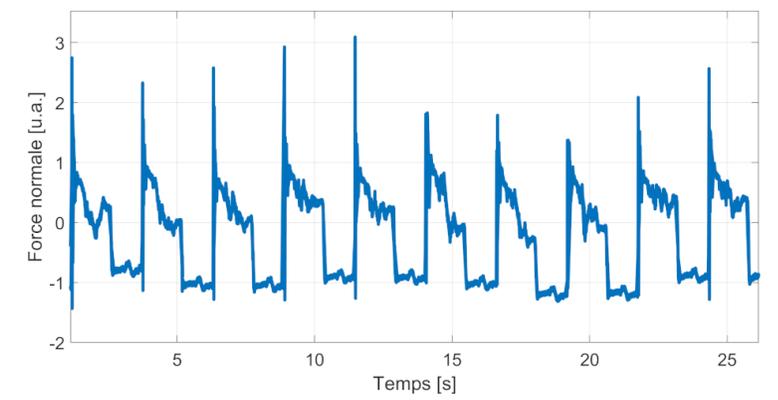
Banc de test *MiMiC-Ant*, avec la patte *Pohod15* installée.



Exemple de mesures réalisées par le banc de test.



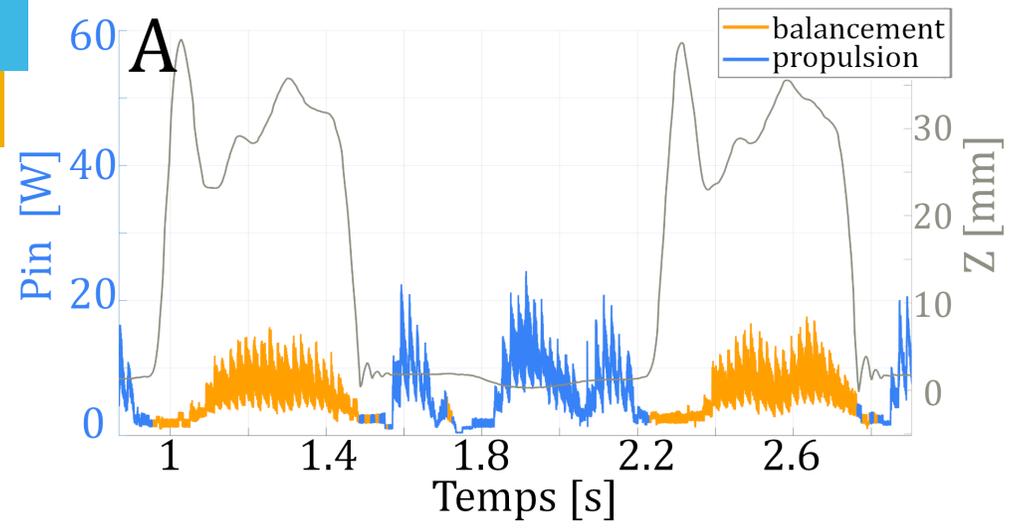
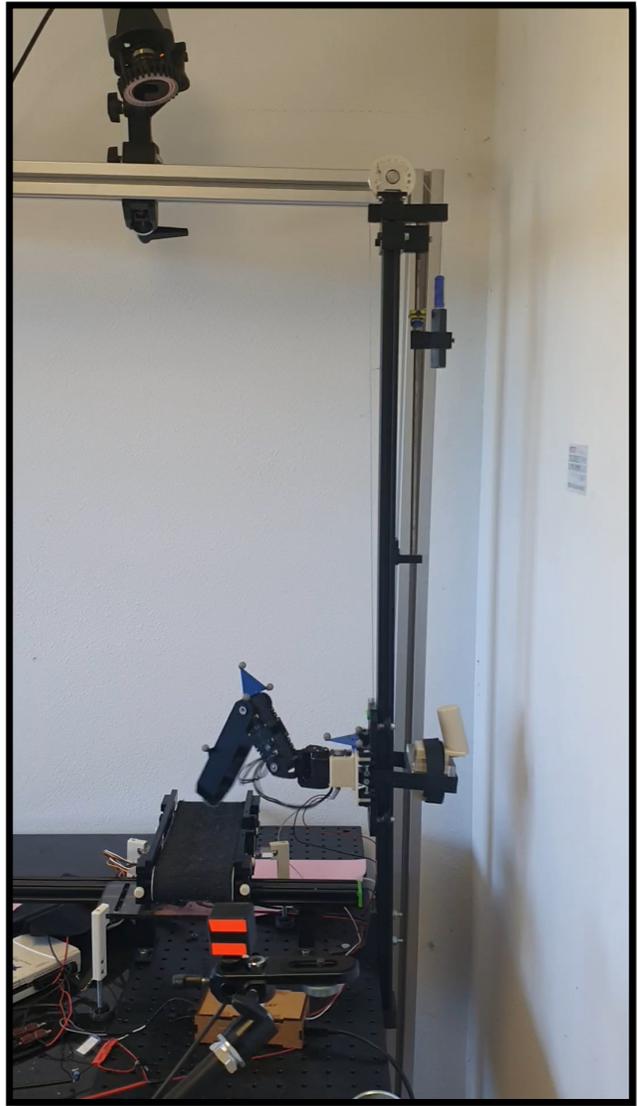
Banc de test *MiMiC-Ant*, avec la patte *AXLeg* installée.



