

# Perception Avancée et Robotique Mobile

UPJV, Département EEA

Master 2 3EA, EC31

Parcours RoVA

**Fabio MORBIDI**

Laboratoire MIS

Équipe Perception Robotique

E-mail: [fabio.morbidi@u-picardie.fr](mailto:fabio.morbidi@u-picardie.fr)

CM, TD: Lundi et Mardi 13h30-16h00, salle CURI 8

TP: Lundi 13h30-16h30, salle TP204

AU 2025-2026



Electronique

Energie Electrique

Automatique



# Ch. 2: Robotique Mobile

- Petit historique

**Partie 1**

- Systèmes, locomotions, applications

**Partie 2**

- Marché mondial et besoins technologiques

**Partie 3**

- Effecteurs et actionneurs

**Partie 4**

- Robots mobiles à jambes, à roues et aériens

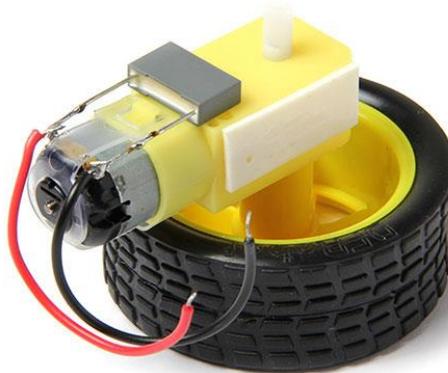
**Partie 5**

# Effecteurs et actionneurs

- Un **effecteur** est tout dispositif (contrôlé par un robot) pouvant *affecter l'environnement*
  - Grande variété d'effecteurs : roues, jambes, hélices, préhenseurs, etc.
- Un **actionneur** est le mécanisme qui permet à l'effecteur d'exécuter une action
  - Les actionneurs incluent typiquement les moteurs électriques ou les systèmes hydrauliques/pneumatiques

# Moteur électrique à courant continu

- Le plus répandu en robotique mobile
- Simple (à aimant permanent et balais), peu cher et facile d'utilisation
- Grande variété de tailles (adapté à la taille du robot et à la tâche)
- Nécessite plus d'énergie que l'électronique :
  - Par ex. 5 mA pour le microprocesseur 68HC11 vs 100 mA pour un "petit" moteur à courant continu
- Carte d'alimentation séparée requise



# Moteur à courant continu

## Tension

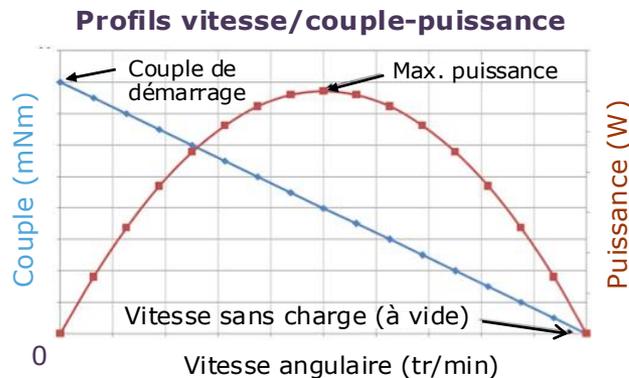
- Tension nominale : fonctionnement « optimal »
  - Si tension *faible* : fonctionnement mais puissance faible
  - Si tension *élevé* : dans certains cas, plus puissance en sortie mais durée de vie moindre !

## Courant

- Si tension *constante*, un moteur à courant continu fournit un courant proportionnel au travail réalisé
  - Ex. robot poussant un objet → robot se déplaçant librement (résistance au mouvement du moteur introduite par l'obstacle)

## Couple

- Proportionnel au courant efficace



Remarque :  
Le couple de démarrage est le couple moteur à vitesse nulle ("stall torque")

# Moteur à courant continu

## Vitesse

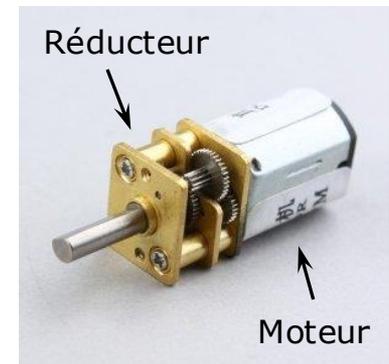
- Vitesse angulaire (à vide) des moteurs à courant continu : de l'ordre de 3000 à 9000 tr/min (tours par minute)
- Grande vitesse mais *couple faible*
- À l'inverse, les robots mobiles nécessitent un couple important et une vitesse modérée (déplacement dans un environnement limité)

