

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** »

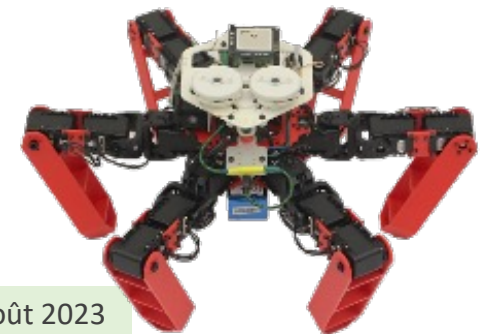
Quels types de robots existent-ils ?



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

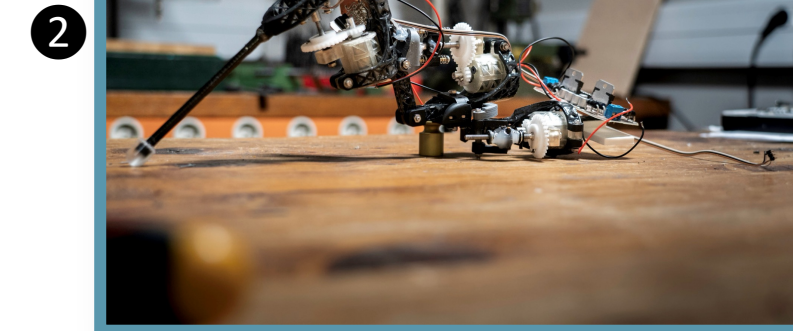
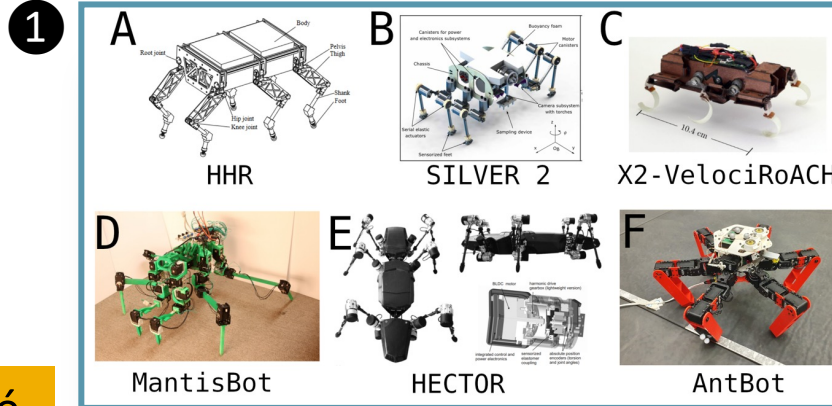
Introduction

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



I. Etat de l'art des robots hexapodes

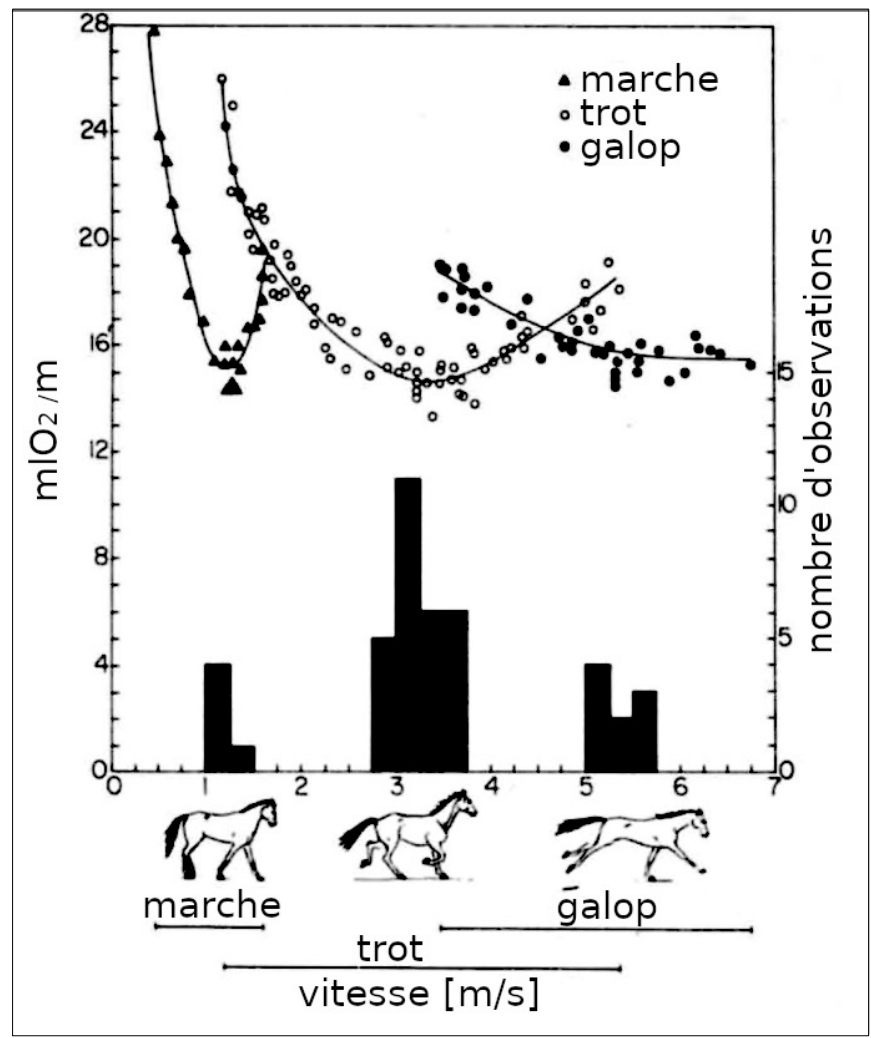
Qu'est-ce qu'un robot performant ?

Coût du Transport animal

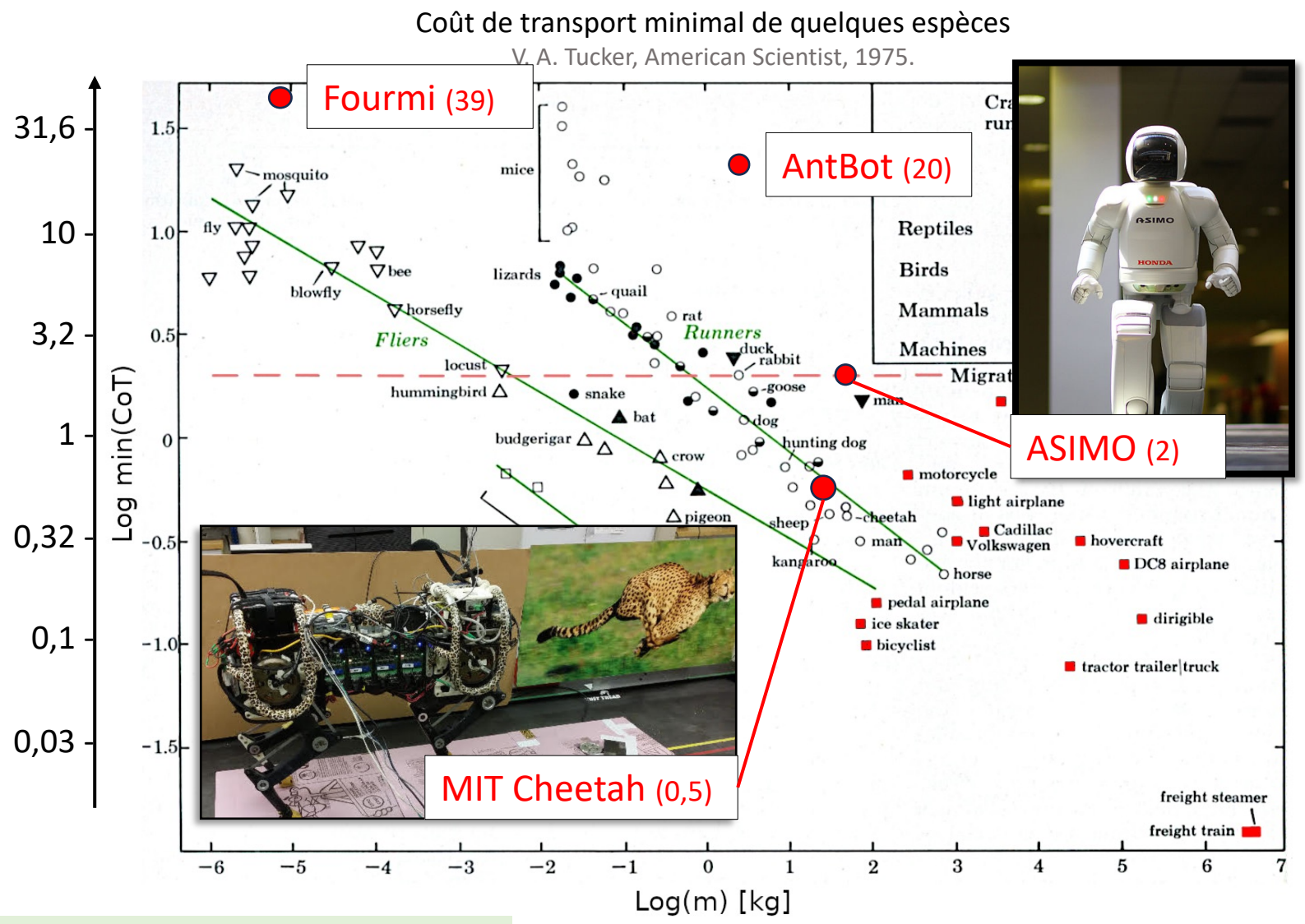
$$CoT [ml \cdot m^{-1} \cdot kg^{-1}] = \frac{\Phi_{O_2}}{v \cdot m}$$

Résistance spécifique

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

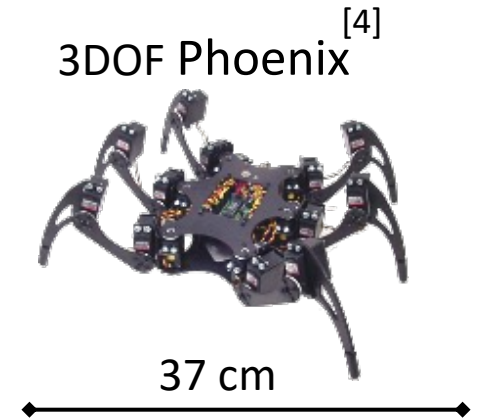
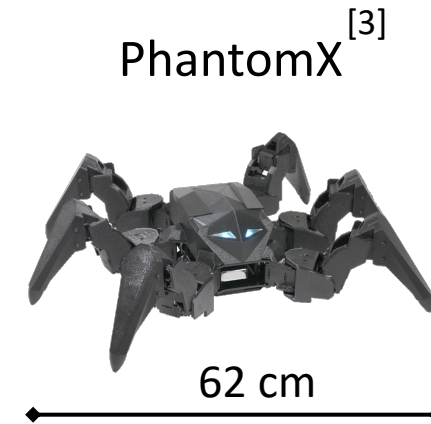
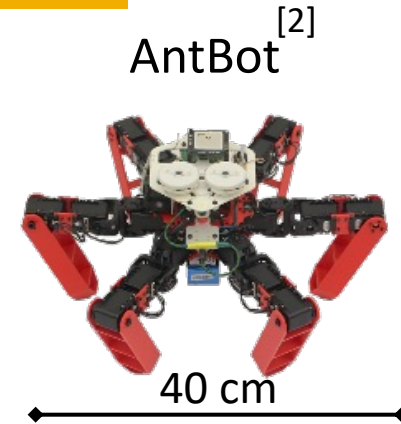
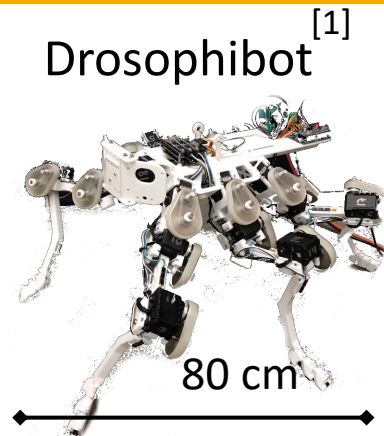


Coût du transport du cheval
D. F. Hoyt et C. R. Taylor, Nature, 1981.



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.

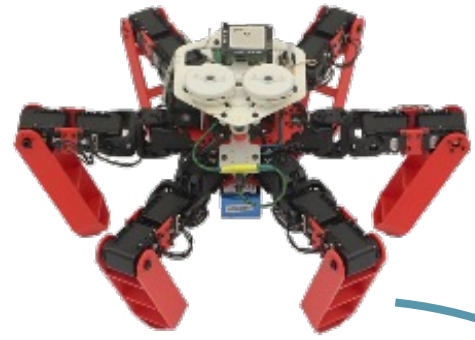
[3] PhantomX Metal Hexapod MK-III Kit, Ref. KIT-MKIV-XL-S, 2020.

[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



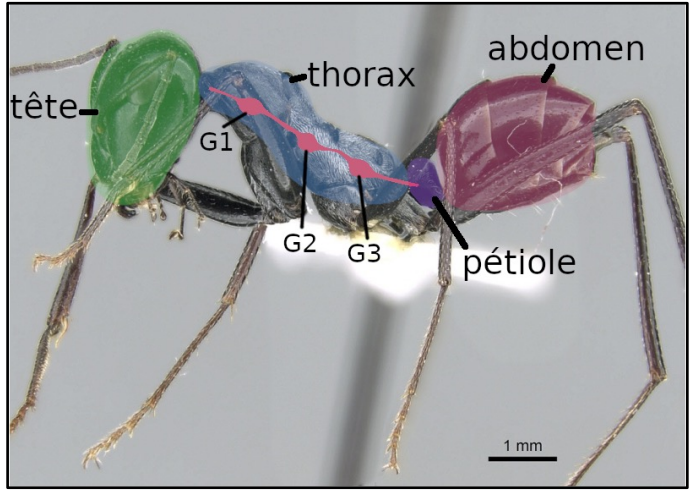
Connaissances & modélisation de la fourmi

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.

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

L'étude de la locomotion des insectes

A

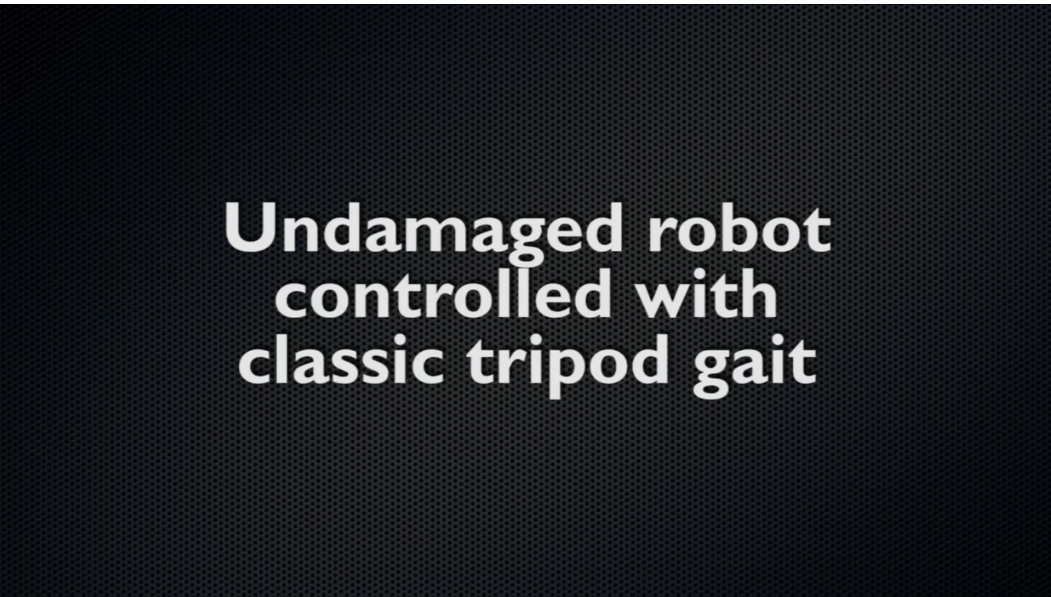
B

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q)$$
$$x = f(q)$$
$$q = f^{-1}(x)$$

C

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.



A. Cully et al, Nature, 2015

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

+

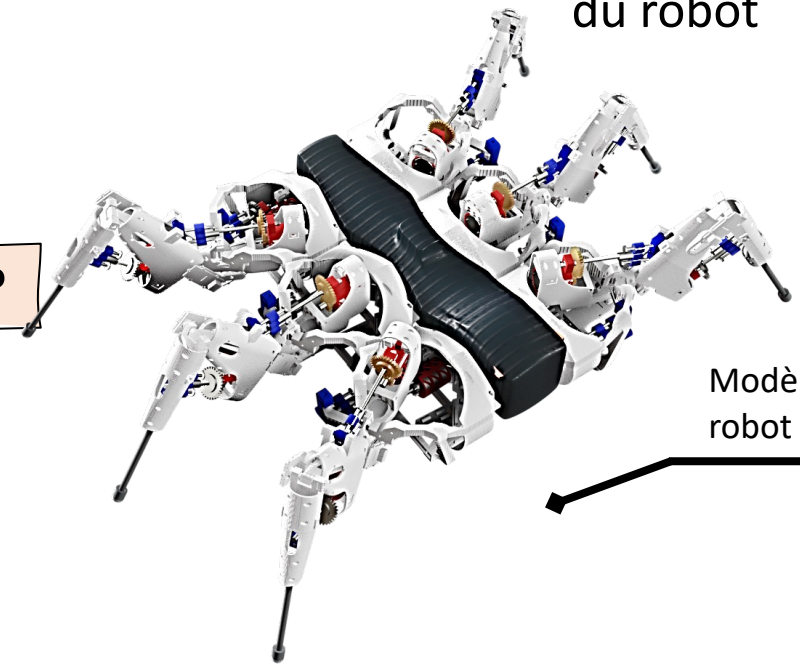
Les
performances
du robot

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 ?

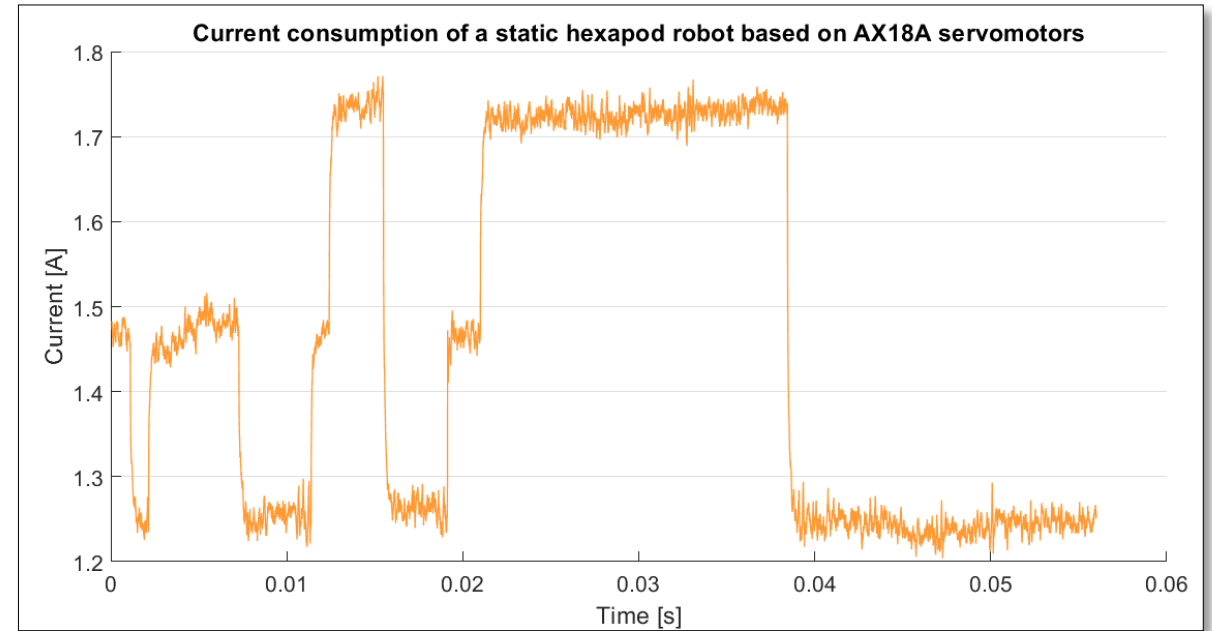
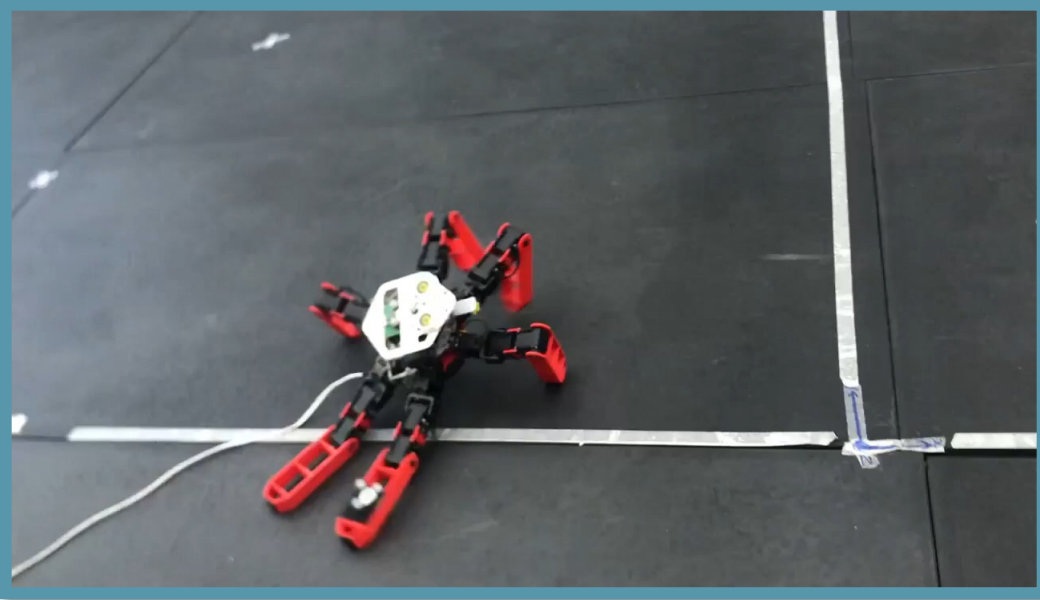
Étude d'une patte unique