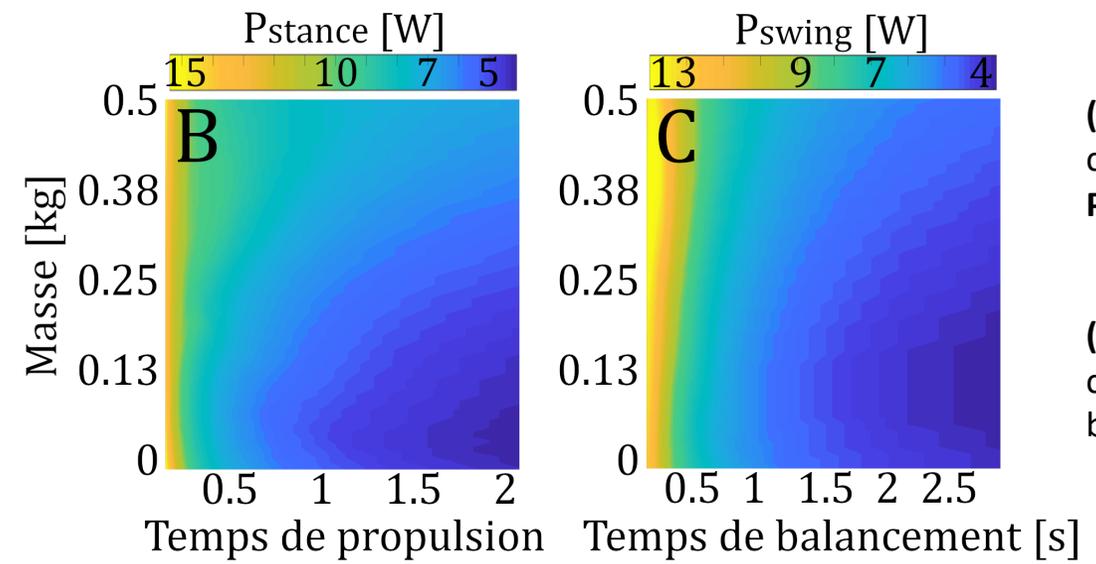
Banc MiMiC-ANT voir YT : [https://www.youtube.com/watch?v=zJpk\\_\\_nVhLg](https://www.youtube.com/watch?v=zJpk__nVhLg)  
AXLeg voir YT : <https://youtu.be/gEU85k694zg>  
Voir GitHub : <https://github.com/IlyaBrod/MiMiC-ANT-testbench>

# III. Evaluation des performances d'un robot hexapode

## Estimation du coût du transport



**(A)** Puissance électrique instantanée consommée par la patte *AXLeg*. La fréquence de marche est égale à 0,8 Hz avec une charge transportée de 100 g.



**(B)** Estimation de la puissance moyenne consommée au cours de la phase de propulsion  $P_{st}(T_{swing}, masse)$ .

**(C)** Estimation de la puissance moyenne consommée au cours de la phase de balancement  $P_{sw}(T_{sw}, masse)$ .

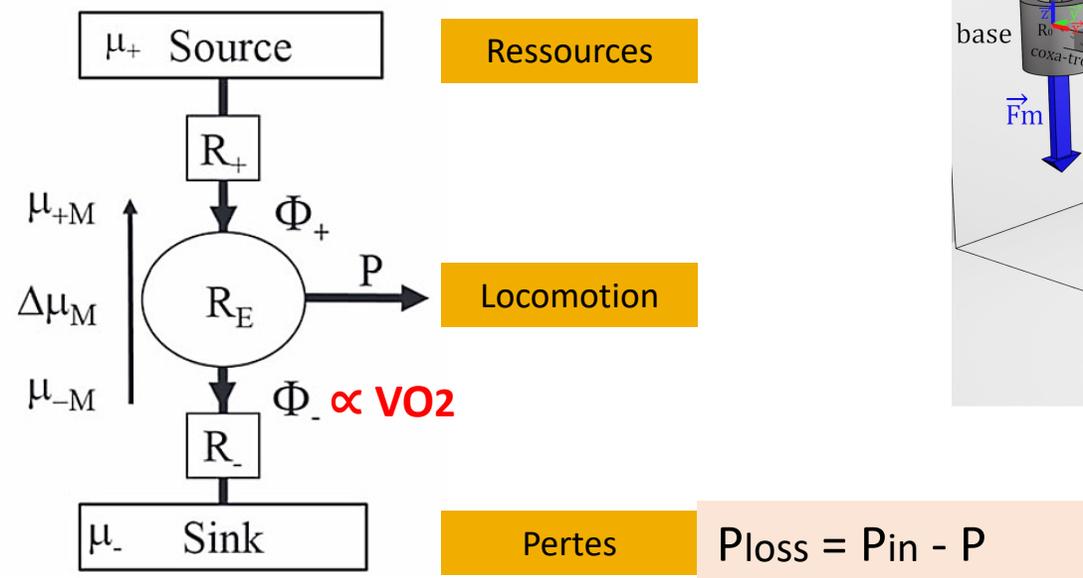
Calcul de la puissance moyenne consommée par l'hexapode :