## Réducteurs

- Train d'engrenages : contrôle de vitesse/couple
  - Si rayon engrenage de sortie > rayon engrenage d'entrée :  
couple ↑, vitesse ↓



- Si rayon engrenage de sortie < rayon engrenage d'entrée :  
couple ↓, vitesse ↑



# Moteur à courant continu

## Réducteurs



Vélo de José Meiffret : plateau de 130 dents !  
Record de vitesse : 204.778 km/h (19 juillet 1962)

# Moteur à courant continu

## Réducteurs

- La vitesse  $v$  au point de contact entre les engrenages A et B (point d'engrènement) est identique:

$$v = r_A \omega_A = r_B \omega_B$$

où

$r_A, r_B$  rayon des engrenages A et B

$\omega_A, \omega_B$  vitesse angulaire des engrenages A et B  
(en rad/s, tr/min, etc.)

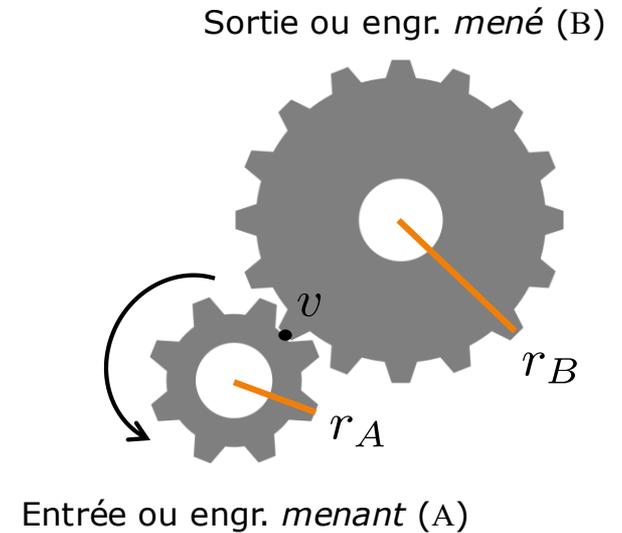
- Par conséquent:

$$i \triangleq \frac{\omega_A}{\omega_B} = \frac{r_B}{r_A} = \frac{N_B}{N_A}$$

où

$i$  rapport de réduction (adimensionnel)

$N_A, N_B$  nombre de dents des engrenages A et B



Engrenages à  
axes parallèles

# Moteur à courant continu

## Réducteurs

Rapport de réduction d'un train de  $n$  engrenages :

$$i_{\text{tot}} = i_1 i_2 i_3 \cdots i_n$$

**Attention** : Le rapport de réduction d'un engrenage noté  $i$  est l'*inverse* du *rapport de transmission* noté  $R$ , à savoir  $R = 1/i$

Si  $R > 1$  on parle de *multiplicateur* et si  $R < 1$  on parle de *réducteur*

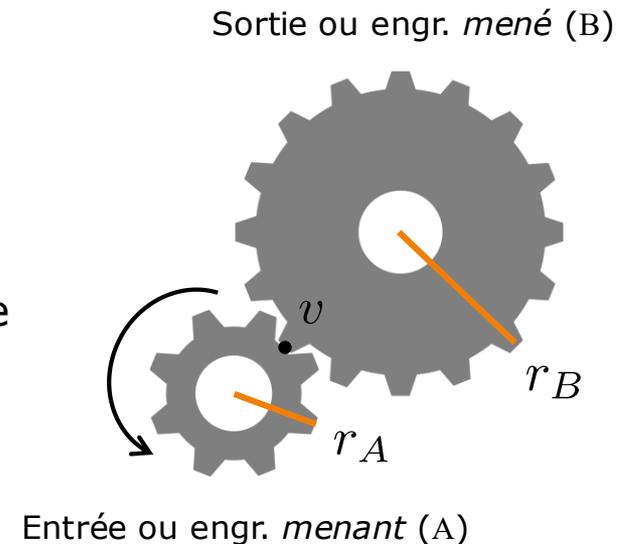
Remarque : Nous avons aussi l'identité suivante

$$\frac{N_B}{N_A} = \frac{T_B}{T_A}$$

où

$T_A, T_B$  couple des engrenages A et B

Cela montre que si B a plus de dents que A, alors le couple d'entrée est amplifié. Vice versa, si A a plus de dents que B, le couple d'entrée est réduit