Modèle 3D du
robot *Pohod15*

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

Les défauts des robots actuels



Avantages :

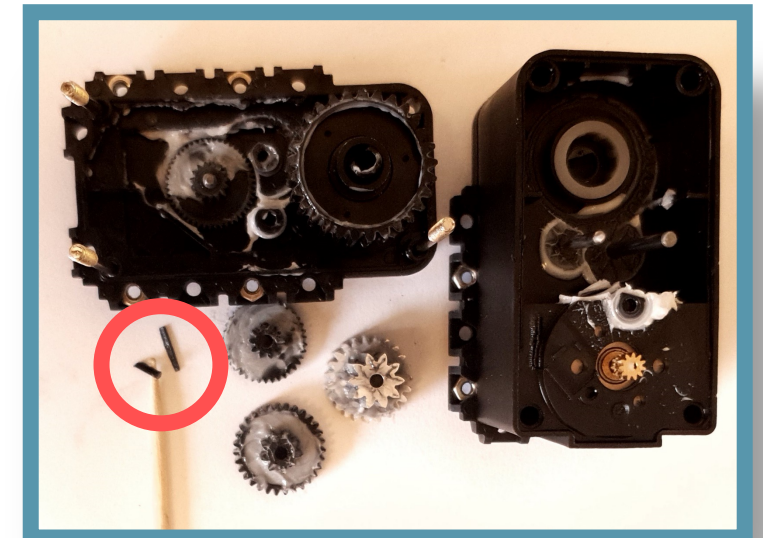
- Compacte
- Simple à implémenter
- Commande facile (Vitesse, position)
- Nombreux modèles disponibles

+

Inconvénients :

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

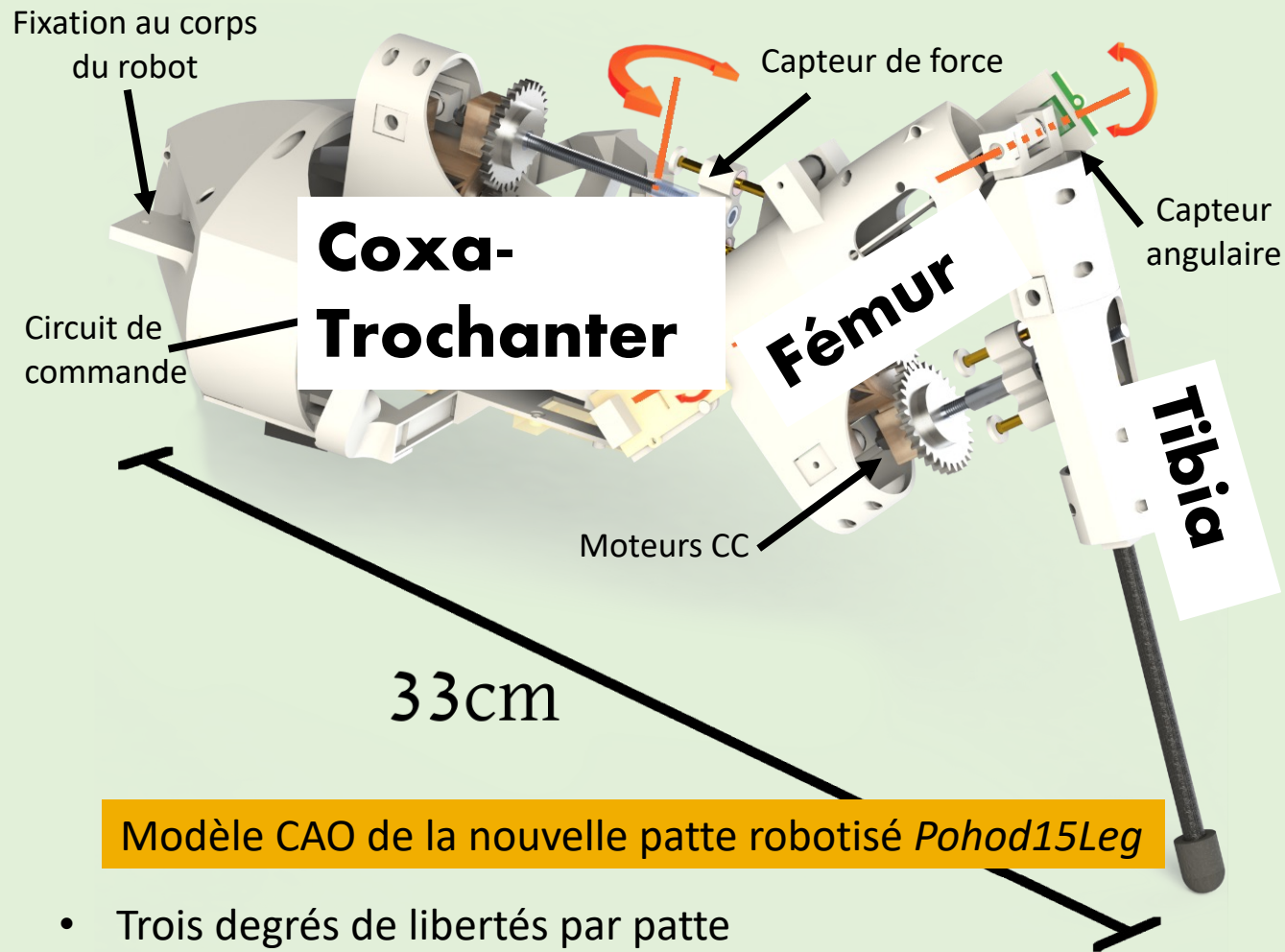
-



Servomoteur avec la denture cassée

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

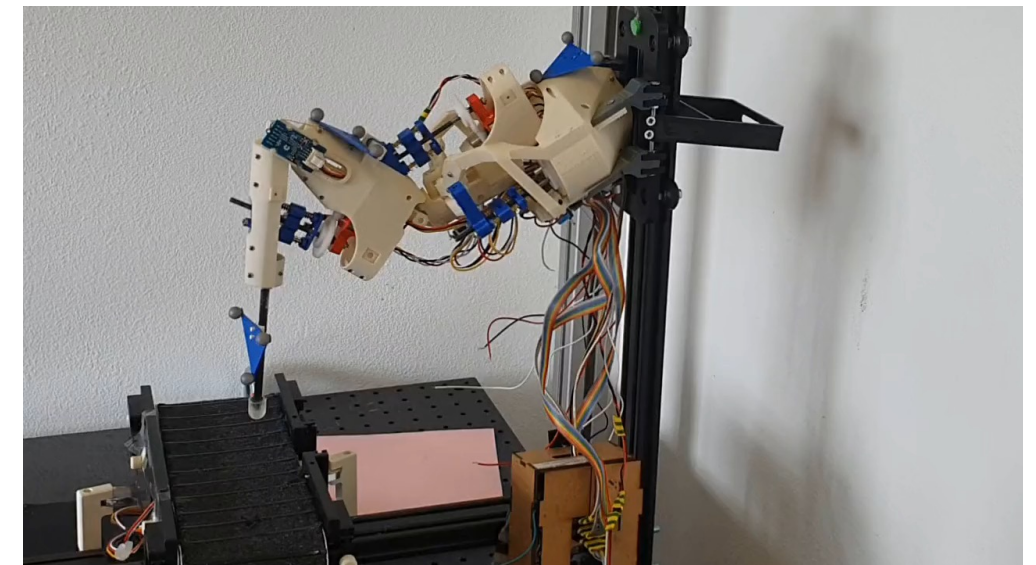
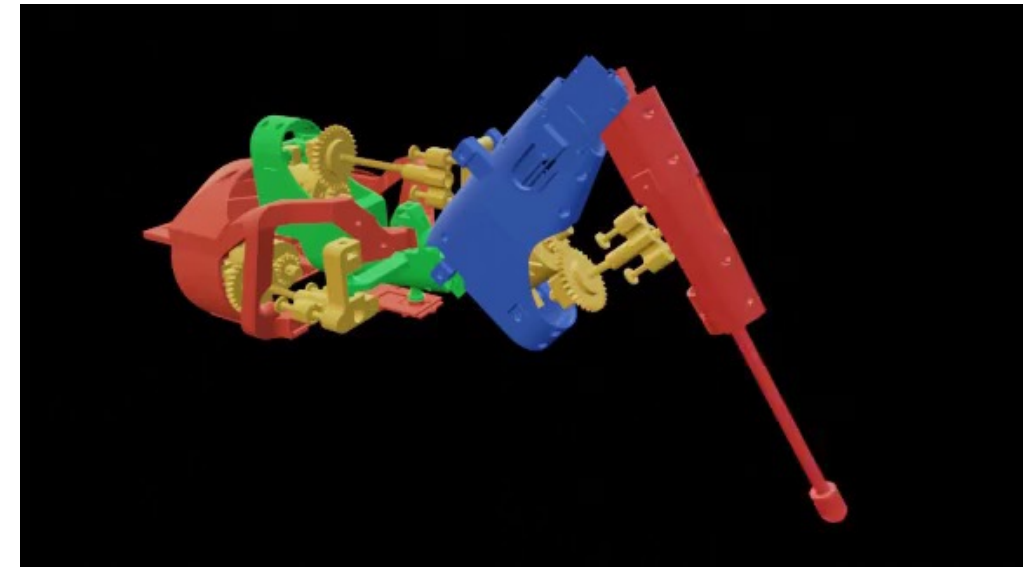
Les choix technologiques pour la patte *Pohod15Leg*



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*



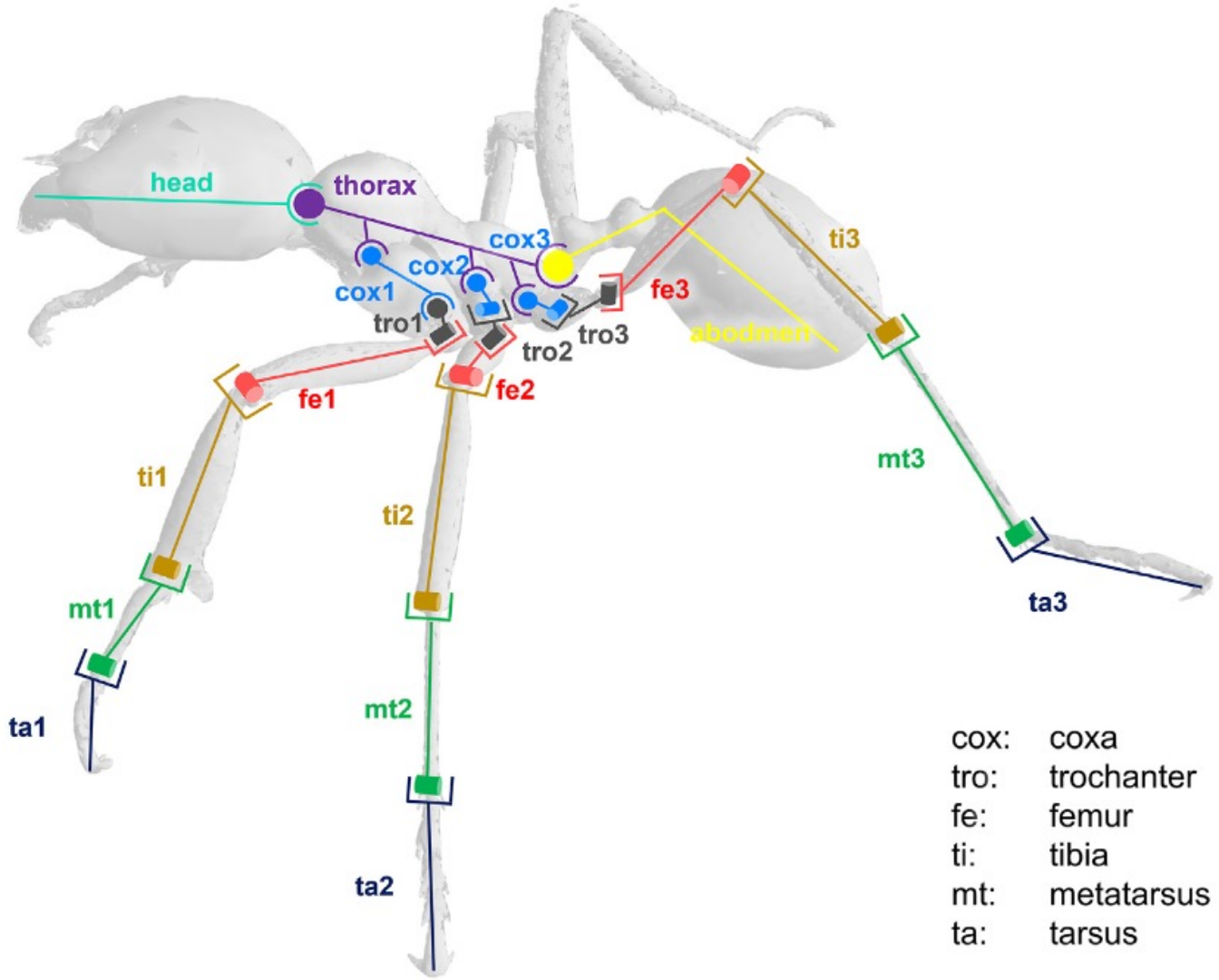
Vidéo de la patte *Pohod15* en train de marcher sur un tapis roulant.

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

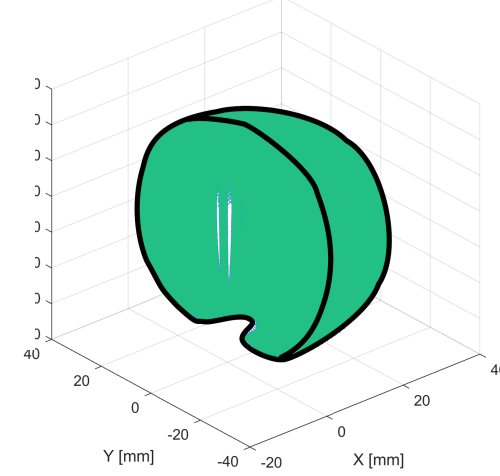
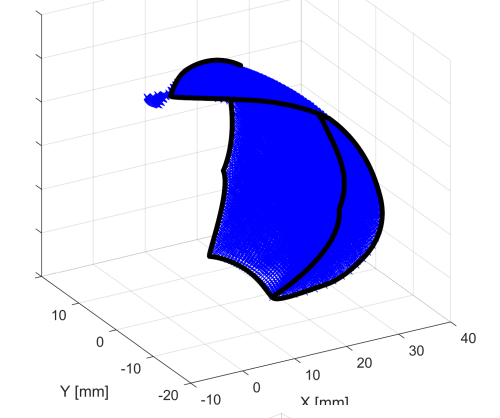
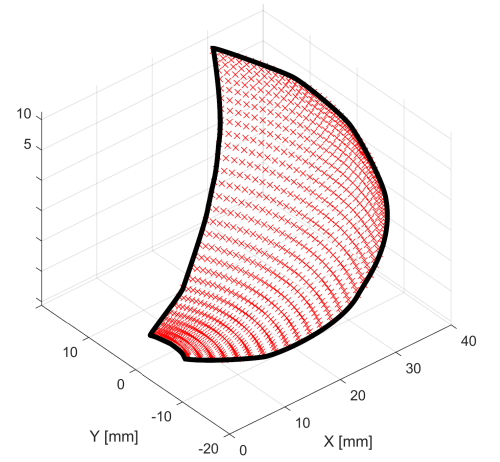
2 DDL



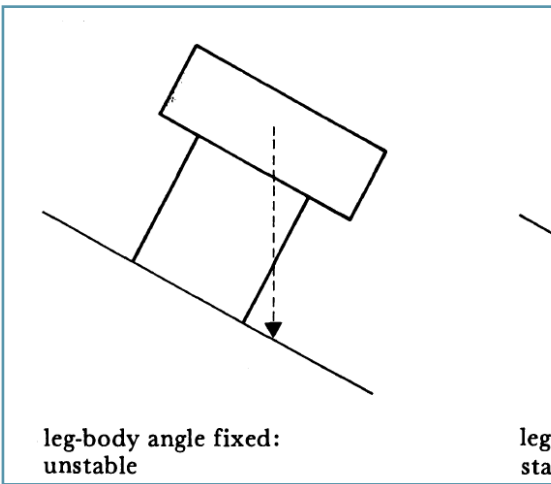
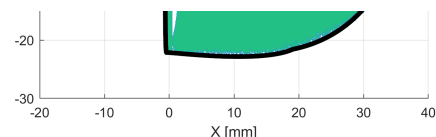
Vue de gauche



Vue en perspective



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



Machines: An Introduction to Legged Robots, 1985.

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

L'actionneur de la patte

Résistance & Surchauffe

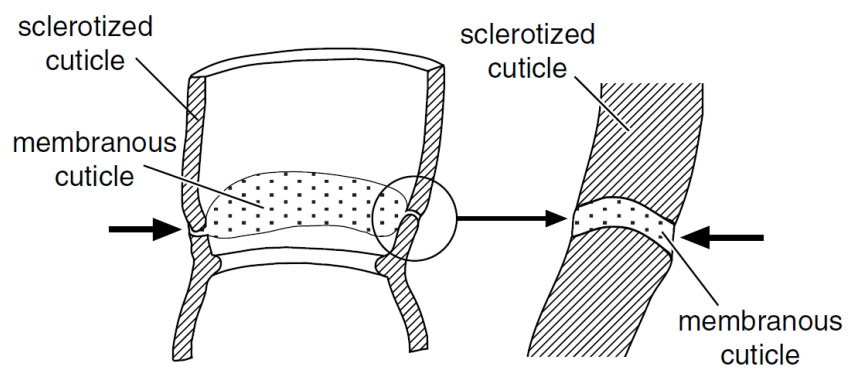
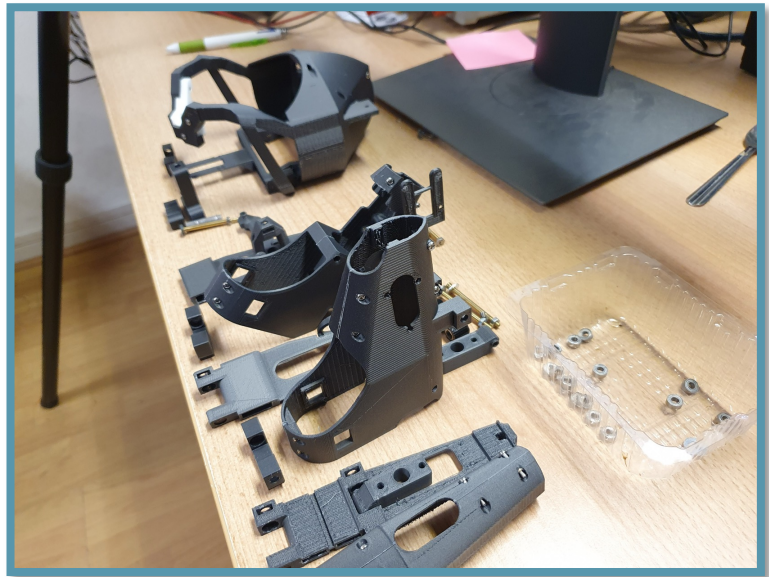
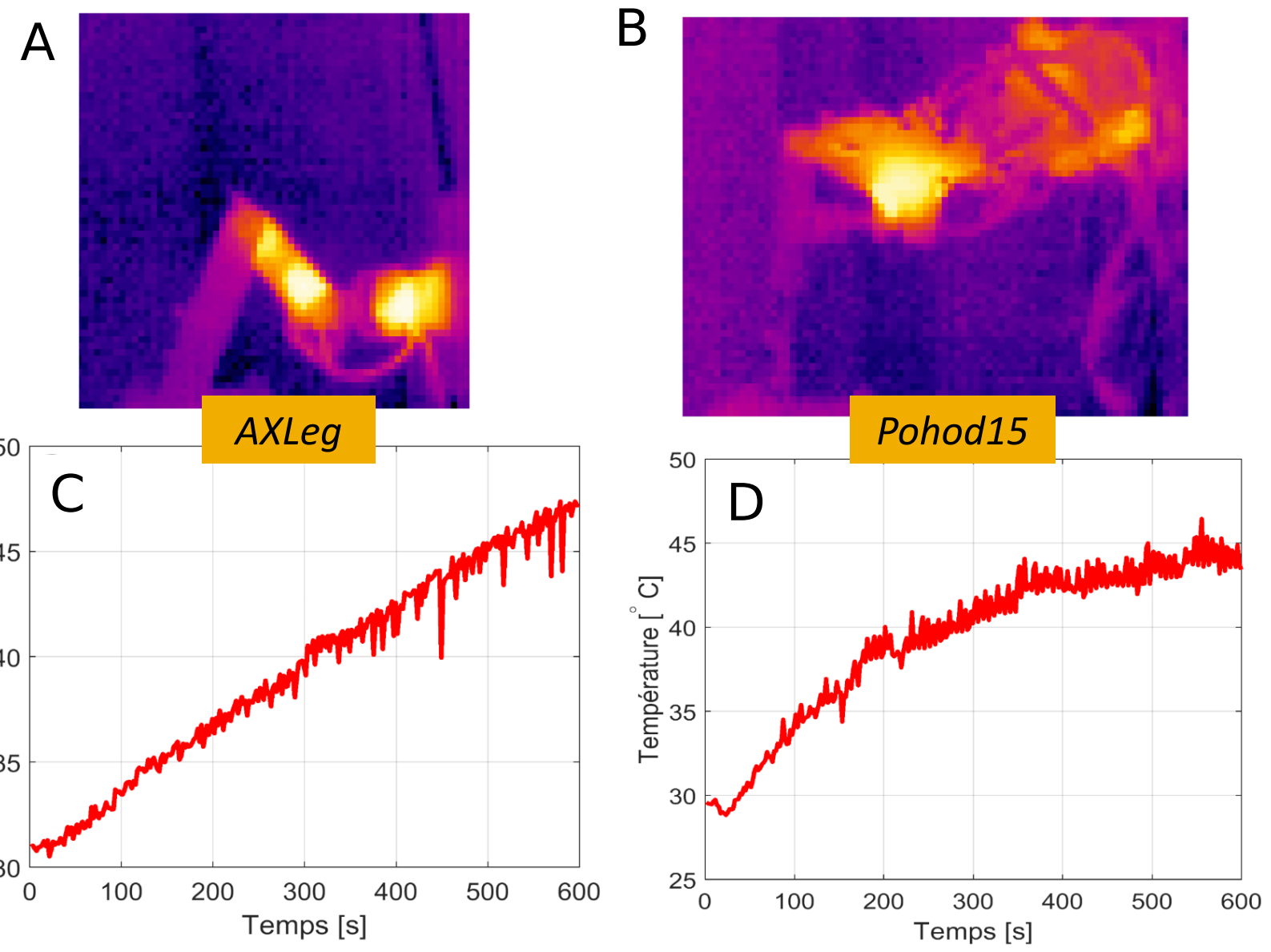


Schéma en coupe d'une articulation de patte d'insecte
R. F. Chapman et al, The Insects Structure and Function, 2012.