$$\overline{P_{in,T}} = \frac{6}{T} \cdot \left( \int_0^{\beta \cdot T} \overline{P_{stance}(\beta \cdot T, m_{base}(t))} \cdot dt + \int_{\beta \cdot T}^T \overline{P_{swing}((1-\beta) \cdot T, m_{base}(t))} \cdot dt \right)$$

# III. Evaluation des performances d'un robot hexapode

## Estimation du profil énergétique

Modèle thermodynamique d'un animal  
C. Goupil et al, New Journal of Physics, 2019.



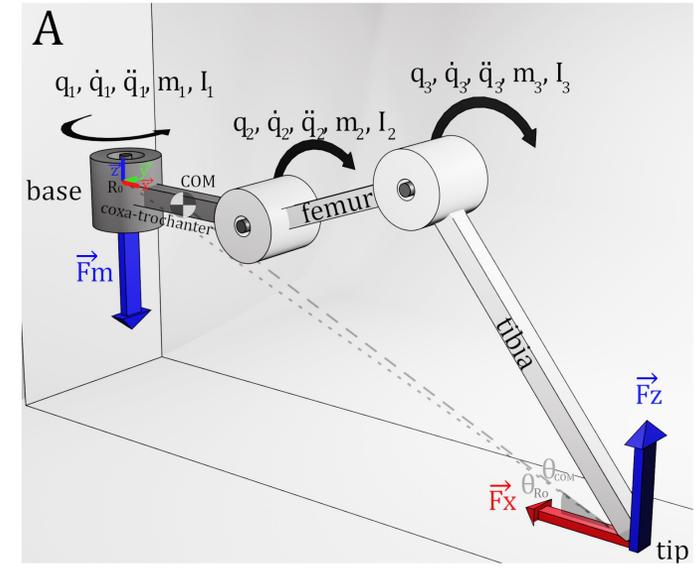
### Coût du transport spécifique

$$CoT/M = \frac{P_{loss}}{m \cdot v}$$

### Rendement

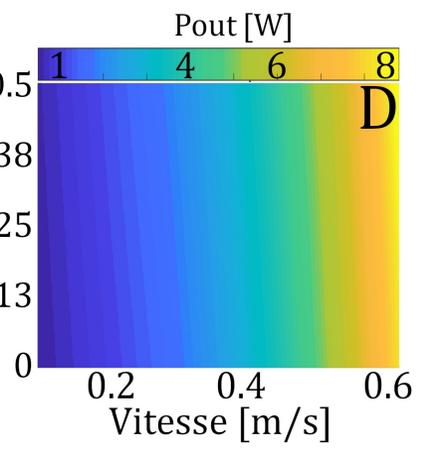
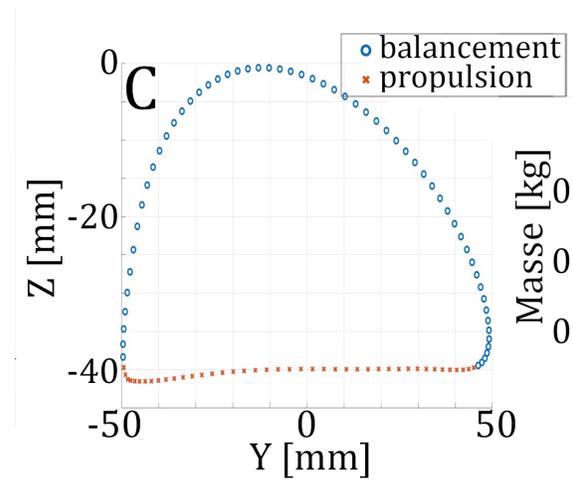
$$\eta = \frac{P}{P_{in}}$$