# Alimentation : batteries



Paramètres à considérer :

- Rechargeabilité
- Densité d'énergie (DE) [Wh/L] et énergie spécifique [Wh/kg]
- Capacité électrique (quantité de charge électrique que la batterie peut fournir à la tension nominale) [mAh] ou [Ah]
- Tension [V]
- Résistance interne (RI) [ $\Omega$ ]
- Taux de décharge (C-rate)
- Durée de vie (nombre de cycles de décharge/recharge)
- Dépendance à la température, humidité, etc.

C-rate	Temps
25C	2.4 min.
5C	12 min.
2C	30 min.
1C	1 h
0.5C ou C/2	2 h
0.2C ou C/5	5 h
0.1C ou C/10	10 h
0.05C ou C/20	20 h

Décharge de batteries avec une capacité de 1 Ah

# Alimentation : batteries

La batterie "idéale" :

- Très haute densité d'énergie
- Maintien d'une tension constante durant la décharge
- Faible résistance interne
- Durée de vie non limitée (ou au moins facilement prévisible)
- Rechargeable
- Faible coût unitaire



Difficultés :

- Autonomie
- Miniaturisation, poids
- Régulateurs (tension maintenue constante, mais l'énergie décroît)
- Isolation (capacités)

# Types de batteries et leurs caractéristiques

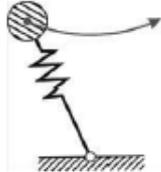
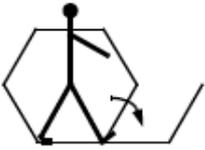
Chimie	Recharge	DE [Wh/L]	Tension [V]	RI [ $\Omega$ ]
<i>Alkaline</i>	No	130	1.5	0.1
<i>Acide de plomb</i>	Oui	40	2.0	0.006
<i>Mercure</i>	No	120	1.35	10
<i>NiCd</i>	Oui	38	1.2	0.009
<i>NiMH</i>	Oui	57	1.3	
<i>Argent</i>	No	130	1.6	10
<i>Zinc-Air</i>	No	310	1.4	
<i>CharbonZn</i>	No	75	1.5	
<i>Lithium</i>	No	300	3.0	0.3
<i>Lithium-ion (Li-ion)</i>	Oui	250-690	3.2-3.85	0.01-0.05
<i>Lithium-ion polymère</i>	Oui	250-730	3.3-3.7	
<i>Lithium-soufre (Li-S)</i>	Oui	550	3	

- *Alkaline*: plus courante
- *Acide de plomb*: large variété de tailles
- *NiCd*: faible RI, largement disponible
- *Hydruure métallique de nickel (NiMH)*: meilleure que NiCd, chère
- *Zinc-Air*: haute DE, peu disponible
- *Lithium*: excellent, coût unitaire élevé
- *Lithium-ion polymère (LiPo)*: haute DE, taux de décharge jusqu'à 50C (modèles RC, quadrirotors). Entre 1 et 6 cellules (1S-6S), capacité par cellule : 10 mAh – 12 Ah