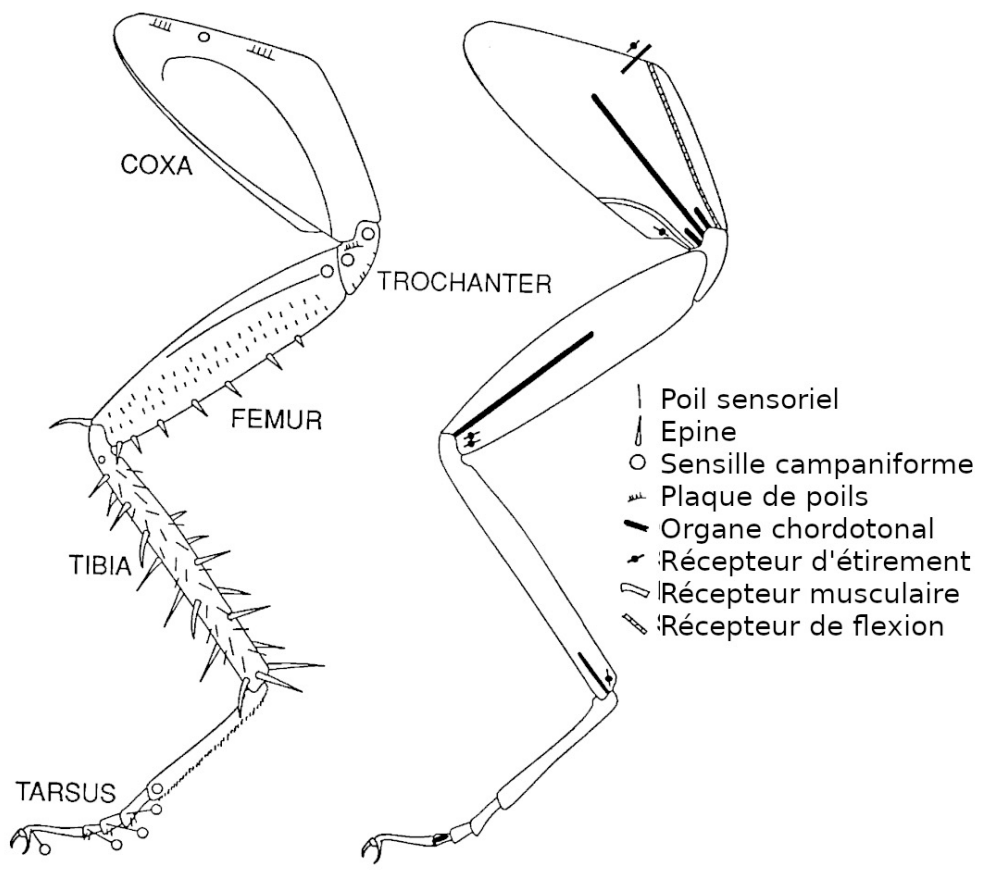


Évolution de la température moyenne d'une patte d'hexapode après 10min de marche



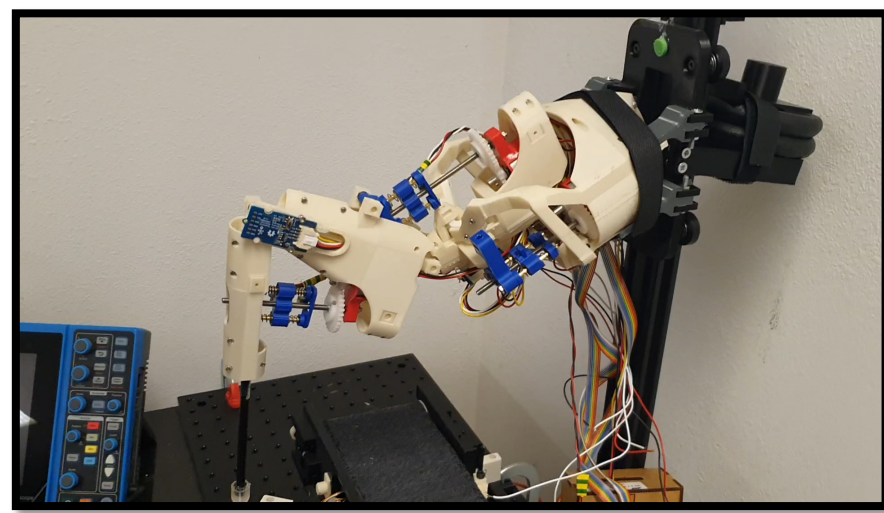
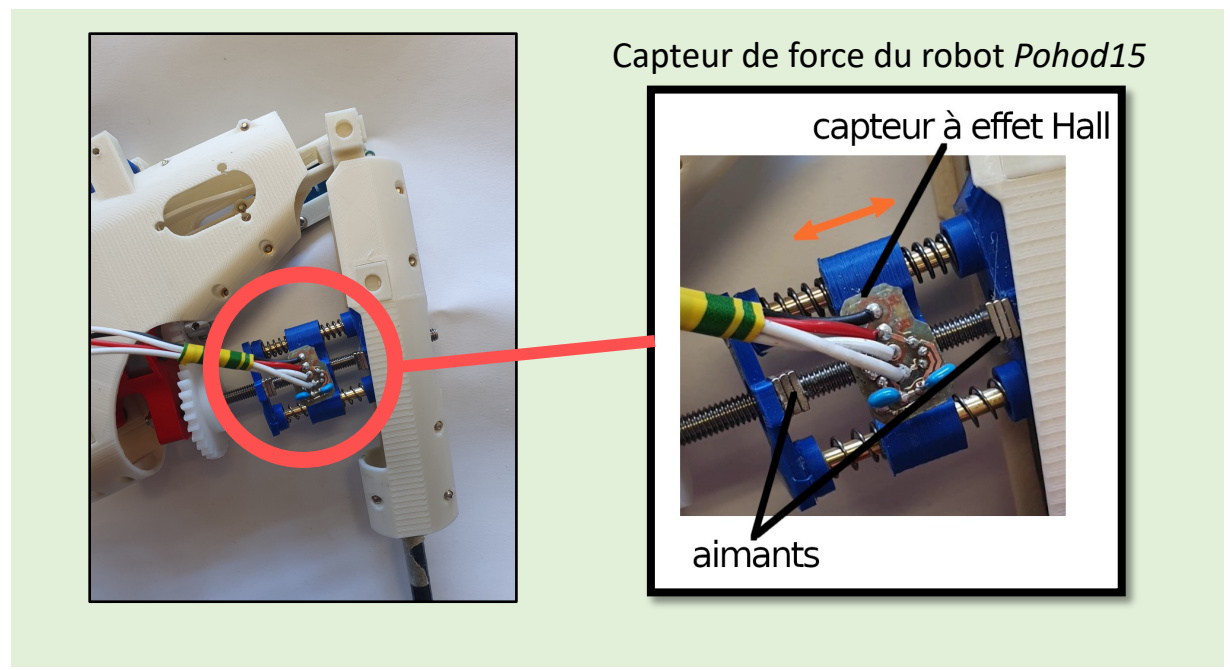
II. Les étapes de fabrication d'un robot bio-inspiré

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 Neurorobotics, 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 :

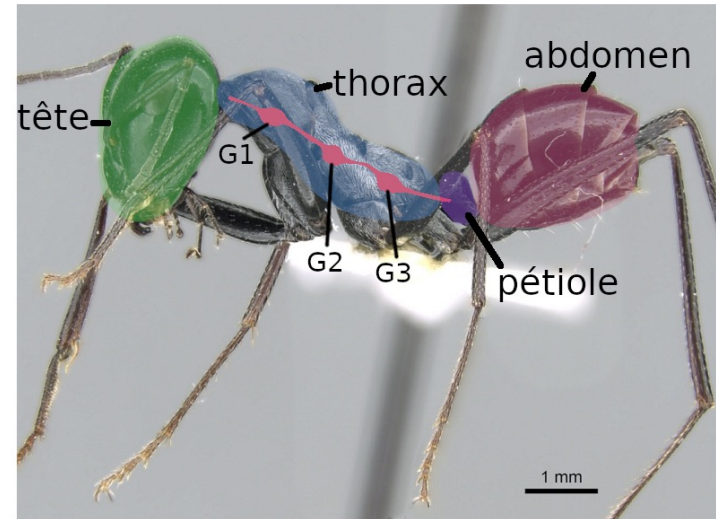
Longueur du pas : L

Période : $T = T_{st} + T_{sw}$

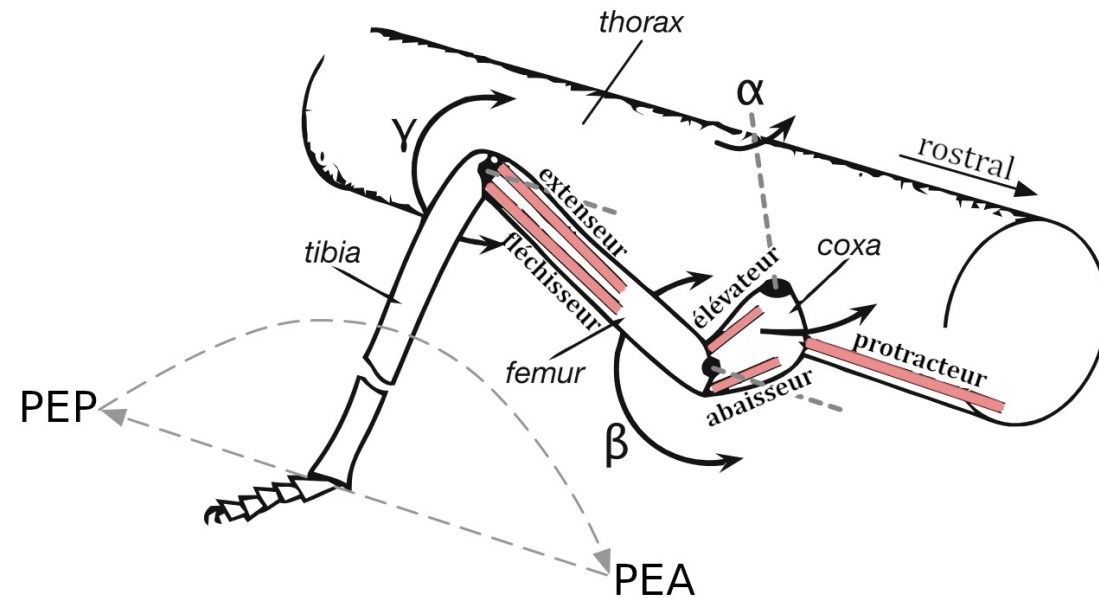
Vitesse : $v = \frac{2 \cdot L}{T}$

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

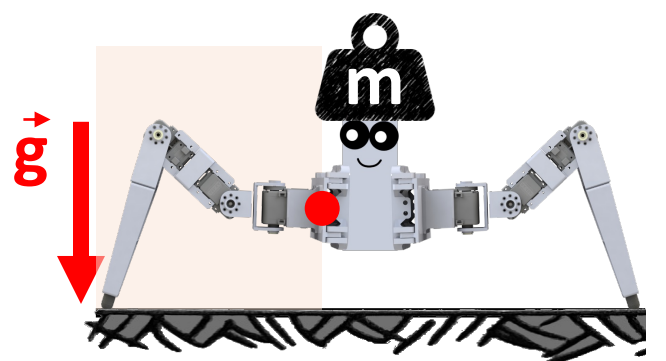
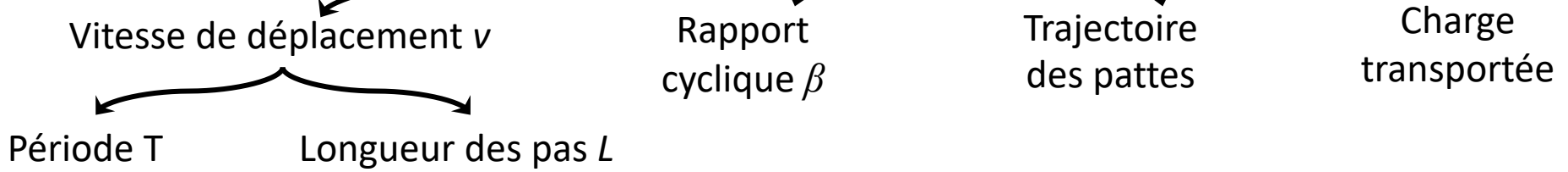


Modèle conventionnel d'une patte d'insecte
M. Schilling et al, Biological Cybernetic, 2013.

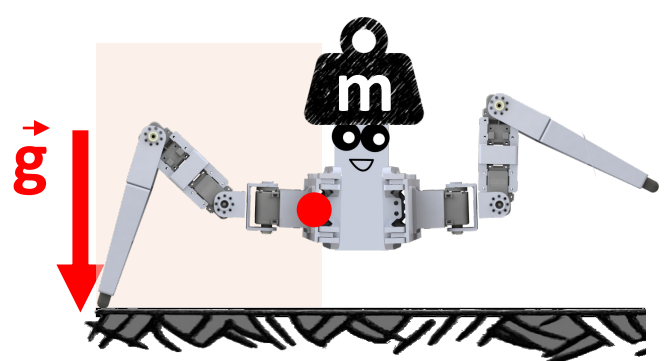
III. Evaluation des performances d'un robot hexapode

Description de la marche de l'hexapode

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

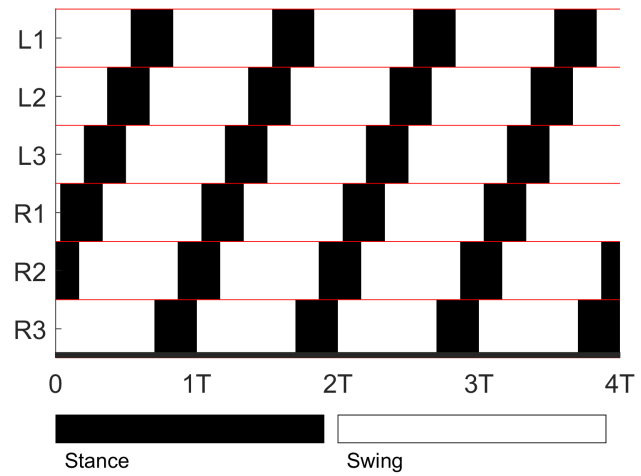


$$m_{base} = \frac{m + m_{corps}}{2}$$



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

+



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

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

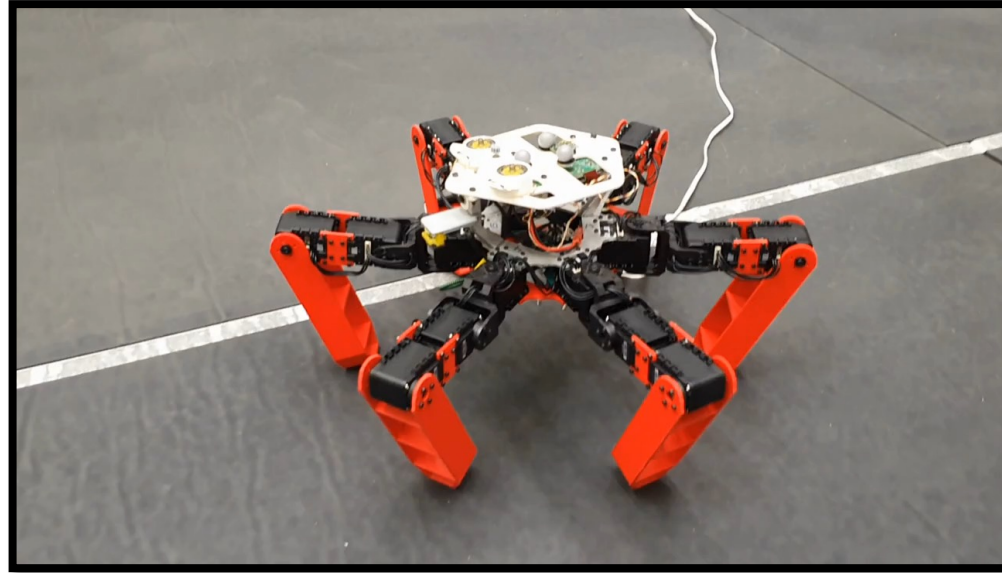
$$t \in [0, T]$$

(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

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

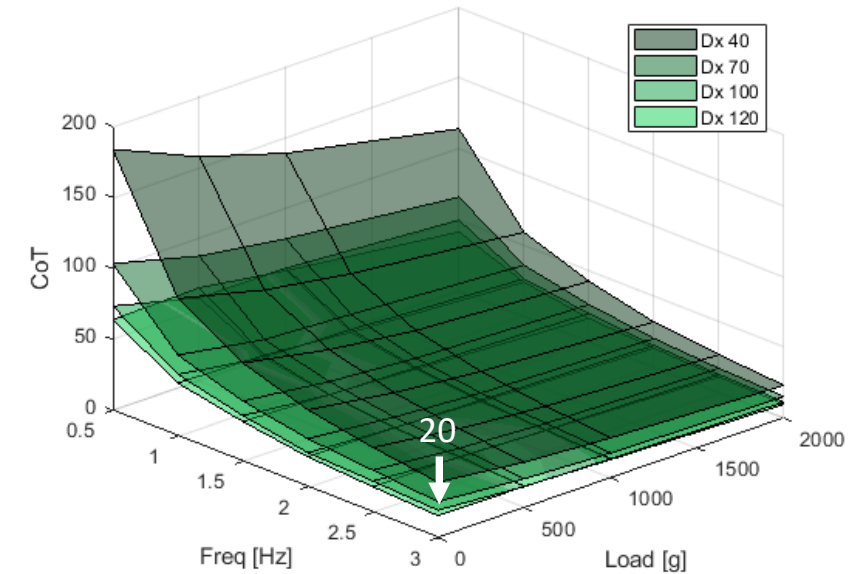
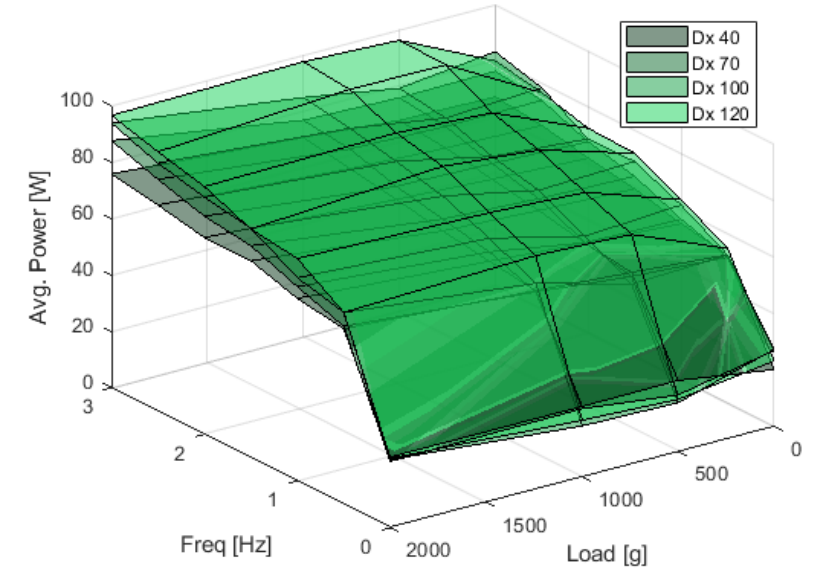
P_{in} : puissance utilisée pour se déplacer [W]

m : masse mise en mouvement [kg]

g : accélération de pesanteur [m/s^2]

v : vitesse [m/s]