## Calcul de la puissance mécanique du robot



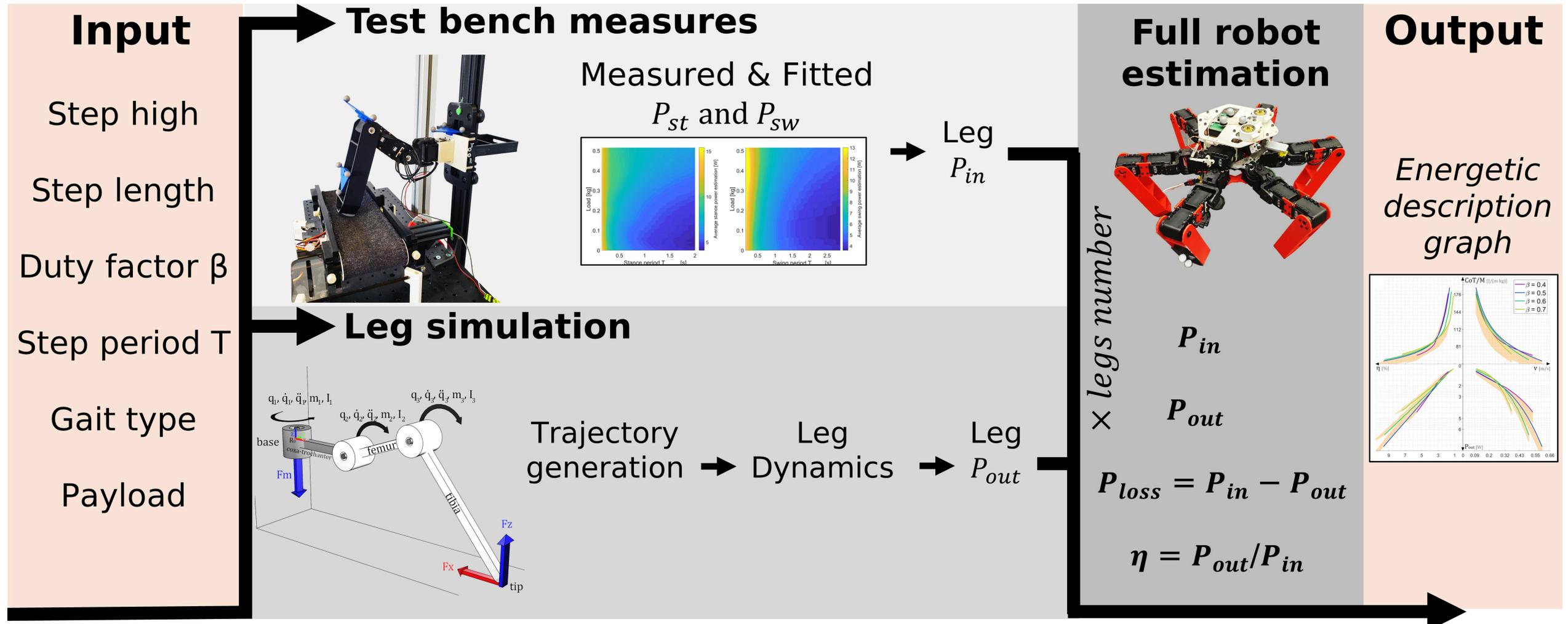
B Table de Denavit-Hartenberg

Joint i	$\alpha_i$ [rad]	$a_i$ [mm]	$d_i$ [mm]	$\theta_i$ [rad]	mass [g]
1	$\pi/2$	53	0	$q_1$	15
2	0	83	0	$q_2$	112
3	0	146	0	$q_3$	39