# **La locomotion : introduction**

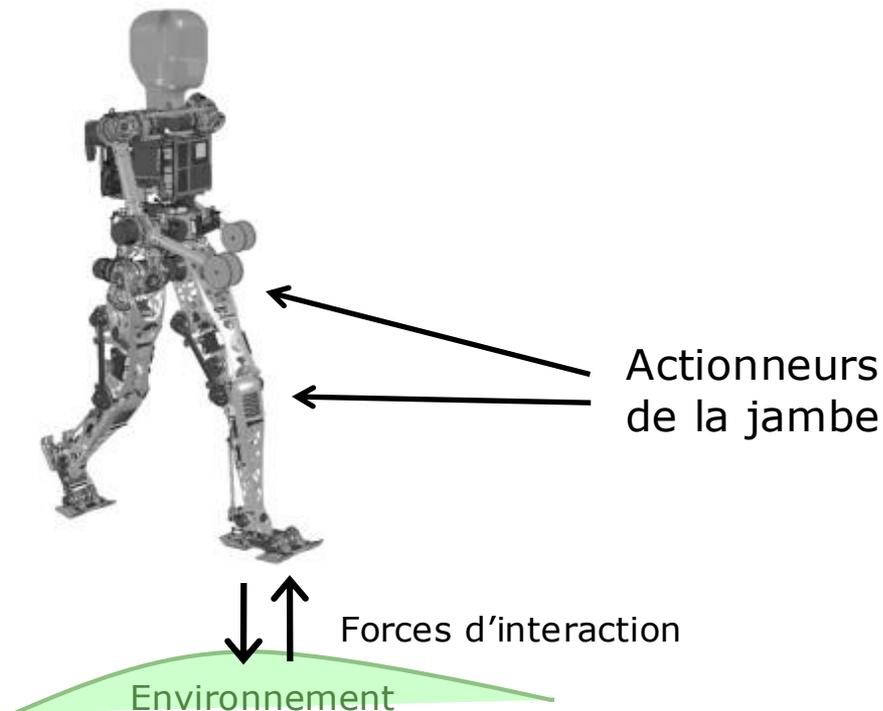
# Concepts de locomotion : exemples de la Nature

Reptation  
Glissement  
Course  
Marche

Type of motion	Resistance to motion	Basic kinematics of motion
Crawl 	Friction forces	 Longitudinal vibration
Sliding 	Friction forces	 Transverse vibration
Running 	Loss of kinetic energy	Periodic bouncing on a spring 
Walking 	Loss of kinetic energy	Rolling of a polygon 

# Caractérisation du concept de locomotion

- *Locomotion* : interaction physique entre le robot et son environnement
  - Complément de la *manipulation*
- La locomotion est concernée par les *forces d'interaction* et les *mécanismes/actionneurs* qui les génèrent



# Caractérisation du concept de locomotion

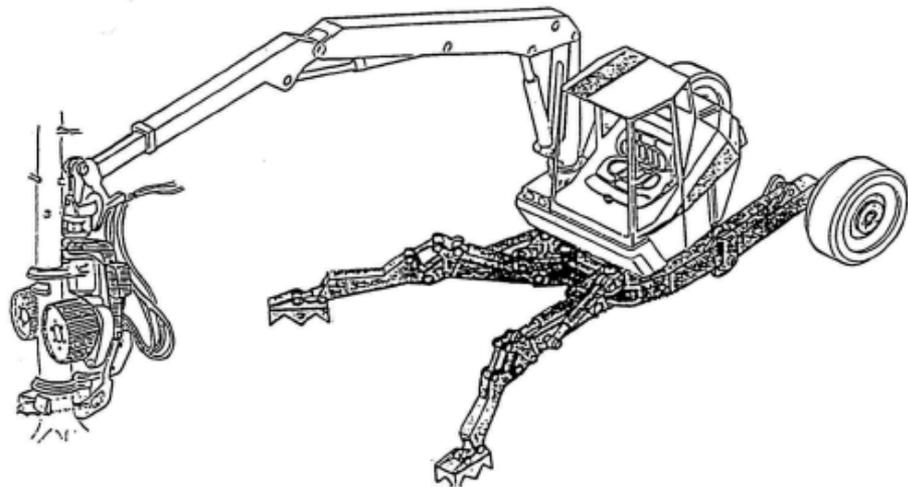
Les robots mobiles généralement utilisent :

- *Mécanismes à roues* : une technologie humaine pour les véhicules bien connue

**ou**

- *Un petit nombre de jambes articulés* : le plus simple des approches biologiques à la locomotion