Puissance moyenne consommée par *AntBot*

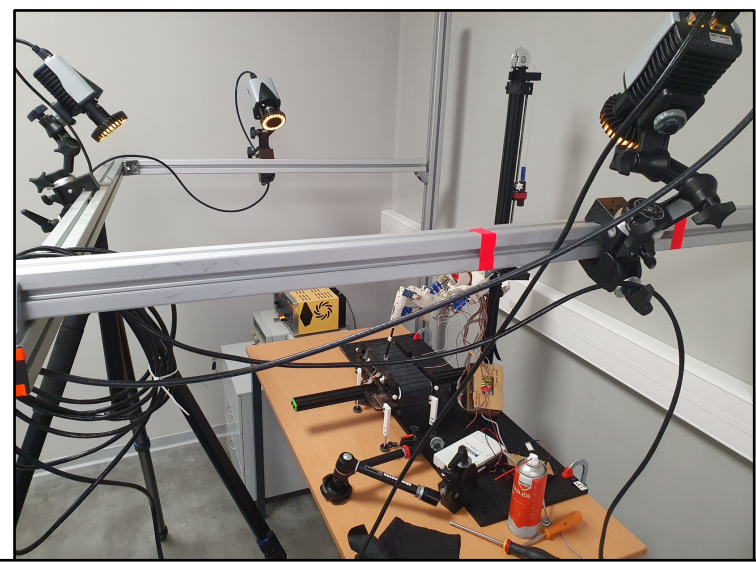


CoT mesuré pour *AntBot*

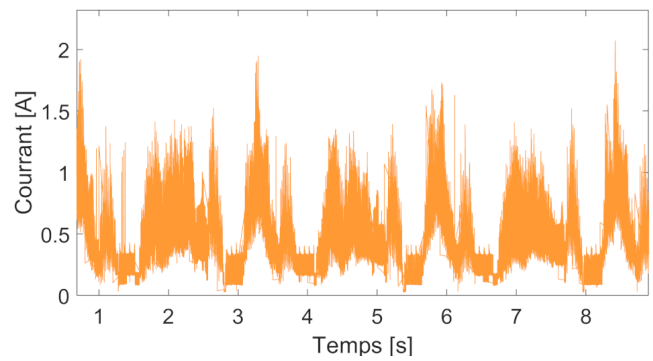
III. Evaluation des performances d'un robot hexapode

Le banc de test MiMiC-Ant

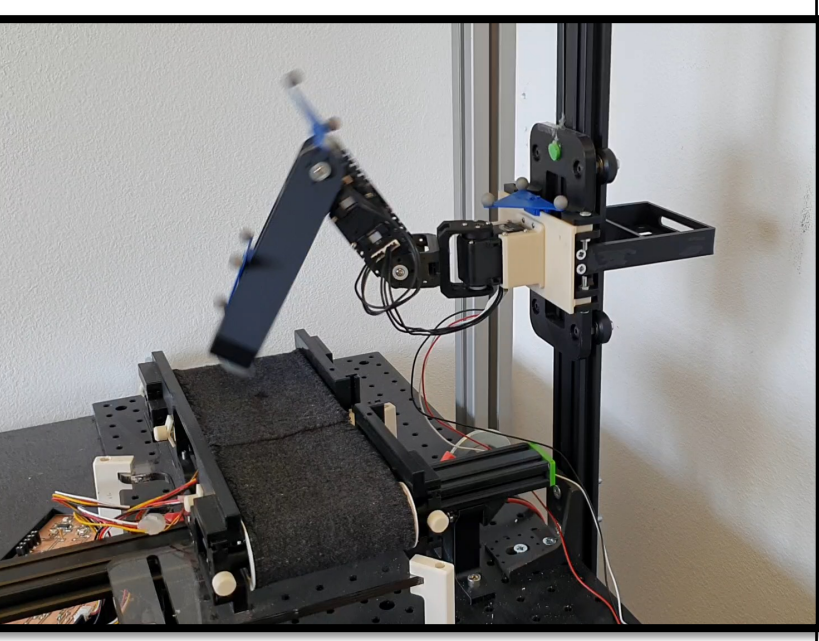
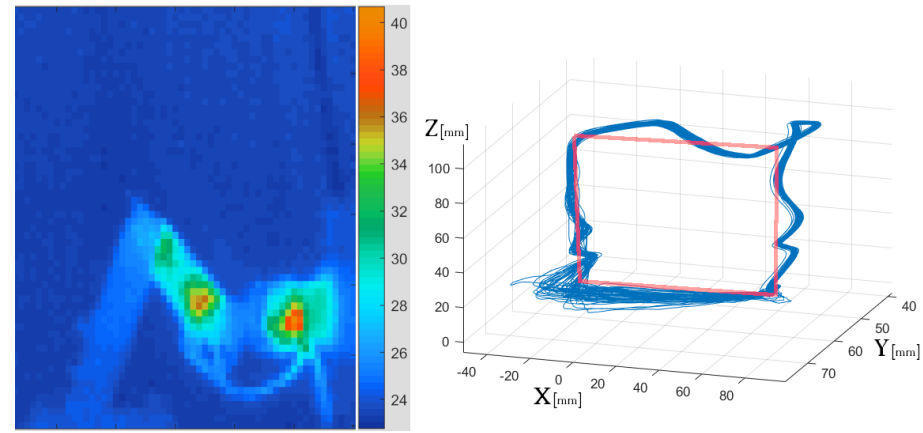
➔ Définir une procédure standardisée pour l'identification du profil énergétique d'un **robot** hexapode



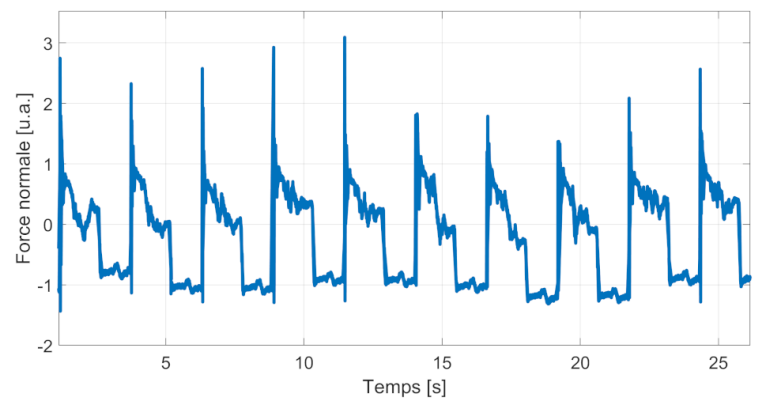
Banc de test *MiMiC-Ant*, avec la patte *Pohod15* installée.



Exemple de mesures réalisées par le banc de test.

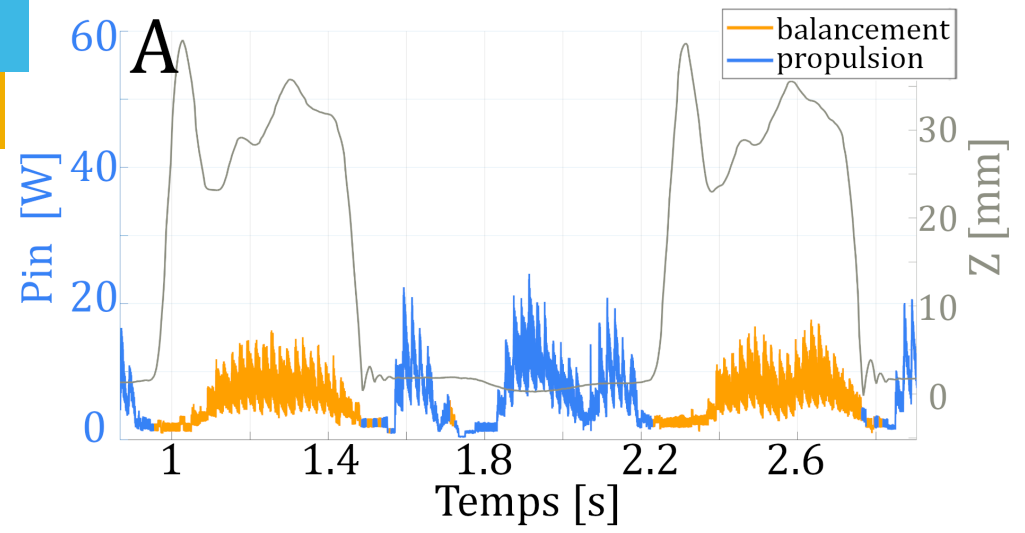
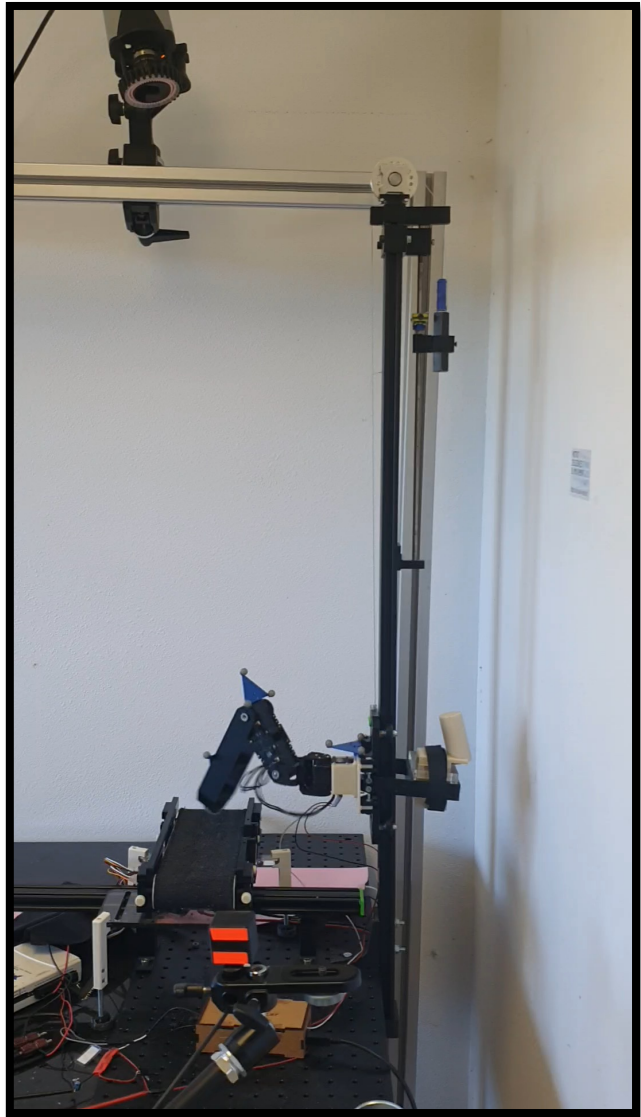


Banc de test *MiMiC-Ant*, avec la patte *AXLeg* installée.

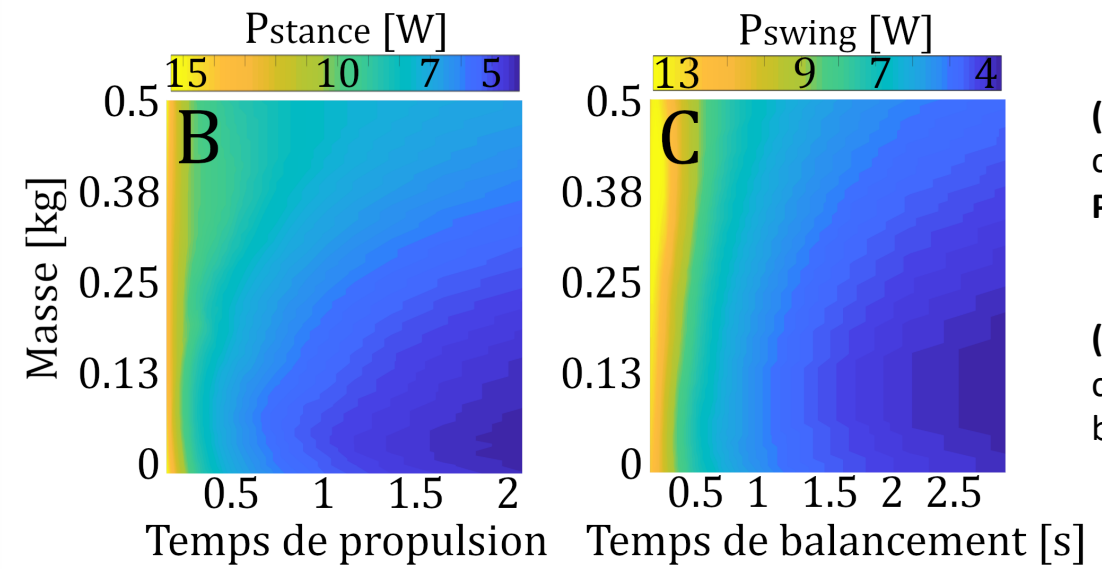


III. Evaluation des performances d'un robot hexapode

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 **Pst (Tswing ,masse)**.

(C) Estimation de la puissance moyenne consommée au cours de la phase de balancement **Psw (Tsw ,masse)**.

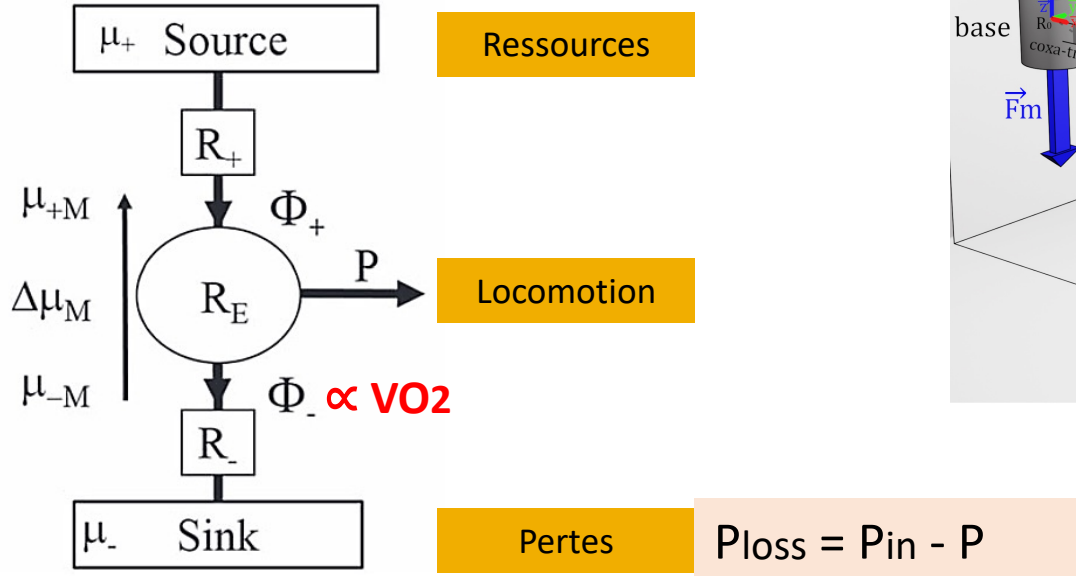
Calcul de la puissance moyenne consommée par l'hexapode :

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

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.



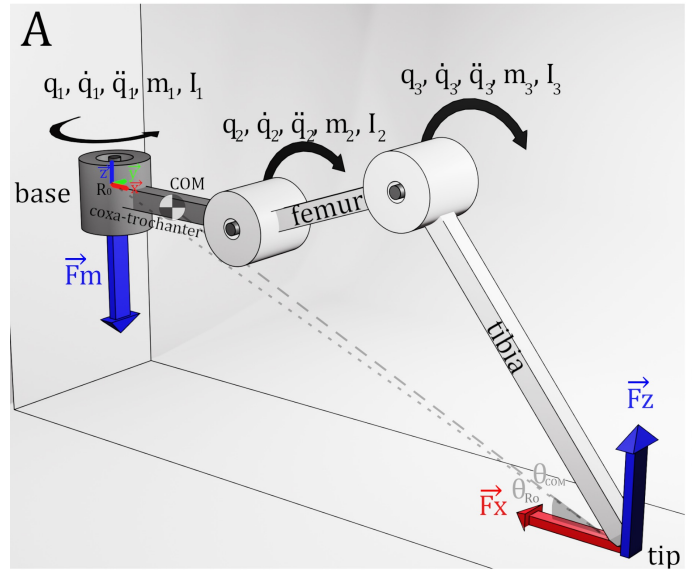
Coût du transport spécifique

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

Rendement

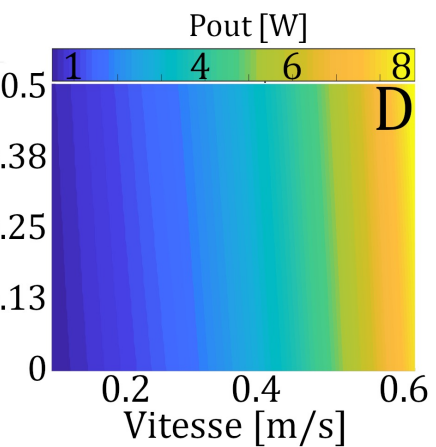
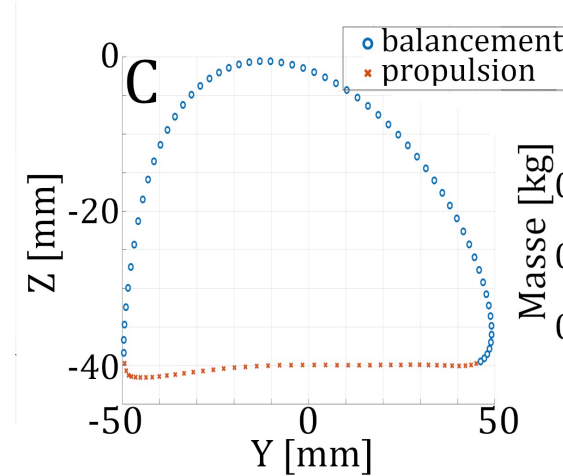
$$\eta = \frac{P}{P_{in}}$$

Calcul de la puissance mécanique du robot



B Table de Denavit-Hartenberg

Joint i	α_i [rad]	a_i [mm]	d_i [mm]	θ_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

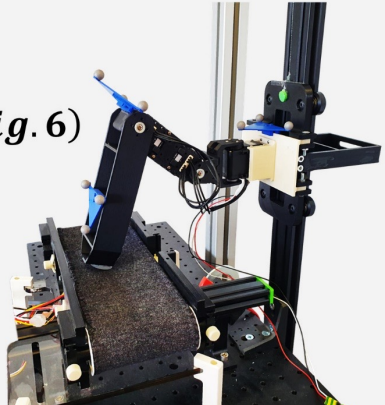
Estimation du profil énergétique

Input

- Step high
- Step length
- Duty factor β
- Step period T
- Gait type
- Payload

Test bench measures

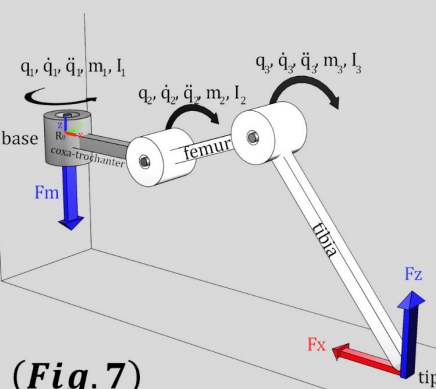
(Fig. 6)



Measured & Fitted P_{st} and P_{sw}

(Fig. 6)

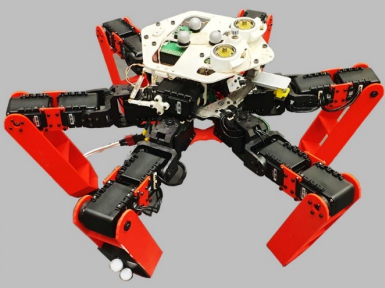
Leg simulation



(Fig. 7)

Trajectory generation (Fig. 7) → Leg Dynamics (Eq. 5) → Leg P_{out} (Fig. 7)

Full robot estimation



P_{in} (Eq. 1)

P_{out} (Eq. 6)

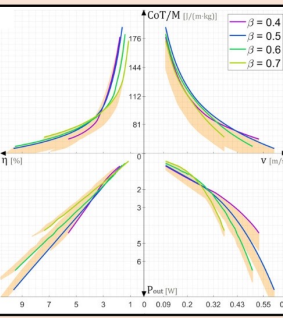
$P_{loss} = P_{in} - P_{out}$

$\eta = P_{out}/P_{in}$

× legs number

Output

Energetic description graph



(Fig. 2)

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

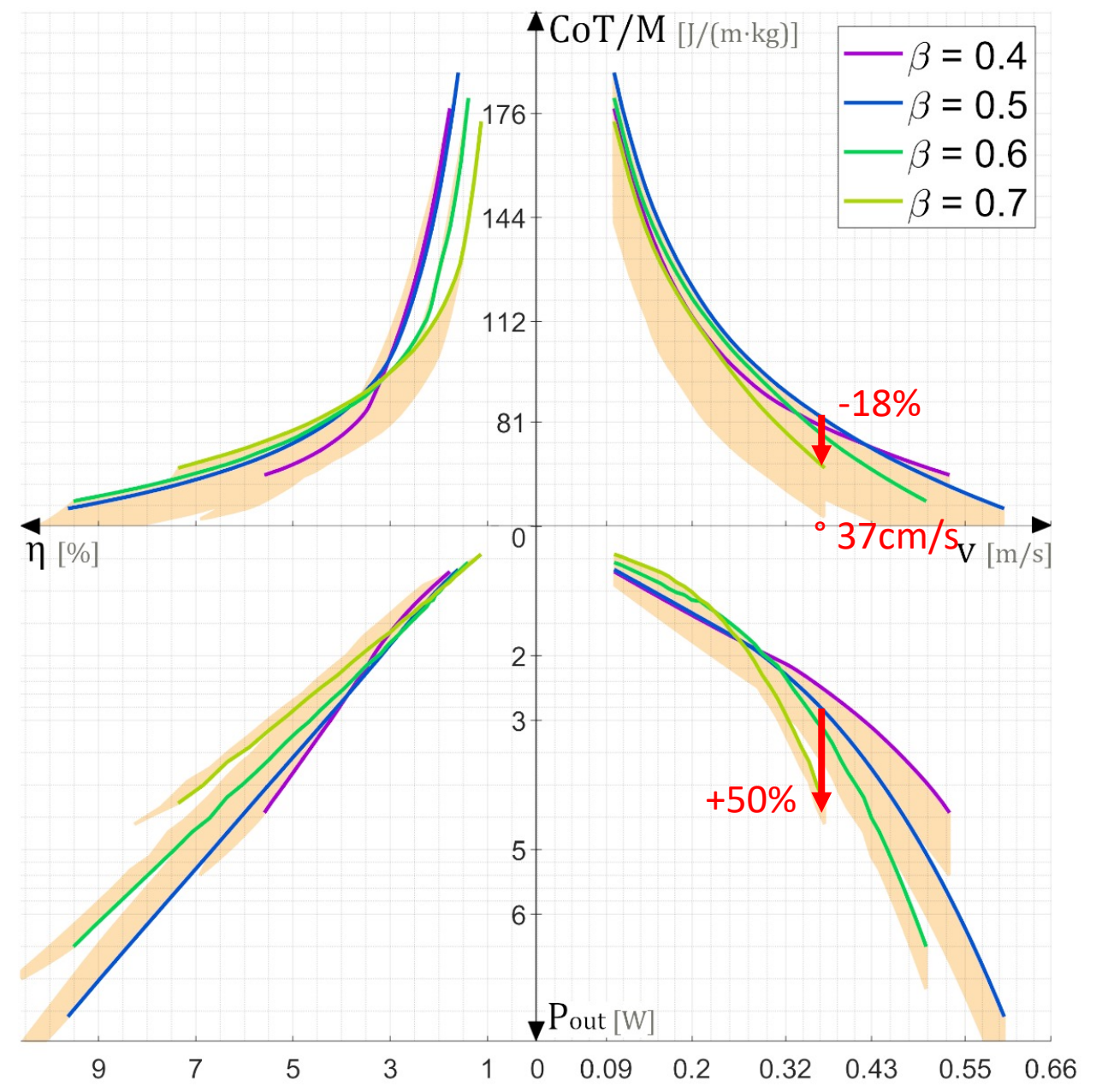
III. La mesure des performances d'un robot hexapode

Estimation du profil énergétique

Influence du rapport cyclique β
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.