# III. Evaluation des performances d'un robot hexapode

## Estimation du profil énergétique



Quatre descripteurs énergétiques :  $\{P_{out}, \eta, CoT/M, v\}$

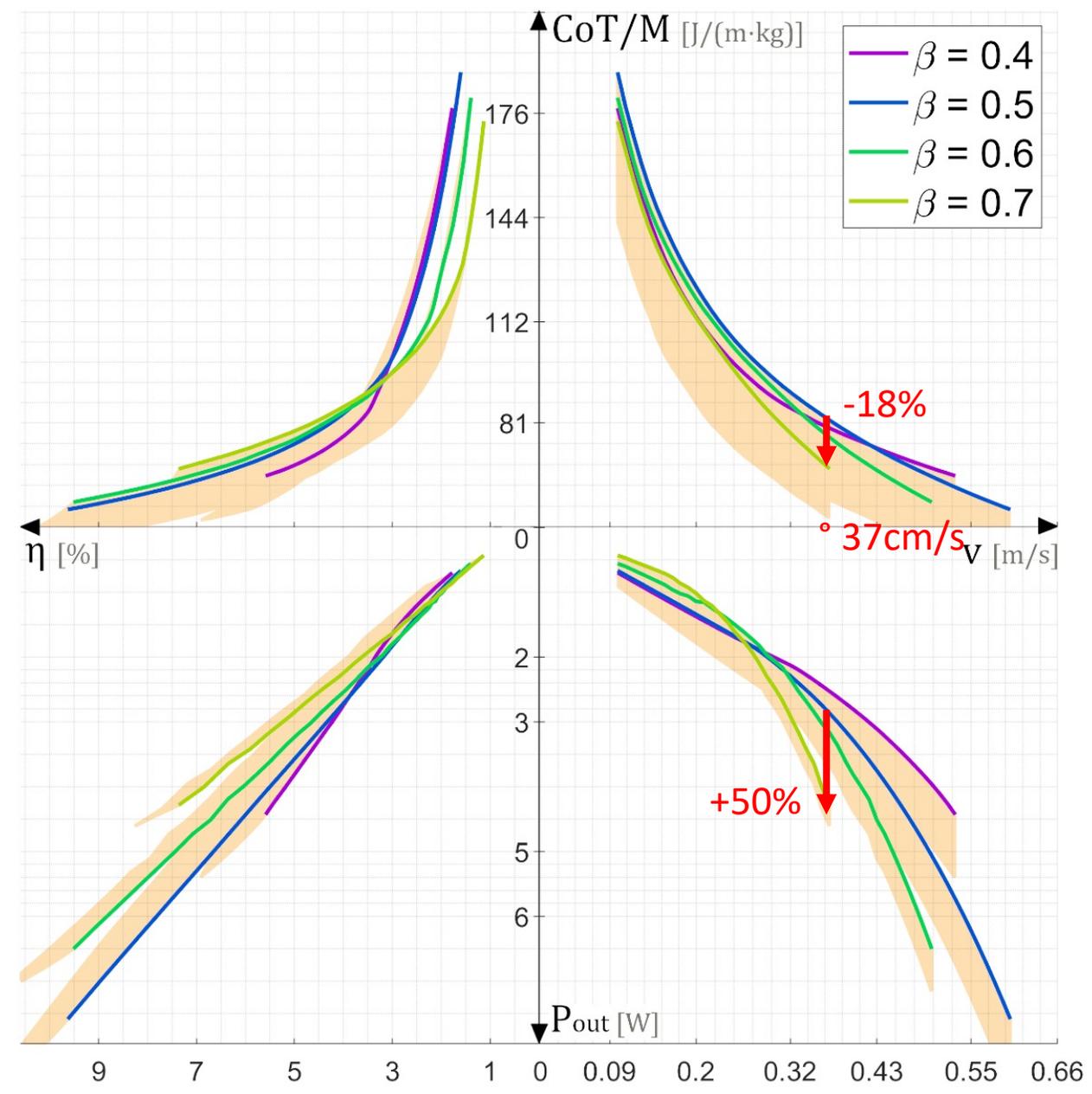
### III. La mesure des performances d'un robot hexapode

#### Estimation du profil énergétique

Influence du rapport cyclique $\beta$
Influence de la longueur des pas L
Influence du patron de marche

Graphique à quatre quadrants, présentant les indicateurs énergétiques  $\{P_{out}, \eta, CoT/M, v\}$ .

(en revision) I. Brodoline et al. Scientific Reports, 2023.