... beaucoup plus rarement une combinaison de roues et jambes



RoboTrac : véhicule hybride pour terrains accidentés

## Is the wheel the last word in land locomotion?

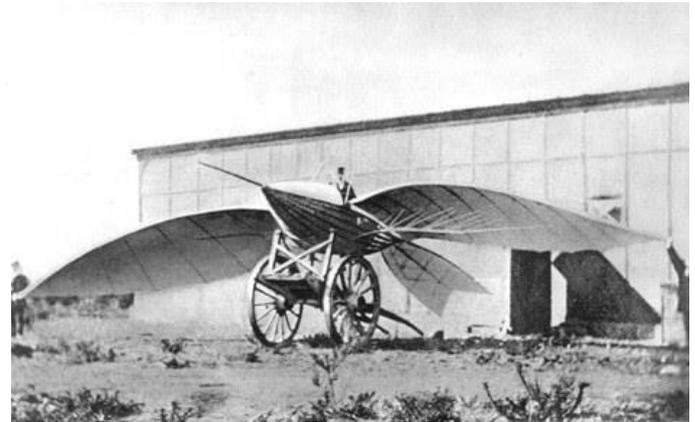
**Locomotion on land has evolved from the crawling and sliding of reptiles to the rolling of man-made wheels. Although walking and running have not been surpassed in versatility, economy and efficiency for off-the-road locomotion, roads, rails and wheels appear to be the ultimate answer to Man's transport needs on Earth**

by M. G. Bekker

*Head of Land Mobility Laboratory, Defense Systems Division, General Motors Corporation, USA*

veloped more rigorous methods) the development of animal land locomotion in terms of such measures of efficiency and effectiveness as the power consumption, thrust/weight (drag/lift) ratio and speed. A realization that such performance indices depend on the physico-geometrical values of the terrain and the animal anatomy not only should explain, at least partially, the course that events have taken through past aeons, but also should throw some light upon what may be expected in the foreseeable future.

The mechanics of animal locomotion has been discussed elsewhere. Rashevsky, Mosauer and the others have proposed methods of evaluation of the problems involved, which may be briefly summarized as follows. In general, one may classify animal locomotion into crawling, sliding, galloping (running), leaping and walking. Crawling of a caterpillar-like animal, which consists of consecutive liftings of a small portion of the body and subsequent contracting of that portion in the direction of motion, requires power which must overcome gravity forces and the resistance of the body to contraction. Sliding of a snake in a zigzag manner has to over-

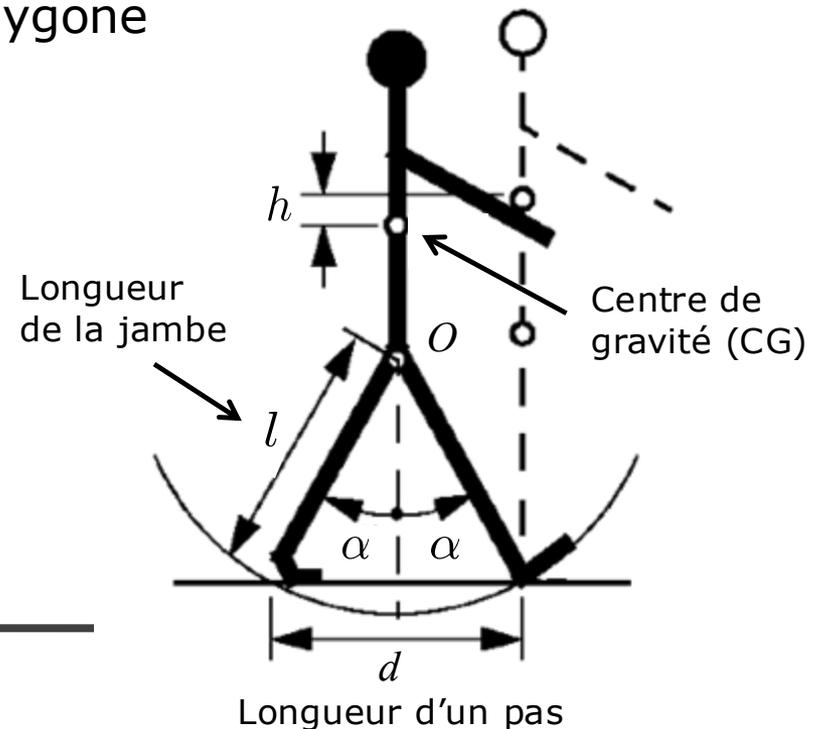
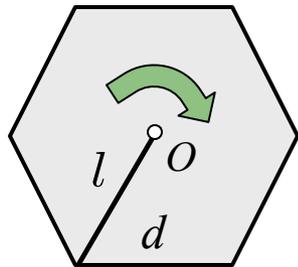