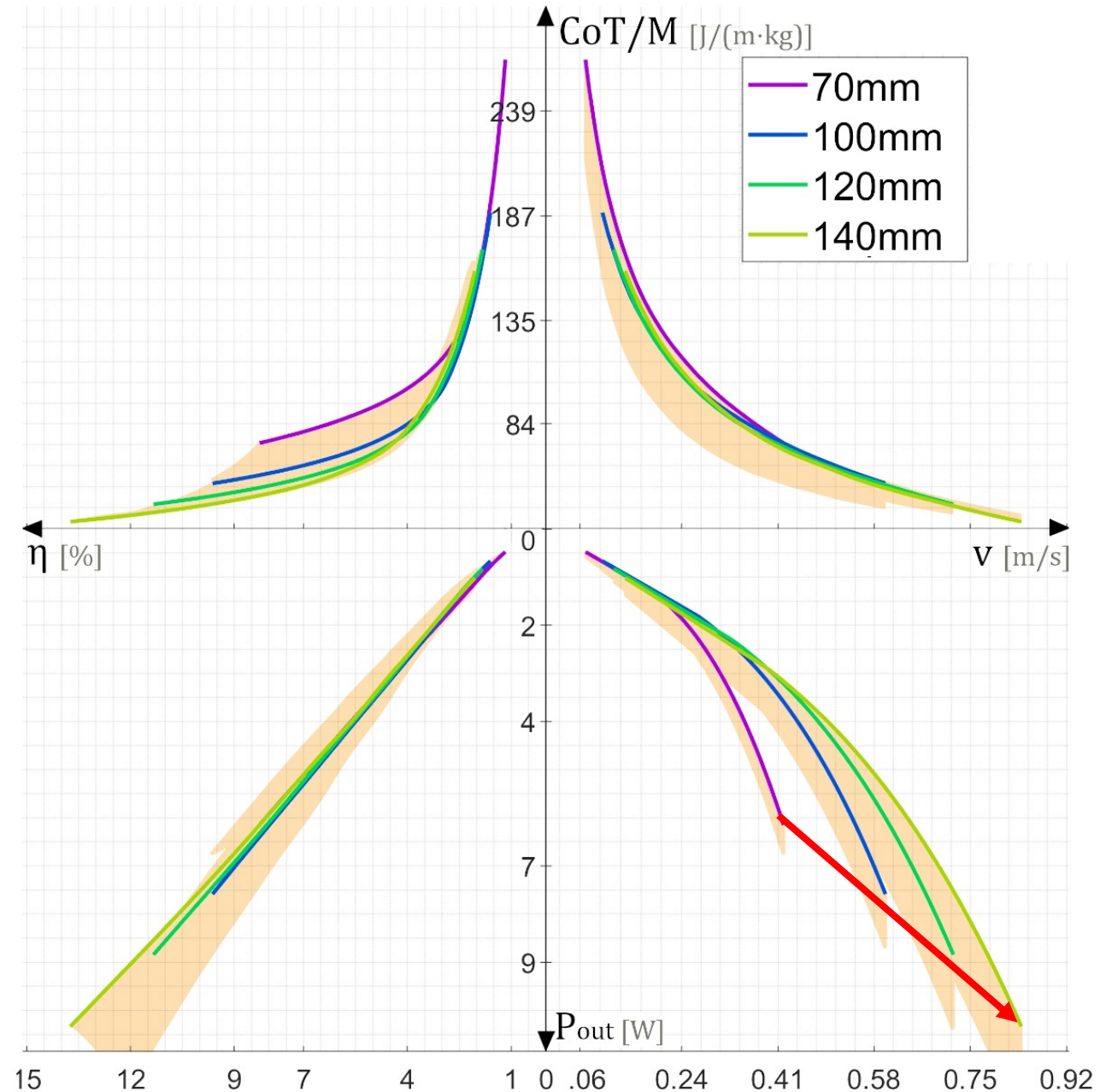
III. La mesure des performances d'un robot hexapode

Estimation du profil énergétique

Influence du rapport cyclique β
Influence de la longueur des pas L
Influence du patron de marche

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

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



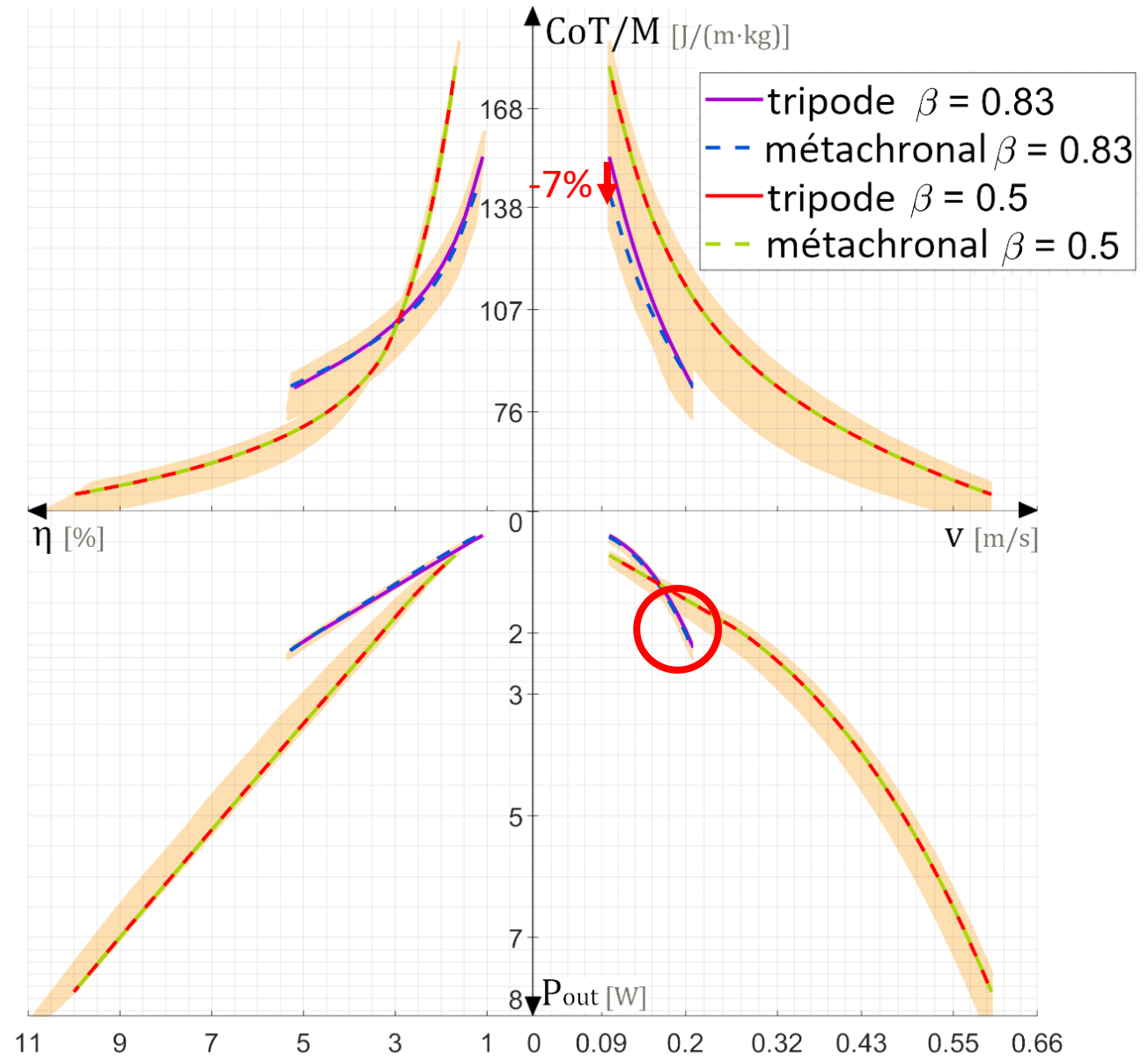
III. La mesure des performances d'un robot hexapode

Estimation du profil énergétique

Influence du rapport cyclique β
Influence de la longueur des pas L
Influence du patron de marche

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

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

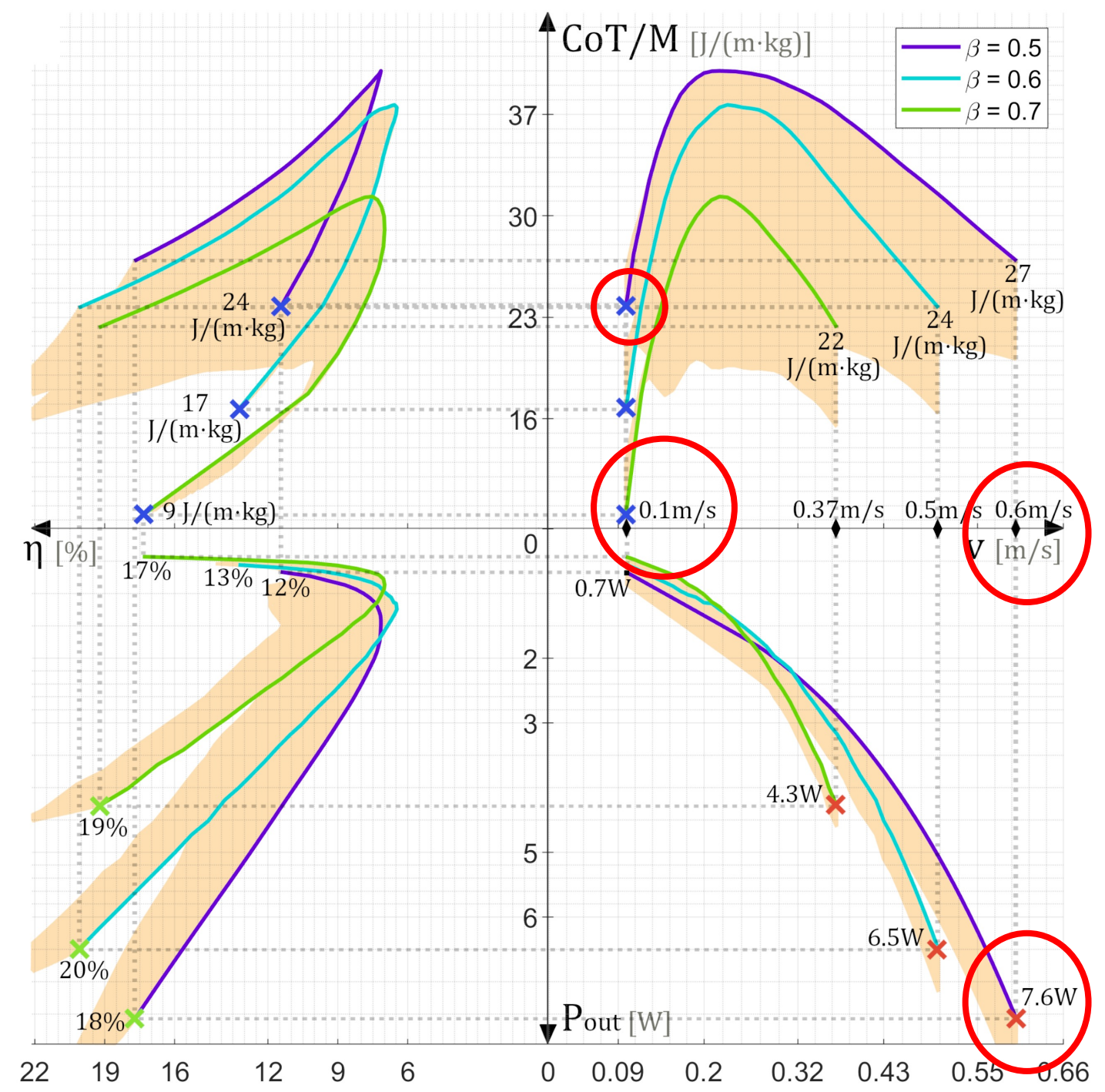


III. La mesure des performances d'un robot hexapode

Le profil énergétique optimal

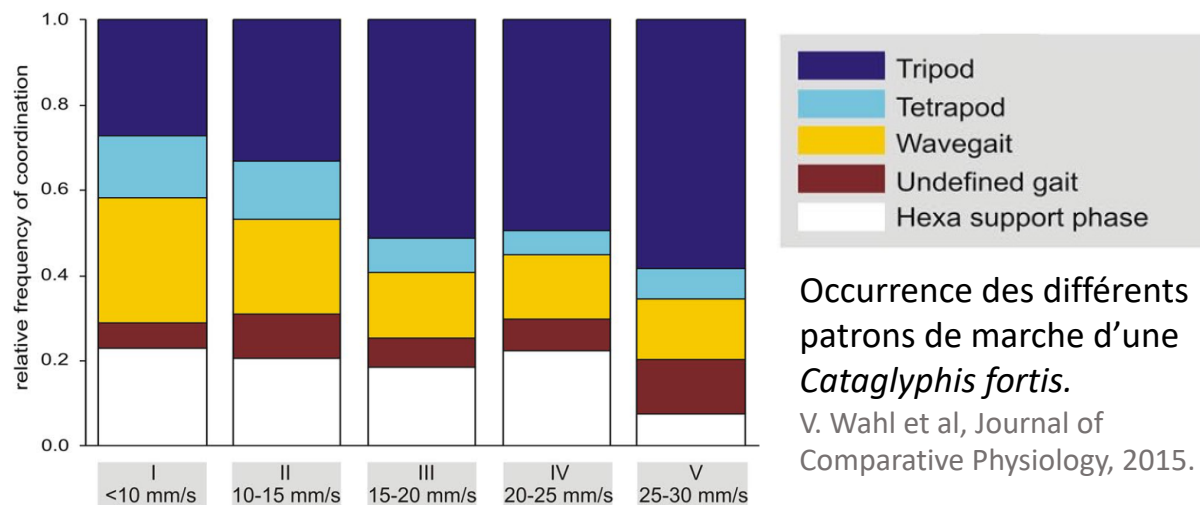
Description énergétique optimisé de l'hexapode dans le cas où il posséderait plusieurs points de fonctionnement. Cas de figure obtenu en réduisant la puissance consommée P_{in} de 36W.

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



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

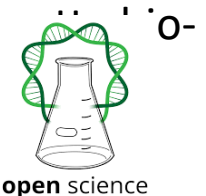
Indicateur de performance	AXLeg	Pohod15Leg
Masse [kg]	1,9 kg	2,5 kg
Fréquence [Hz]	0,37	0,31
Longueur des pas [mm]	106	115
Vitesse [cm/s]	7,8	7,1
Précision des pas [mm]	±3	±1
Propulsion inefficace	5 %	9 %
Puissance moy. [W]	28	81
Puissance moy. statique [W]	9	0
Résistance spécifique ϵ	19	47
Degré d'élévation 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 inspiré *Pohod15Leg* open source.
Projet open science
Coût < 3000 €
- 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



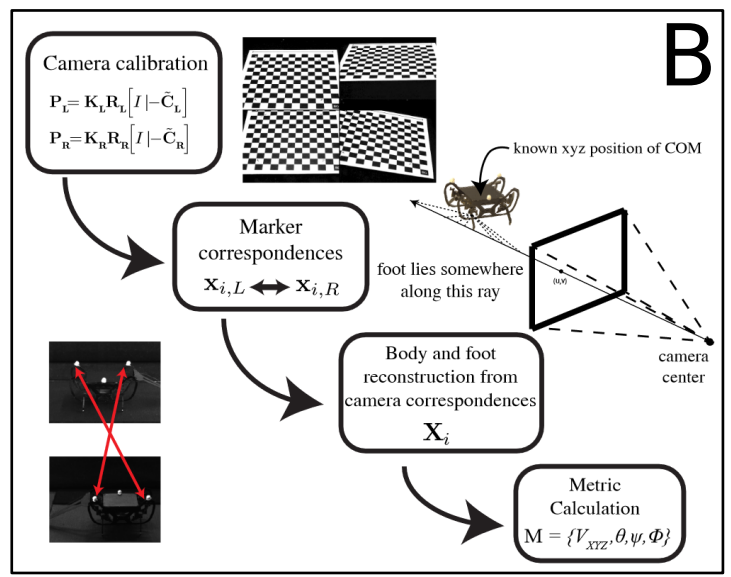
III. La mesure des performances d'un robot hexapode

Le banc de test MiMiC-Ant



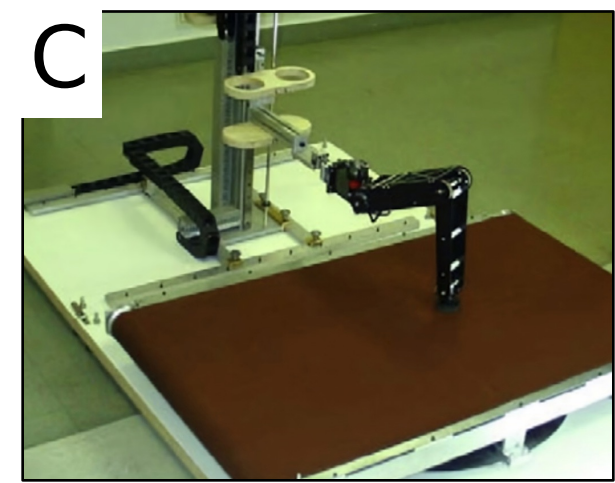
A Identification du modèle de la patte *SIL04 leg*.
E. Garcia et al, Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2023.

Exemples de bancs de test utilisés pour l'étude des robots à pattes et des insectes.

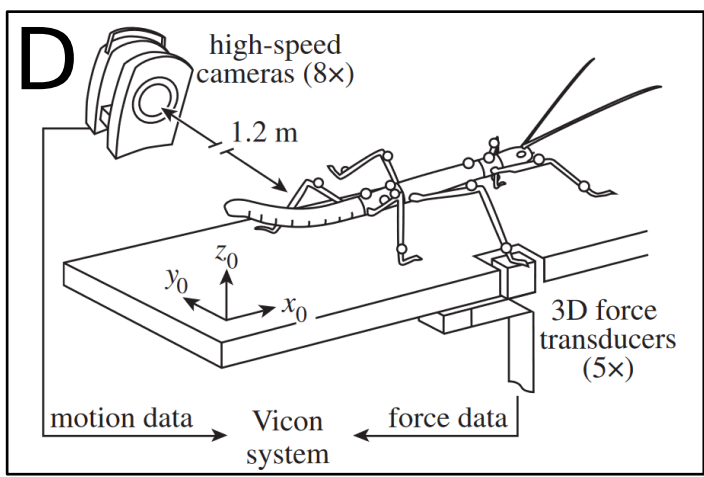


B Système de mesure de la cinématique du robot *HAMR*.
B. Goldberg et al, IROS, 2017.