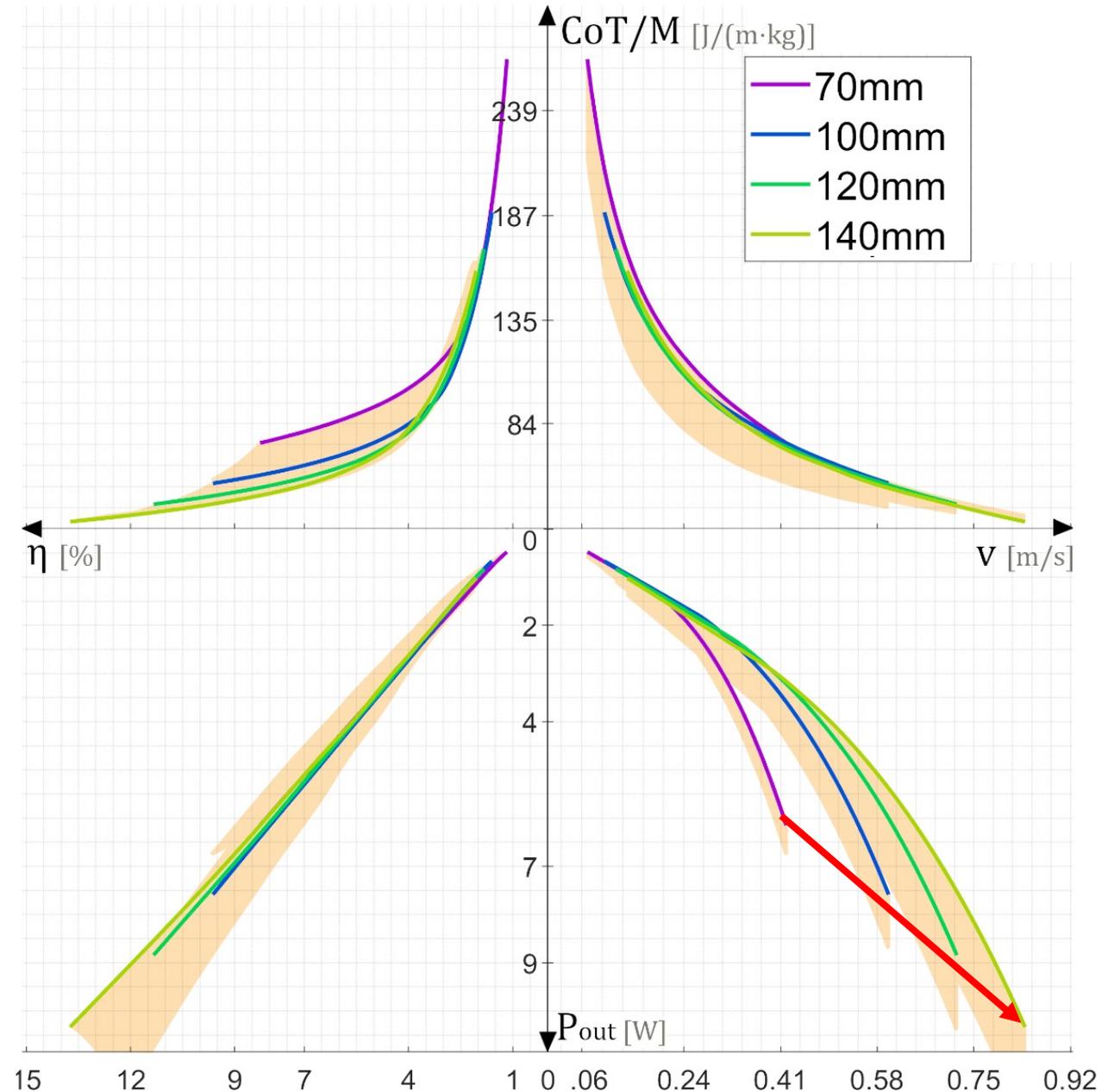
### III. La mesure des performances d'un robot hexapode

#### Estimation du profil énergétique

Influence du rapport cyclique $\beta$
Influence de la longueur des pas $L$
Influence du patron de marche