## Les concepts de locomotion dans la Nature

- Difficiles à imiter (techniquement) : pas d'avions à voilure battante !
- Le roulement (sans glissement) est efficace mais non présent dans la Nature
- La Nature n'a pas inventé la roue mais le mouvement de marche bipède est proche du roulement

# Mécanisme de marche bipède

- Pas très éloigné du roulement
- Correspond au roulement d'un polygone de côté égal à la longueur d'un pas
- Plus le pas  $d$  est petit, plus le polygone tend vers un cercle (roue)
- Mais la Nature n'a pas développé une liaison rotoïde complète



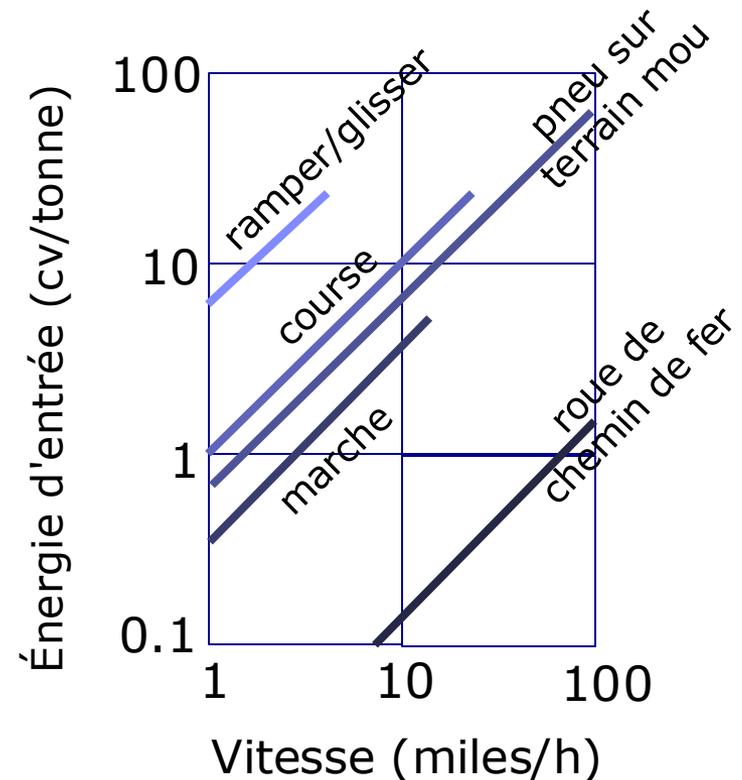
# Locomotion par jambe vs roue

- **Locomotion par jambes**

- Plus de degrés de liberté (DDL) et plus d'actionneurs
- Complexité mécanique et de commande accrue
- Marche/course implique le mouvement du centre de gravité

- **Les roues**

- Simples
- Adaptées au sol plat et dur
  - Sur surfaces lisses et dures, la locomotion par roue est 1 à 2 ordres de grandeur plus efficace que la locomotion par jambe



*"Walking Machines: An Introduction to Legged Robots"*

D.J. Todd, Kogan Page Ltd, 1985

# Meilleure efficacité de locomotion

- **Terrain lisse et dur**

- *La roue*

- Adaptée aux environnements structurés
  - Par ex. route (asphalte), trottoir, usine ...

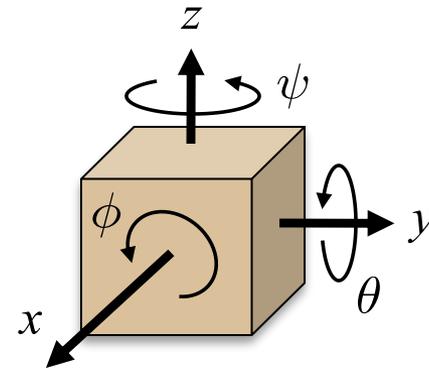
- **Terrain naturel**

- *La jambe*

- Favorisée par la nature : terrain brut et non structuré
  - Par ex. forêts, terrains rocheux, dunes ...