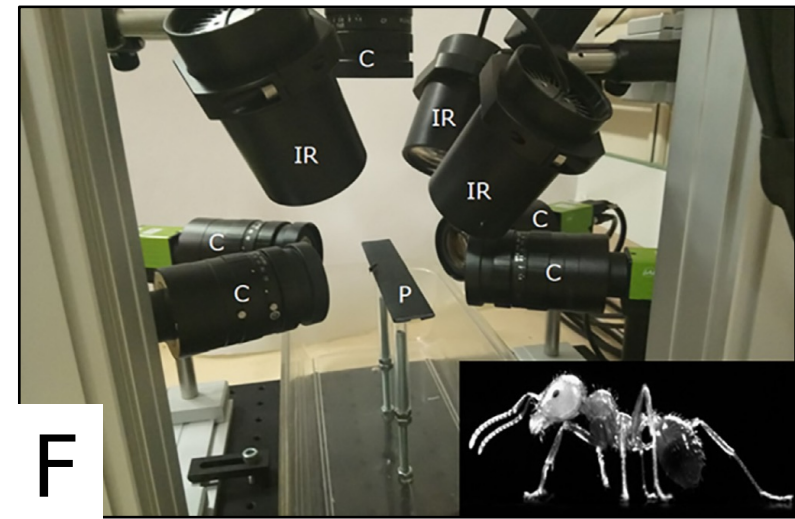
Banc de test pour le robot *Octavio*.
A. von Twickel et al, Robotics and Autonomous Systems, 2012.



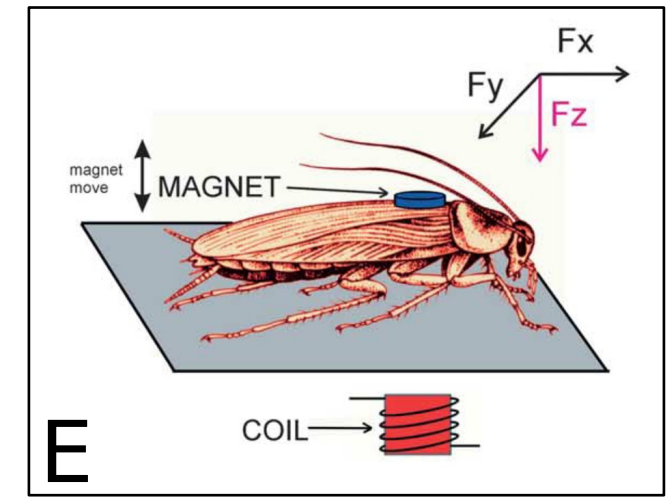
C



D Mesure de la cinématique de marche d'un phasme.
C. J. von Dallmann et al, Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2016.



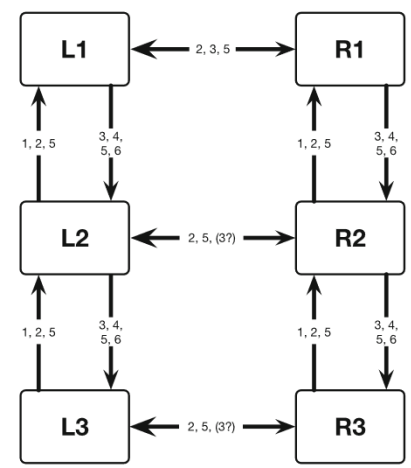
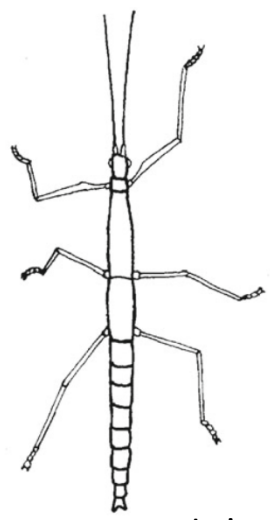
F Banc d'enregistrement de la cinématique de marche d'une fourmi.
S. Arroyave-Tobon et al, Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2022.



E Étude de l'influence de la charge sur le cafard.
S. Zill et al, Arthropod Structure & Development, 2004.

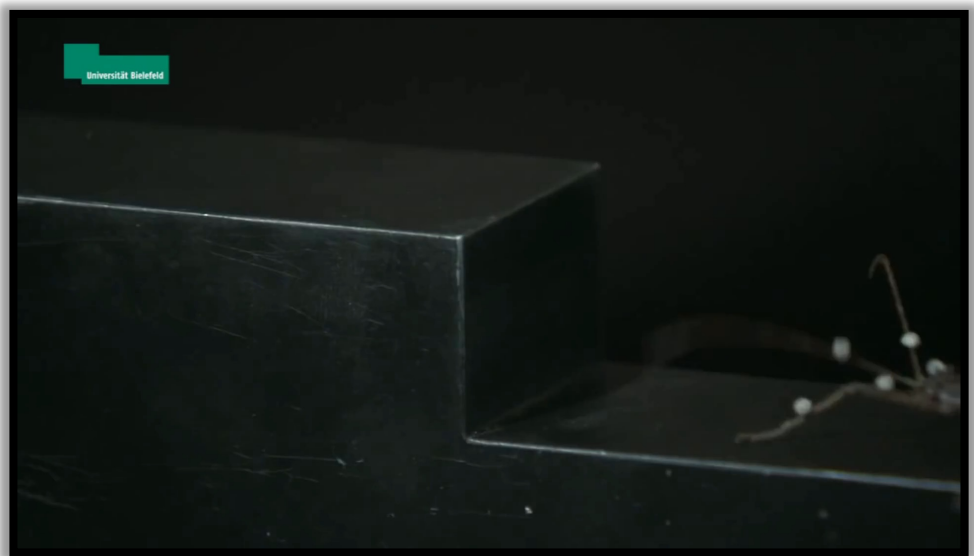
I. Analyse des robots hexapodes actuels

Les enjeux de la bio-robotique



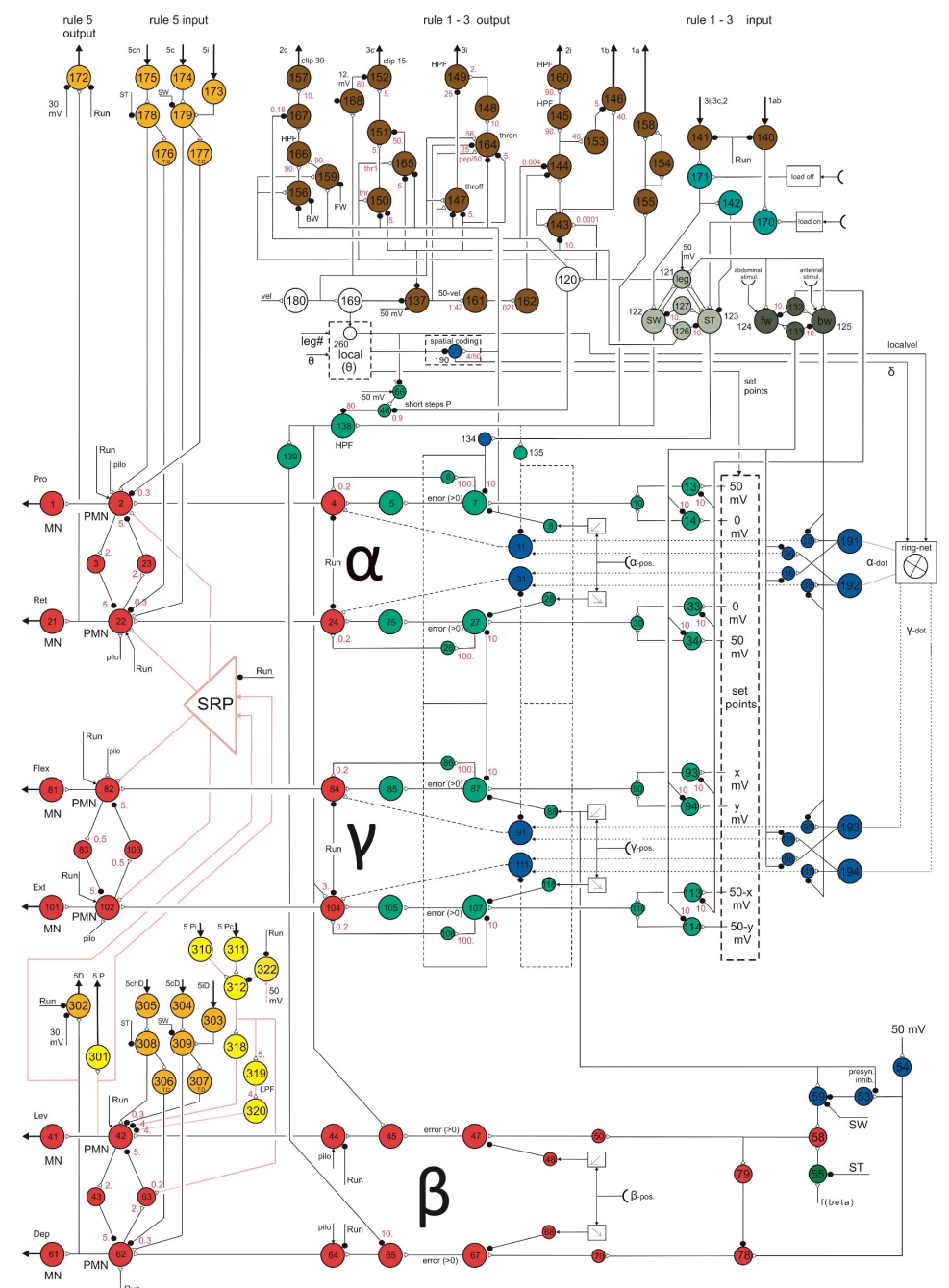
1. Return stroke inhibits start of return stroke
2. Start of power stroke excites start of return stroke
3. Caudal positions excite start of return stroke
4. Position influences position at end of return stroke ("targeting")
- 5a. Increased resistance increases force ("coactivation")
- 5b. Increased load prolongs power stroke
6. Treading-on-tarsus reflex

Lois de coordination des pattes d'un phasme.
V. Dürr et al, Arthropod Struct Dev, 2004



Robot HECTOR contrôlé par le Neuro-Walknet

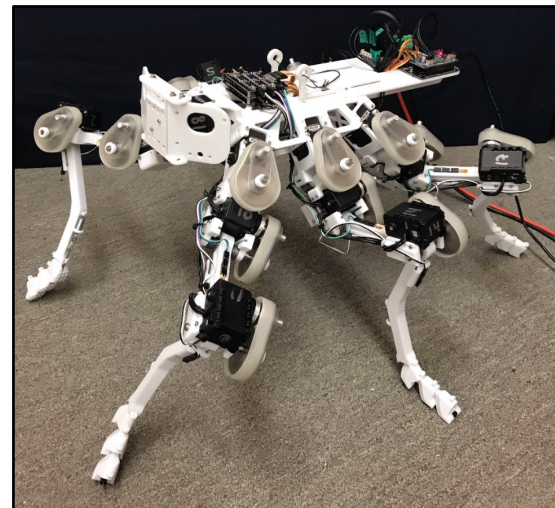
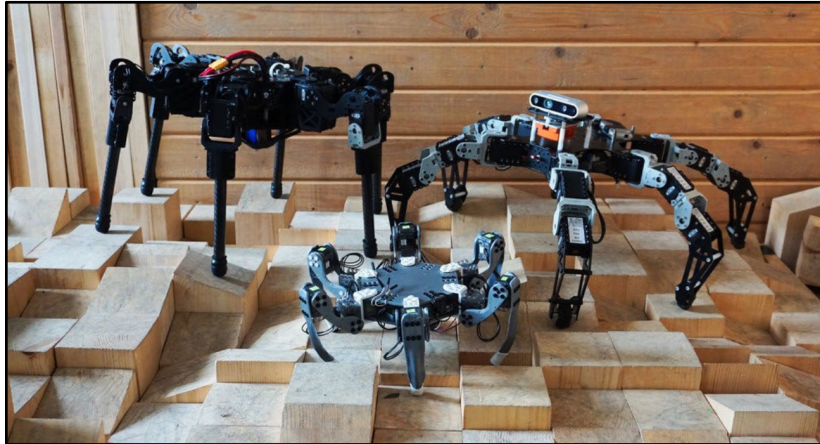
Structure générale du Neuro-Walknet Schilling et al, Biological Cybernetics, 2013



I. Analyse des robots hexapodes actuels

Les défauts des robots actuels

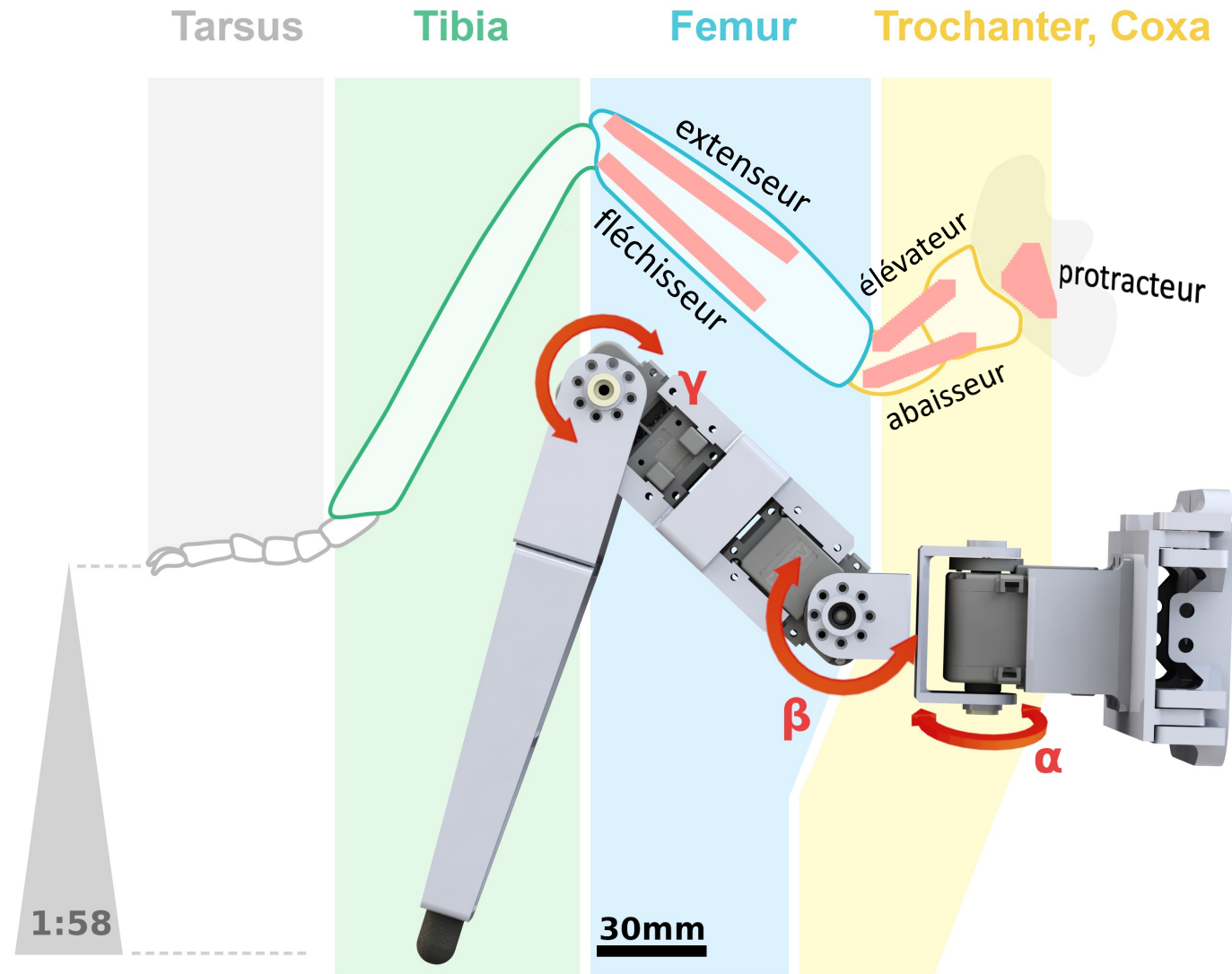
De gauche à droite : HAntR, hexapode à base de Dynamixel XL-320, PhantomX AX. P. Cizek et al, IEEE Access, 2021.



Drosophibot
C. Goldsmith et al, Biomimetic and Biohybrid Systems, 2019.



MORF
M. Thor et P. Manoonpong, IEEE Robotics and Automation Letters, 2019.



Structure mécanique d'une patte conventionnelle AXLeg a trois degrés de liberté, inspirée de la fourmi du désert *Cataglyphis fortis* a l'échelle 1:58

III. La mesure des performances d'un robot hexapode

Qu'est-ce qu'un robot performant ?

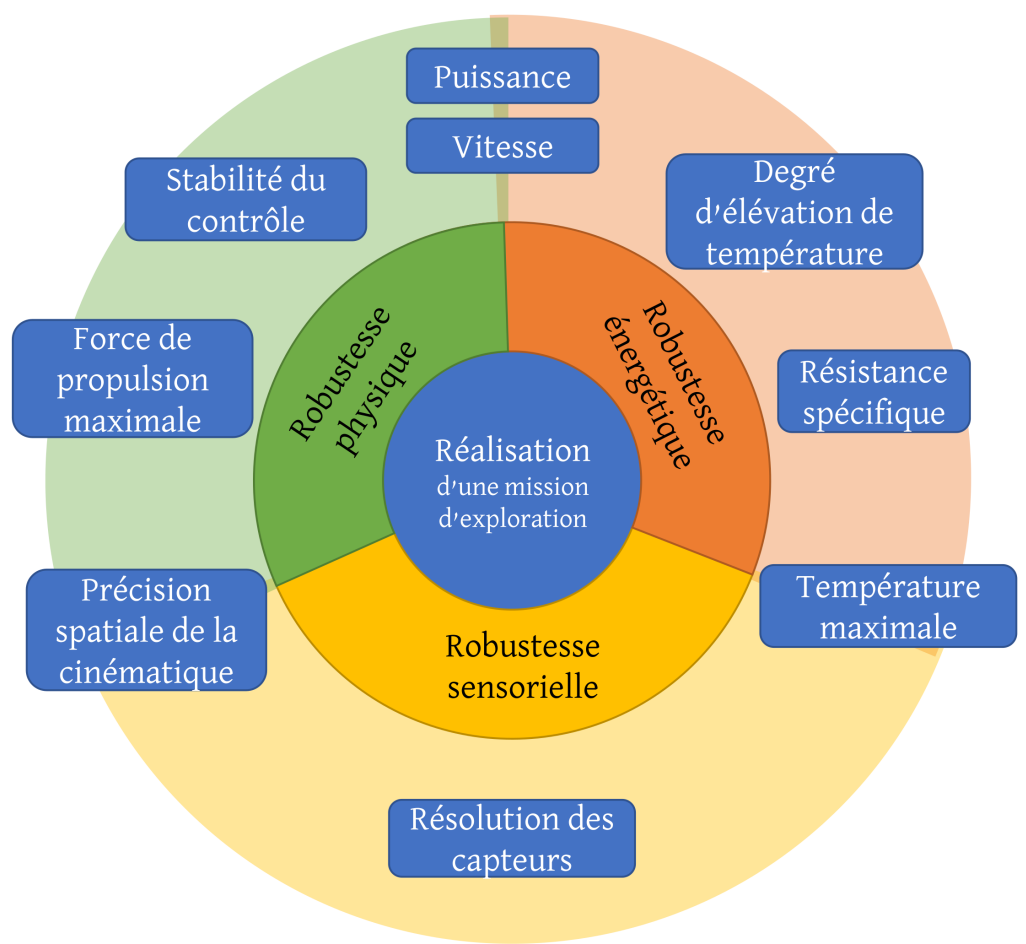
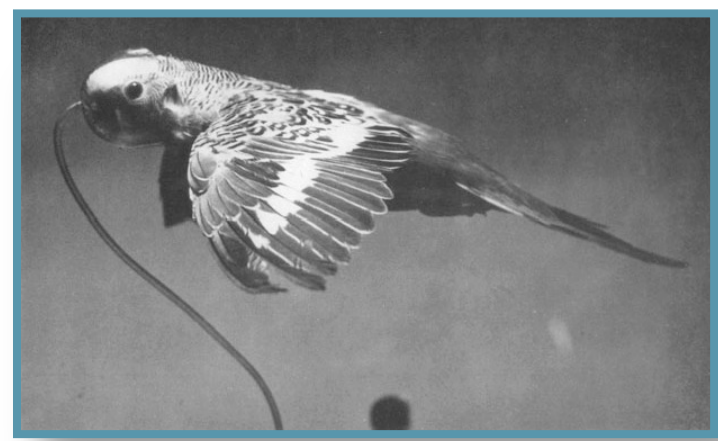
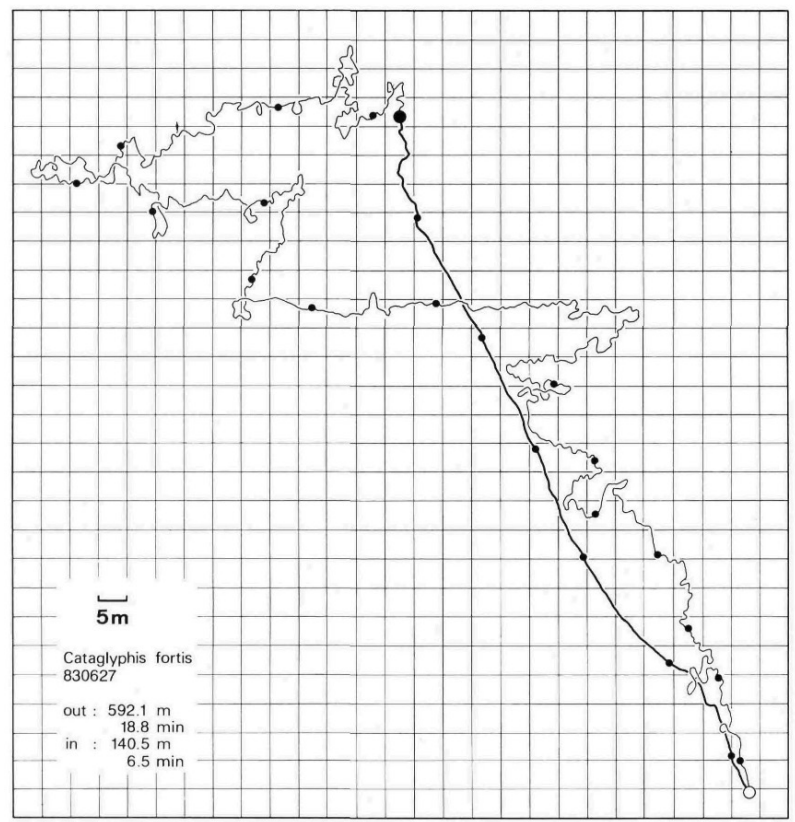


Diagramme des indicateurs de performance d'un hexapode dans le cadre d'une mission d'exploration.