Graphique à quatre quadrants, présentant les indicateurs énergétiques  $\{P_{out}, \eta, CoT / M, v\}$ .

(en revision) I. Brodoline et al. Scientific Reports, 2023.



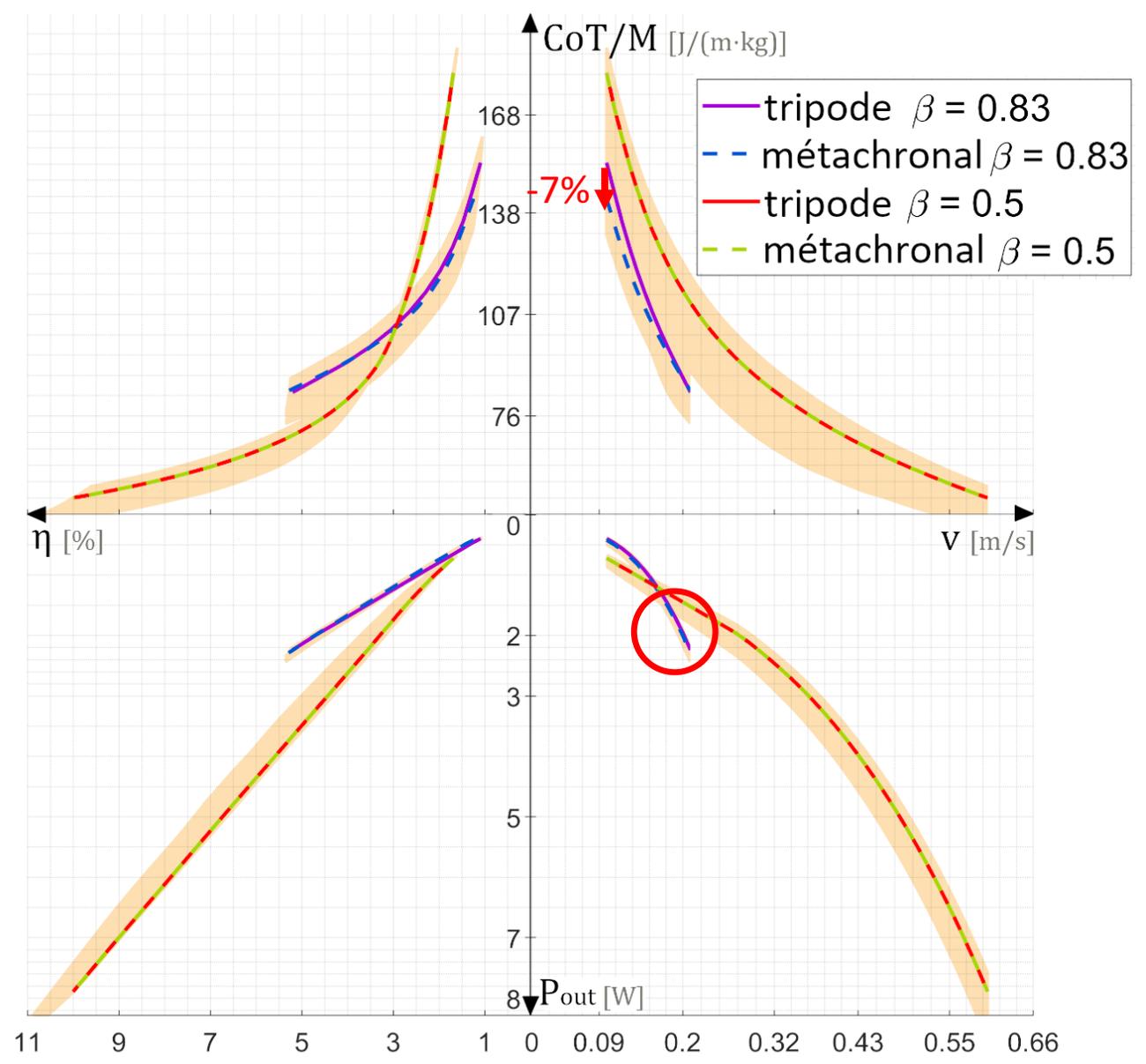
### III. La mesure des performances d'un robot hexapode