## Degrés de liberté (DDL) et actionneurs

- Généralement un actionneur contrôle 1 DDL (mouvement unique : par ex. avant/arrière, droite/gauche)
- Le nombre de DDL d'un robot détermine ses possibilités d'action sur l'environnement
- Un solide « libre » dans l'espace a 6 DDL :
  - 3 DDL en translation  $x, y, z$
  - 3 DDL en rotation  $\phi, \theta, \psi$



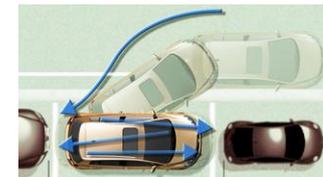
### Remarque

- Si pour chaque DDL, un actionneur indépendant (non redondant), alors tous les DDL du robot sont contrôlables

**Pas vrai en général (coûteux) ! D'où la difficulté de la commande !**

- Ex. une voiture a 3 DDL : position  $(x, y)$  + orientation  $(\theta)$   
Mais seulement 2 DDL sont contrôlables : avant/arrière (pédale) + orientation (volant) → *système sous-actionné*

- Certains mouvements ne peuvent pas être réalisés (ex. manœuvres de parking : trajectoires complexes !)



# Ch. 2: Robotique Mobile

- Petit historique

**Partie 1**

- systèmes, locomotions, applications

**Partie 2**

- Marché mondial et besoins technologiques

**Partie 3**

- Effecteurs et actionneurs

**Partie 4**

- Robots mobiles à **jambes**, à roues et aériens

**Partie 5**

# Locomotion par jambes (robots marcheurs)

## Avantages

- Terrain difficile :

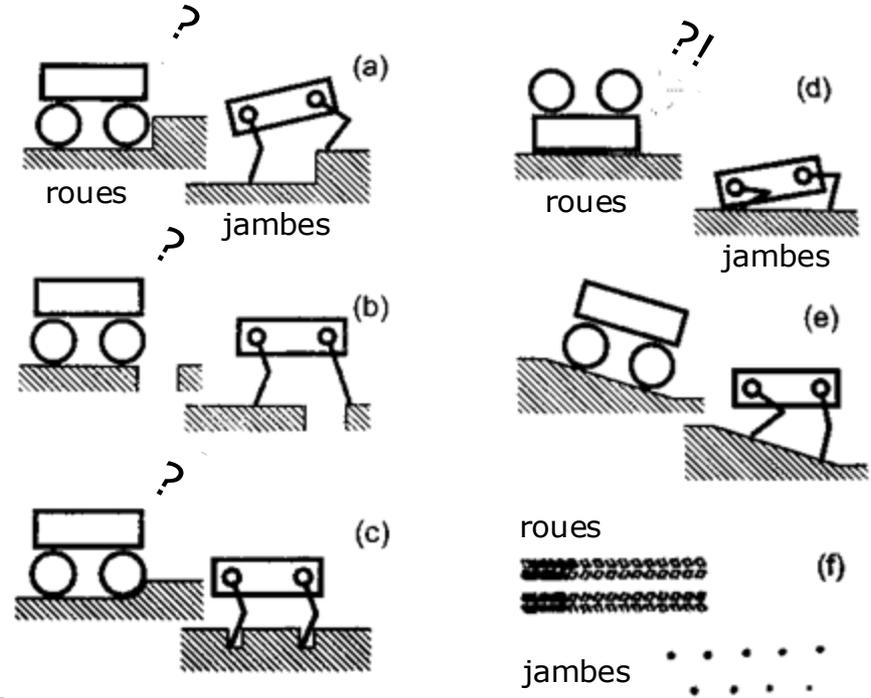
- Adaptabilité
- Manœuvrabilité

Franchissement de marches (a) et trous (b), traversée de terrains accidentés, ex. sablonneux (c)

- Le nombre élevé de DDL permet au robot de se lever lorsque il est tombé (d) et de se maintenir nivelé par rapport au sol (e)

- (f) Le robot peut compter sur quelques points de contact sélectionnés, ce qui réduit l'impact sur l'environnement par rapport aux robots à roues

- (g) Possibilité de manipuler des objets dans l'environnement
  - Par ex. faire rouler un objet avec les pattes avant



(g)



Robot *chien*  
Aibo (RoboCup)