Chemin parcouru par une fourmi *Cataglyphis fortis* au cours de la recherche de nourriture.
R. Wehner, Ethology Ecology & Evolution, 1990.

Comparer les performances du robot à l'animal ?



Mesure du flux d'oxygène par respirométrie chez la perruche
M. Bundle, Journal of Experimental, 2009.

I. Analyse des robots hexapodes actuels

Les enjeux de la biorobotique

Pourquoi les fourmis ?



Grande diversité ≈ 13,000 espèces



Arboreal ants

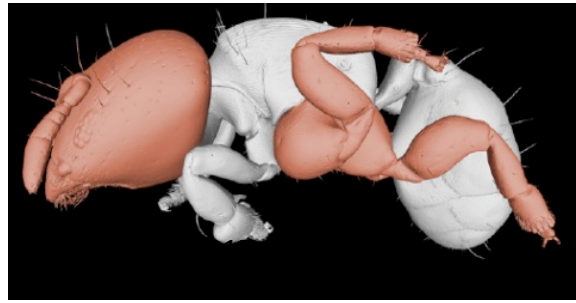


Ground dwelling ants

Grande diversité de terrains



Cephalotes



Melissotarsus

Grande diversité de la morphologie



Transport de charge individuel et collectif

I. Analyse des robots hexapodes actuels

Quelles sont les particularités de AntBot ?

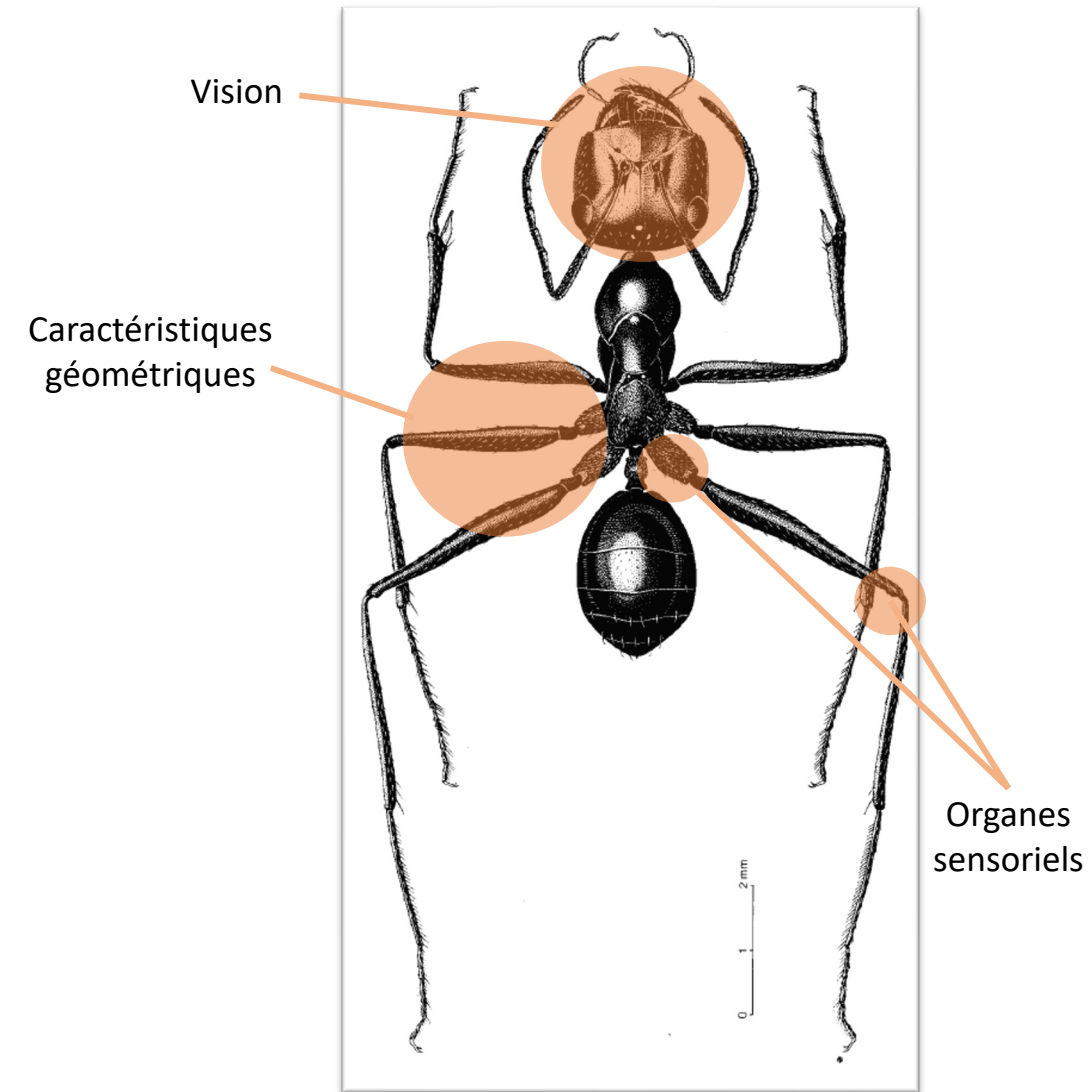
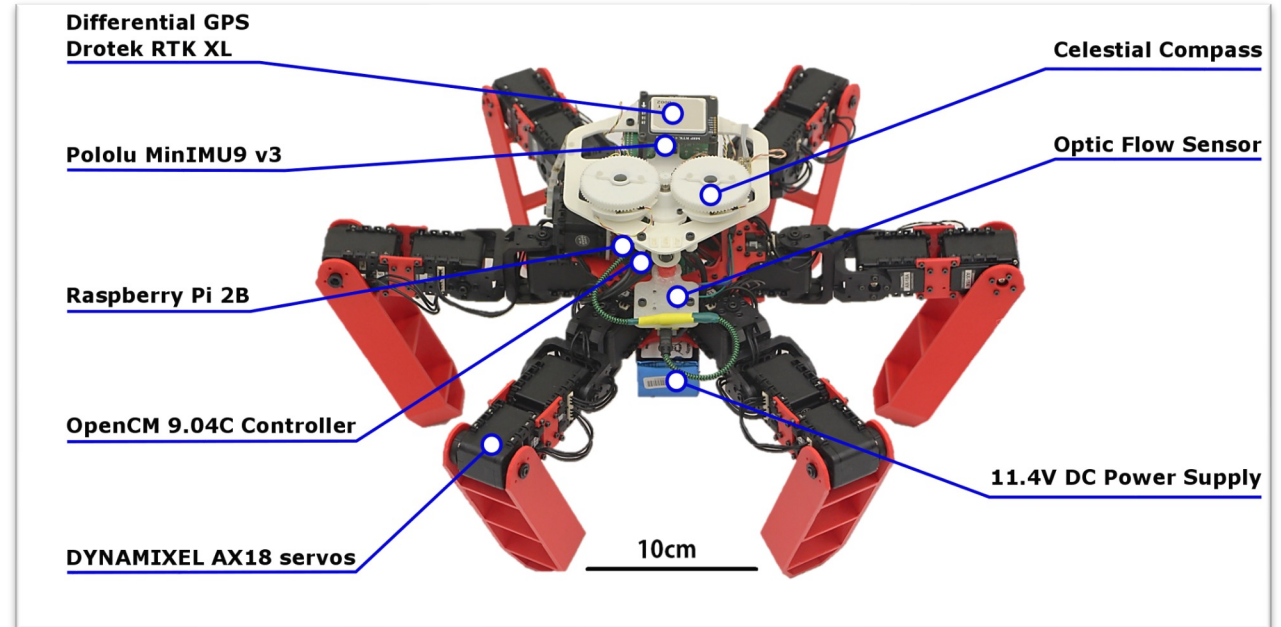


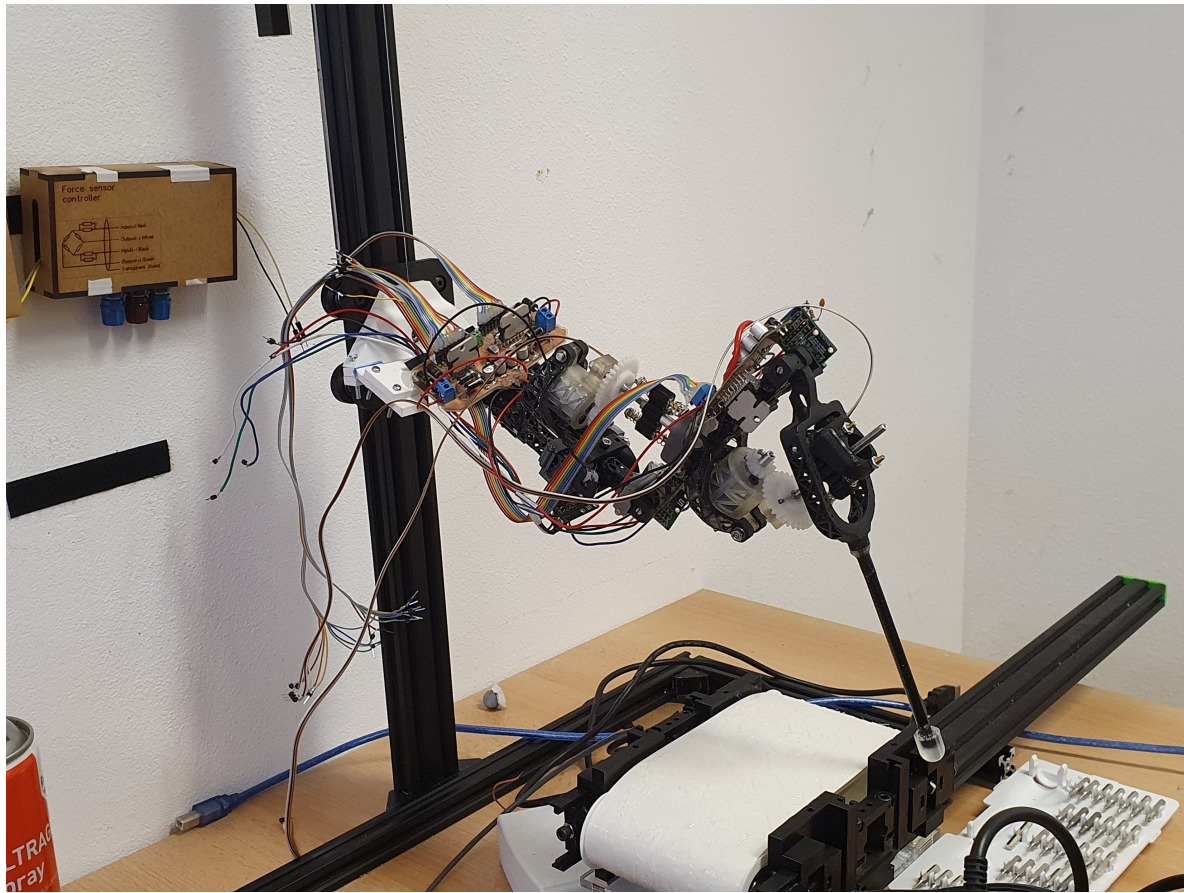
Schéma d'une fourmi *Cataglyphis fortis*
Wehner Rüdiger, *Senckenbergiana biol*, 1983.

Robot bio-inspiré

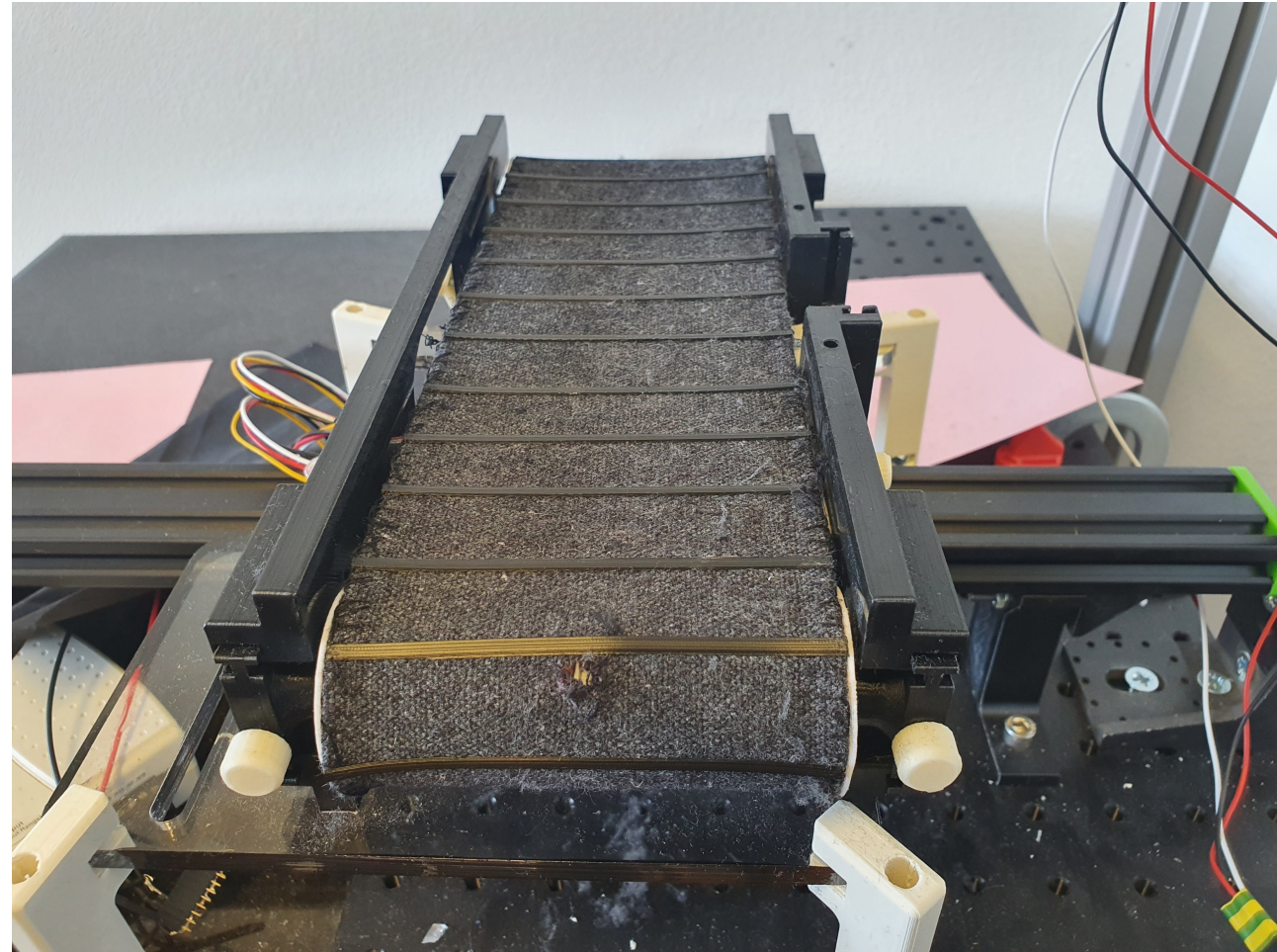


AntBot

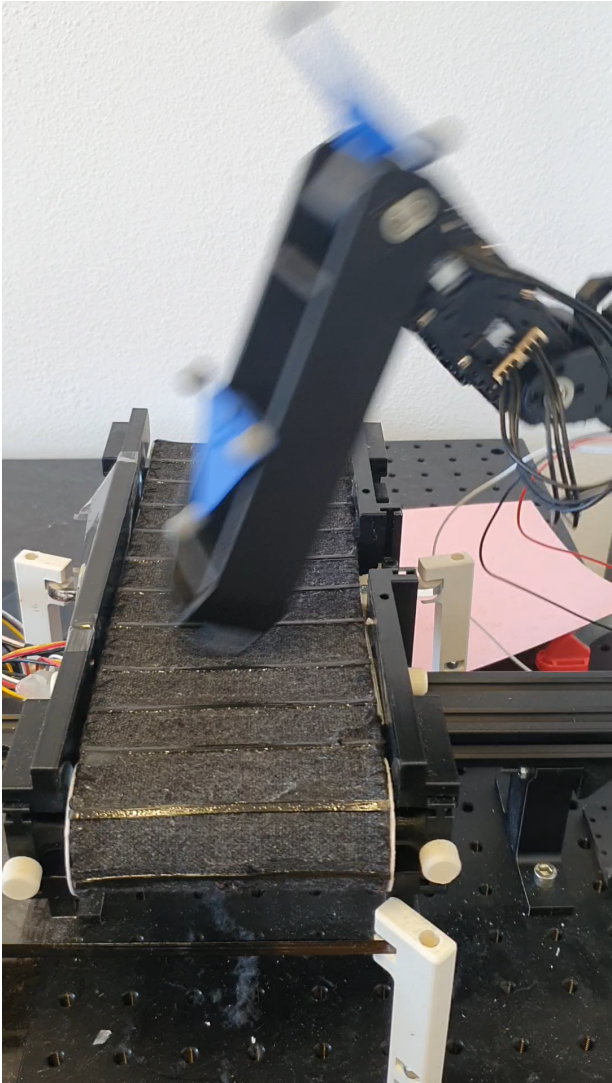
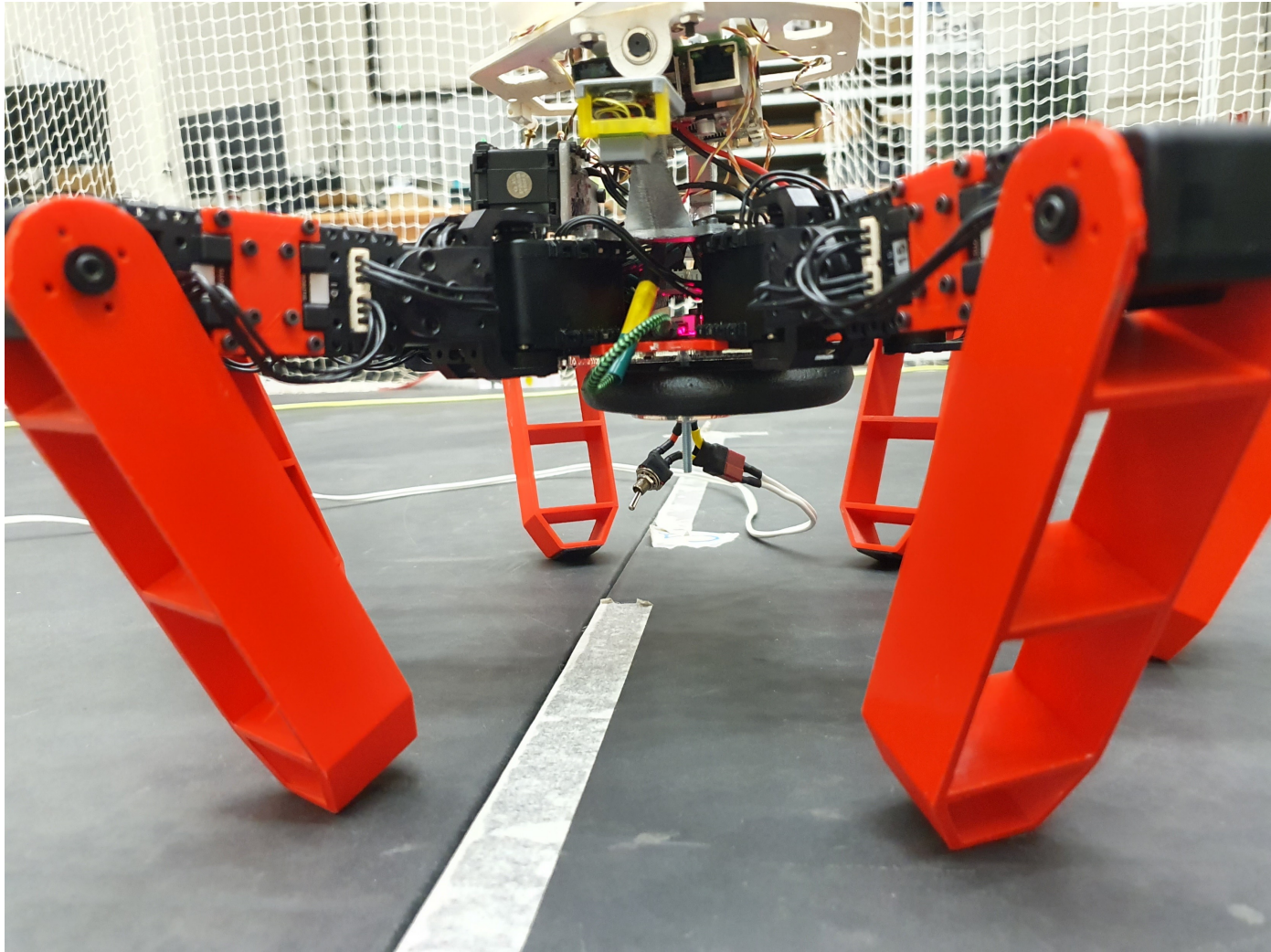
J. Dupeyroux et al, *Science Robotics*, 2019.