#### Estimation du profil énergétique

- Influence du rapport cyclique  $\beta$
- Influence de la longueur des pas  $L$
- Influence du patron de marche

Graphique à quatre quadrants, présentant les indicateurs énergétiques  $\{P_{out}, \eta, CoT/M, v\}$ .

(en revision) I. Brodoline et al. Scientific Reports, 2023.

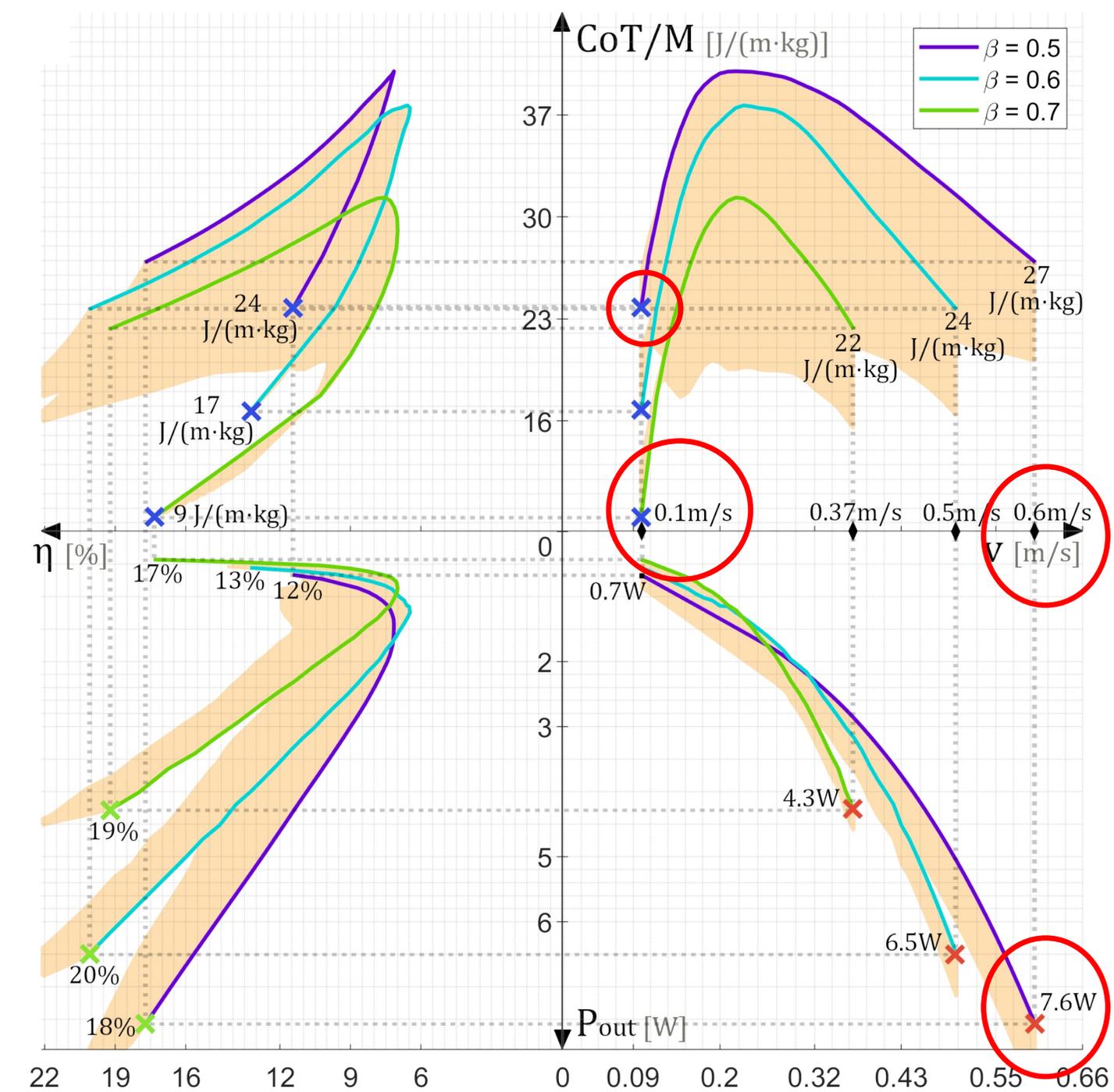


# III. La mesure des performances d'un robot hexapode

## Le profil énergétique optimal

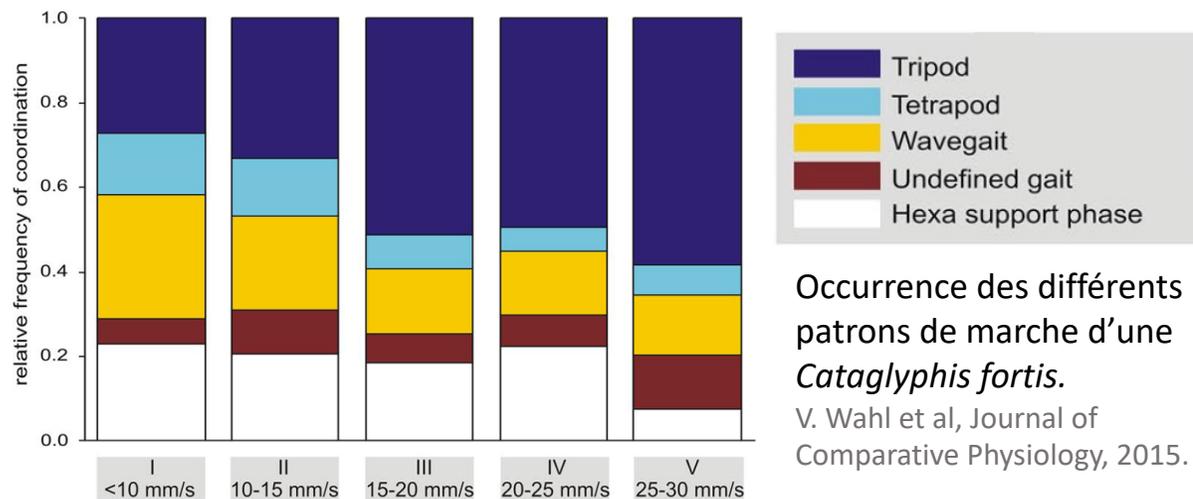
Description énergétique optimisé de l'hexapode dans le cas où il posséderait plusieurs points de fonctionnement. Cas de figure obtenu en réduisant la puissance consommée  $P_{in}$  de 36W.

- X CoT/M minimum
- X Rendement maximum
- X Puissance de sortie maximale



# Comparaison de deux hexapodes à base de pattes *AXLeg* & *Pohod15Leg*

Indicateur de performance	AXLeg	Pohod15Leg
Masse [kg]	1,9 kg	2,5 kg
Fréquence [Hz]	0,37	0,31
Longueur des pas [mm]	106	115
Vitesse [cm/s]	7,8	7,1
Précision des pas [mm]	±3	±1
Propulsion inefficace	5 %	9 %
Puissance moy. [W]	28	81
Puissance moy. statique [W]	9	0
Résistance spécifique $\epsilon$	19	47
Degré d'élévation de température (DET)	3,2°C/min	2,1°C/min



## Conclusion

### Les achèvements

- Mise en évidence des défauts structurels des hexapodes bio-inspirés.  
**Un seul point de fonctionnement optimum**  
**Nouveaux actionneurs ?**

- Proposition d'un nouveau design de patte bio-inspiré *Pohod15Leg* open source.

#### Projet open science

Coût < 3000 €



open science

- Définition d'une nouvelle méthode d'estimation et d'optimisation des performances d'un robot hexapode à partir d'une seule et unique patte.  
**Méthode d'évaluation d'un hexapode**  
**Réduction du nombre d'itérations de prototypage**