Photographie
de la patte
Pohod13Leg



Tapis de course du banc MiMiC-Ant



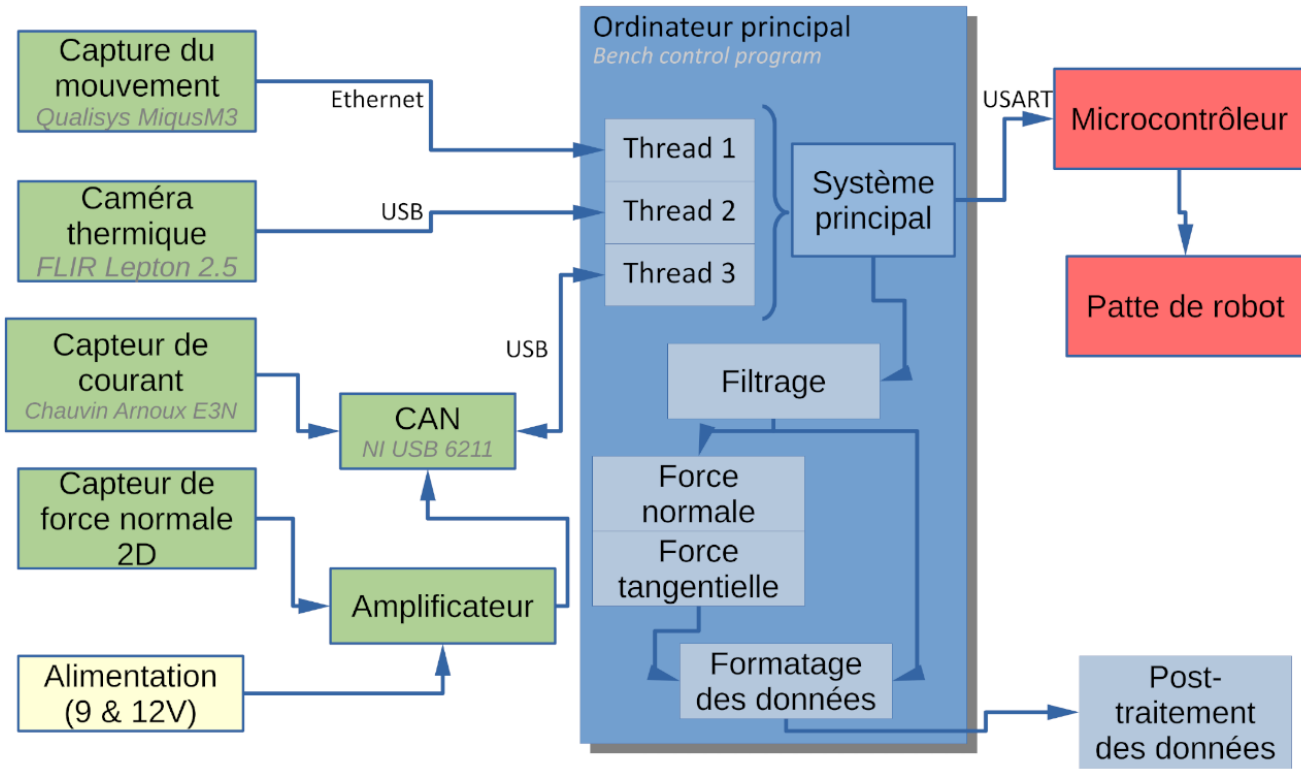
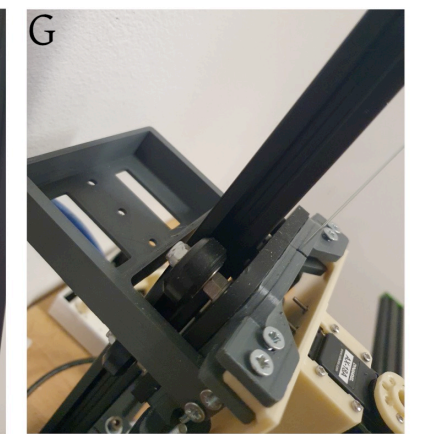
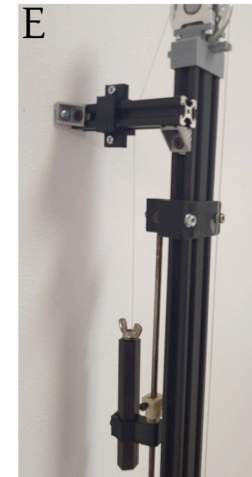
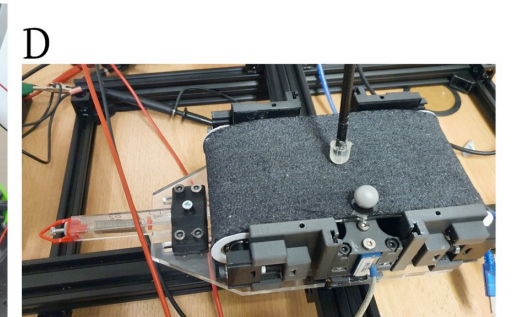
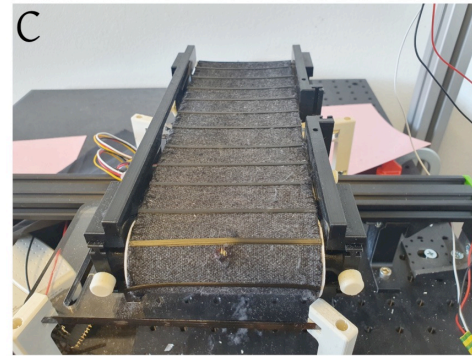
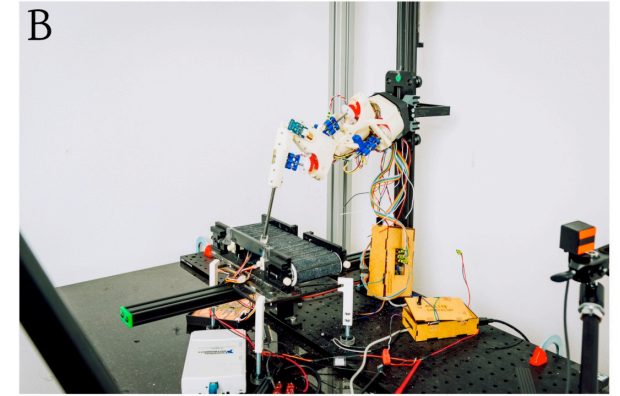
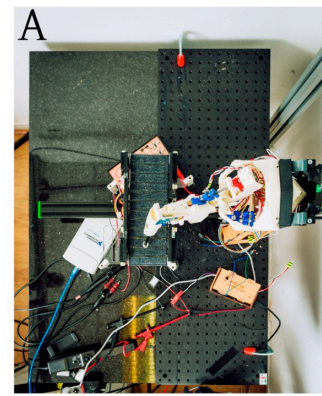
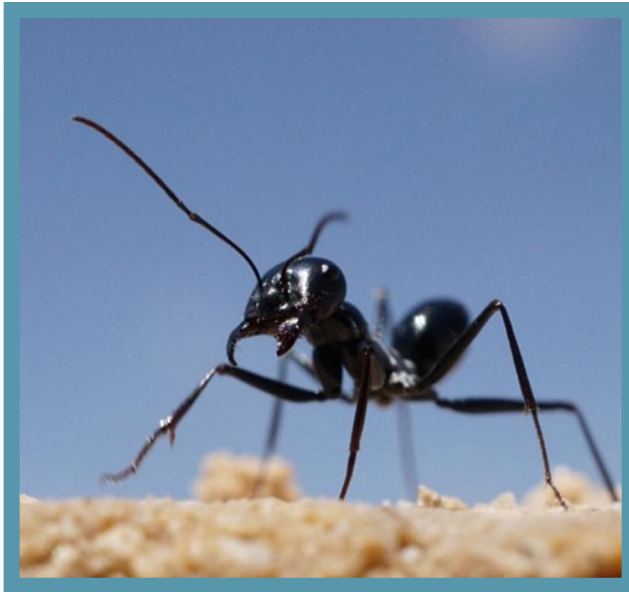


Diagramme structurel du banc de test

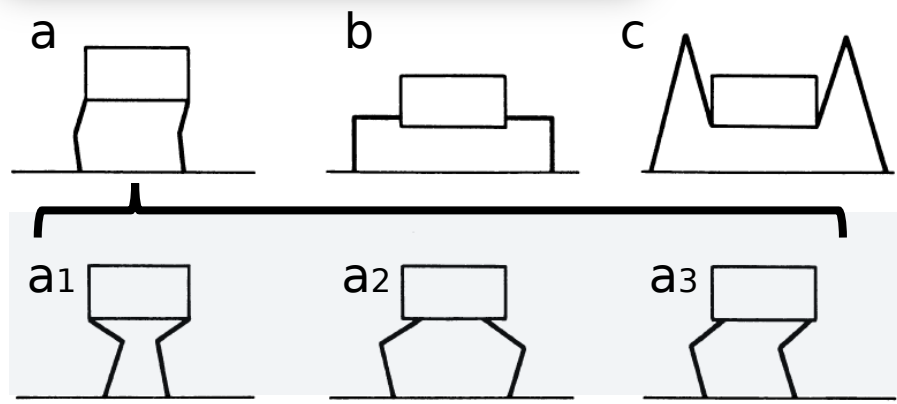


II. Les étapes de fabrication d'un robot bio-inspiré

Définition de la géométrie de la patte



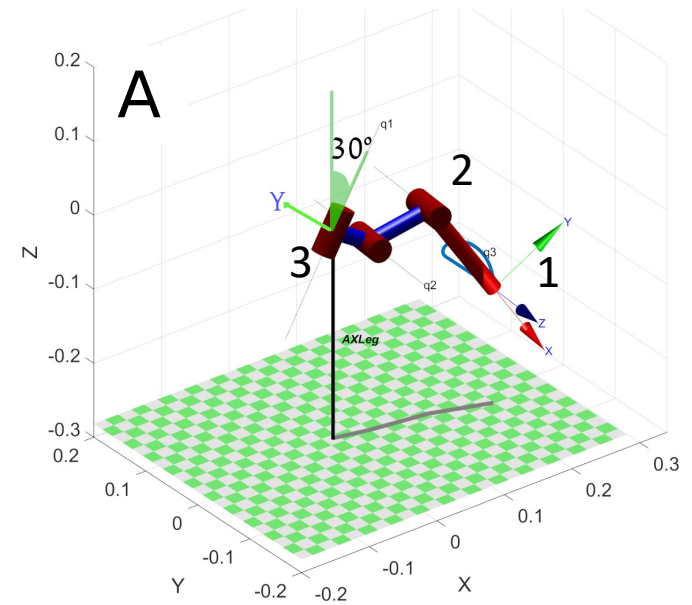
Cataglyphis fortis
R. Huber, M. Knaden,
Current Biology, 2017.



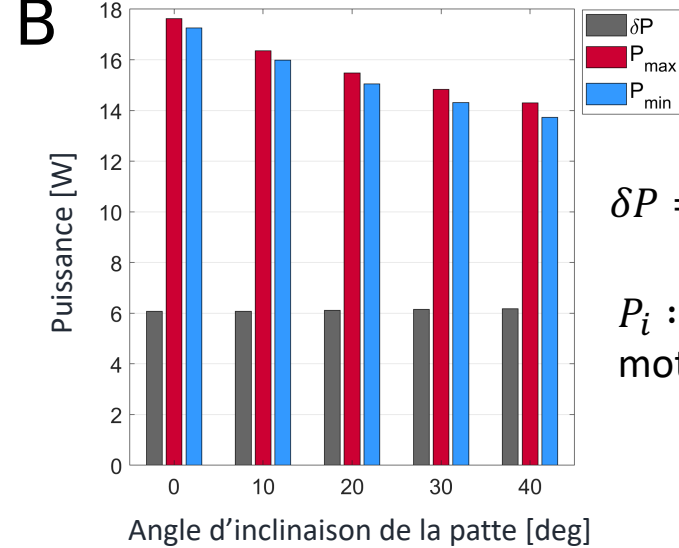
Différentes postures adoptées par les animaux

D. J. Todd, Walking Machines: An Introduction to Legged Robots, 1985.

Influence de l'inclinaison de la patte sur la sollicitation des moteurs d'une patte.



Durée de propulsion de 70 %

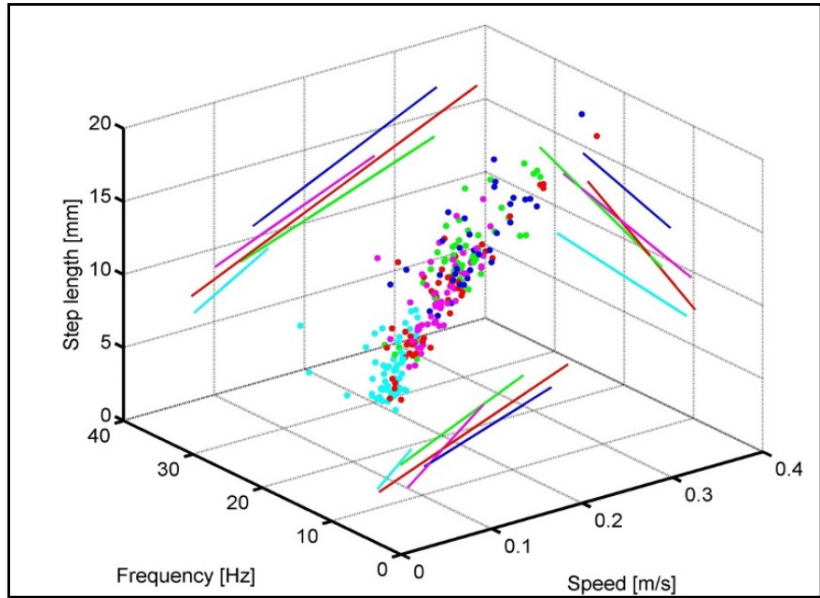


$$\delta P = |P_1 - P_2| + |P_1 - P_3| + |P_2 - P_3|$$

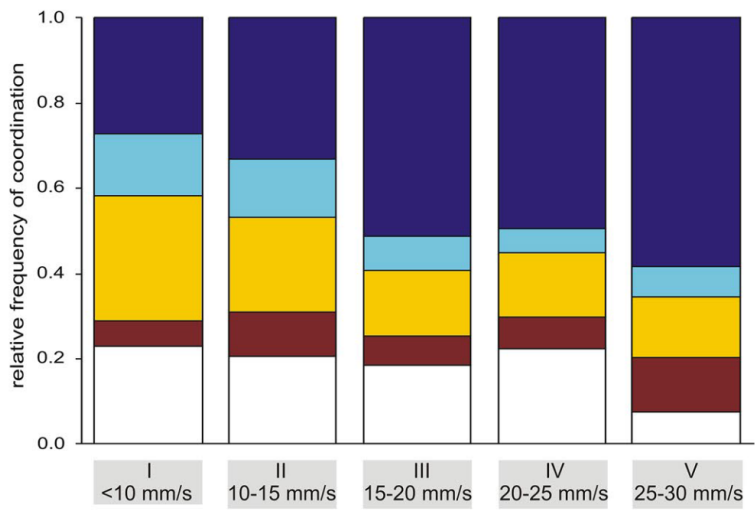
P_i : puissance mécanique du moteur i , avec $i \in \llbracket 1, 3 \rrbracket$

III. La mesure des performances d'un robot hexapode

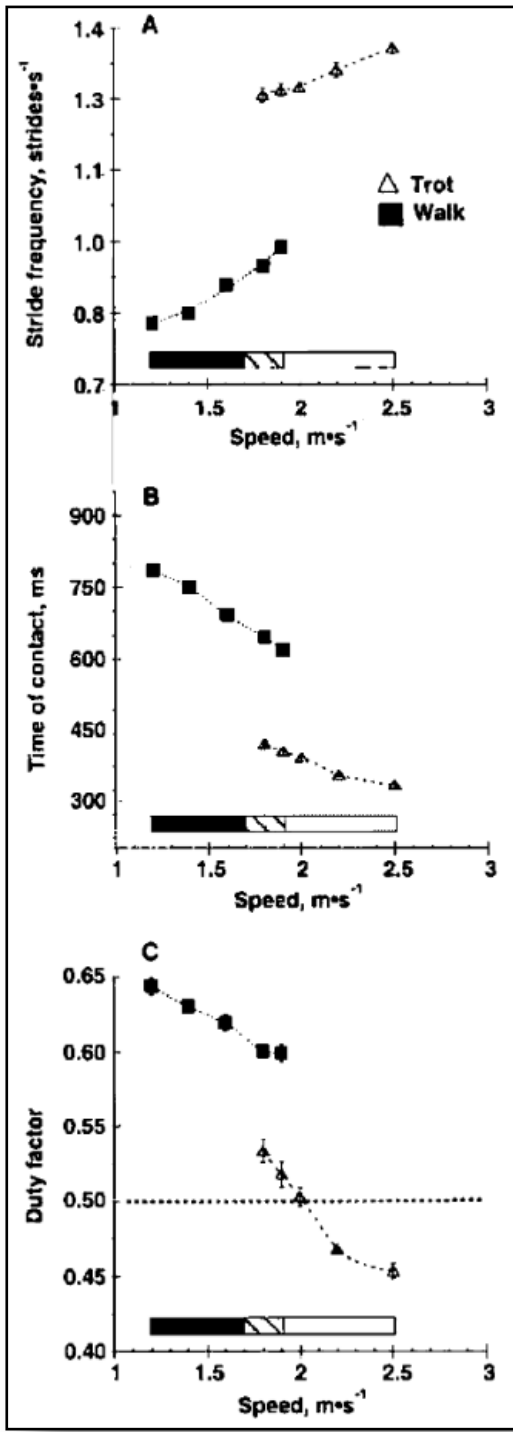
Adaptation de la marche chez les animaux



Relation entre vitesse, longueur des pas, fréquence de marche, pour différentes inclinaisons chez la fourmi *Cataglyphis fortis*. (-60°, -30°, 0°, 30°, 60°).
T. Seidl et R. Wehner, *Frontiers in Zoology*, 2008.



Occurrence des différents patrons de marche d'une *Cataglyphis fortis*.
V. Wahl et al, *Journal of Comparative Physiology*, 2015.



Variation des paramètres de locomotion du cheval. D. F. Hoyt et al, *Journal of Experimental Zoology Part A: Comparative Experimental Biology*, 2006.

Grandeur [unité SI]	Facteur d'échelle
Longueur [m]	α
Masse [kg]	α^3
Temps [s]	$\sqrt{\alpha}$
Fréquence [Hz]	$1/\sqrt{\alpha}$
Vitesse [m/s]	$\sqrt{\alpha}$
Puissance [$kg \cdot m^2/s$]	$\sqrt{\alpha^7}$
Raideur [N/m]	α^2
Amortissement [kg/s]	$\sqrt{\alpha^5}$

TABLEAU 1.2. – Tableau des relations allométriques. La première section présente les grandeurs élémentaires, la seconde section présente les grandeurs composées.

Liaison	$R1$ [deg]	$R2$ [deg]	$R3$ [deg]	$R2_{marche}$ [deg]	Pohod15Leg [deg]
ThC	80	100	105	26	68
CTr	180	120	130	31	-
TrF	130	180	120	53	43
FTi	160	165	190	74	77

TABLEAU 2.3. – Amplitudes des articulations d'une patte de fourmi en flexion. Données extraites de ARROYAVE-TOBON, DRAPIN, KANIEWSKI et al. [158], 2022. $R1$ est la patte avant droite, $R2$ la patte du milieu et $R3$ la patte arrière. ThC : thorax-coxa, CTr : coxa-trochanter, TrF : trochanter-fémur, FTi : fémur-tibia. $R2_{marche}$ représente les angles extrêmes de la patte du milieu lors d'un cycle de marche.

Segment	$R1$ [mm]	$R2$ [mm]	$R3$ [mm]	Pohod15Leg [mm] (valeur réelle)
Coxa-trochanter	1	0,8	1,3	24 (27)
Fémur	2,7	3,4	4,2	102 (117)
Tibia	3,9	5	6,9	180 (206)
Tarse	0,9	1	1,4	-

TABLEAU 2.2. – Table des relations d'échelle entre la patte de la fourmi *Cataglyphis fortis* ouvrière [162] et de la patte *Pohod15Leg*. $R1$ est la patte avant droite, $R2$ la patte du milieu et $R3$ la patte arrière. La patte du robot est calculée à partir de $R2$, avec un facteur d'échelle 1 :30. Le tibia du robot est égal à la somme du tibia et du tarse de la fourmi, afin de compenser la perte de hauteur du corps. Entre parenthèses, les valeurs réelles utilisées pour confectionner le robot.

III. La mesure des performances d'un robot hexapode

Estimation du profil énergétique

Influence du rapport cyclique β
Influence de la longueur des pas L
Influence du patron de marche
Influence du nombre de pattes

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

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