# Locomotion par jambes (robots marcheurs)

## Inconvénients

- Demande d'énergie
- Complexité mécanique et de commande (chaque jambe : deux moteurs au moins)
- Haute manœuvrabilité seulement si nombre suffisant de DDL
- Stabilité (statique/dynamique)



Montée et descente  
d'escaliers à allure  
biomimétique

[Vidéo 1](#)

[Vidéo 2](#)

Asimo : 6 DDL par jambe

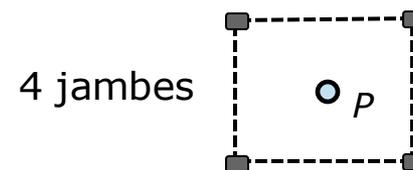
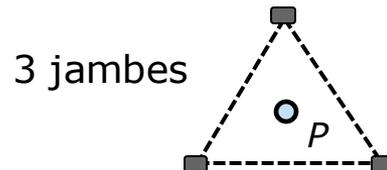


# Marche quasi-statique et stabilité statique

- La **marche quasi-statique** se caractérise par le fait que le robot n'est *jamais en déséquilibre*
  - La projection  $P$  du centre de gravité (CG) est toujours à l'intérieur de la *surface* délimitée par les points d'appui
    - Cette zone s'appelle le *polygone de sustentation* (ou *de support*)
  - Nécessite plusieurs jambes (ou roues) pour avoir suffisamment de points statiques de support
- **Stabilité statique** : l'équilibre du robot est maintenu sans avoir besoin de mouvement

## Exemples :

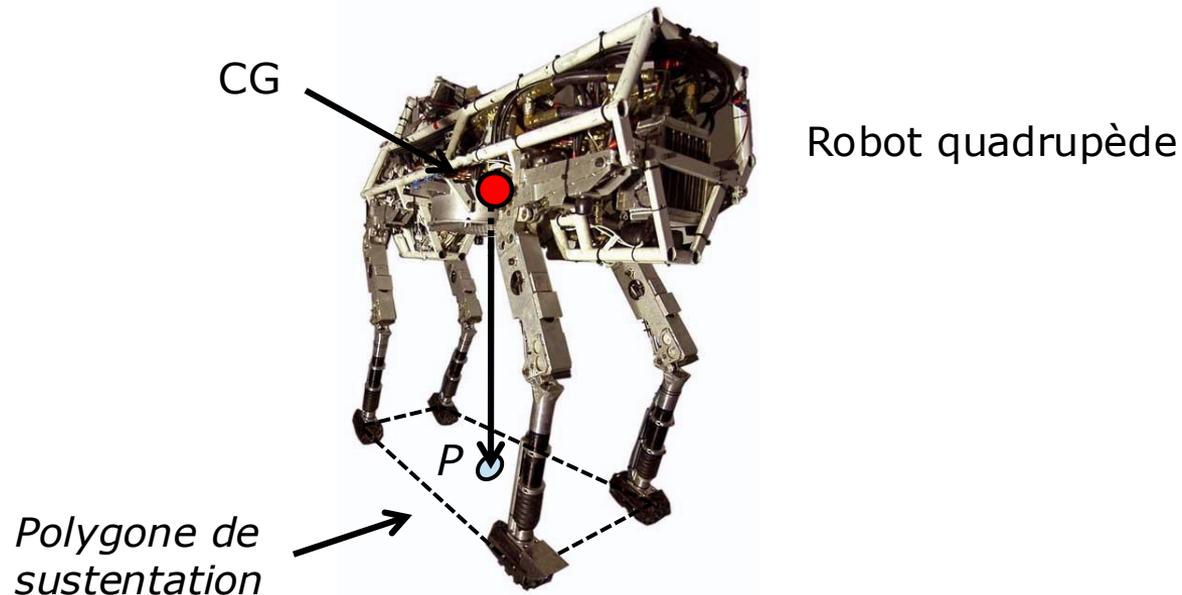
- Robot à 2 jambes : le polygone de sustentation est une *droite* et le CG ne peut être stabilisé sur la ligne de support
- Robot à 3 jambes (organisation tripode) : le polygone de sustentation contient le point  $P$  (stabilité statique)



# Marche quasi-statique et stabilité statique

**Remarque:** Un robot gardera plus facilement son équilibre si :

- Son **CG est bas** : l'inclinaison du robot devra être importante pour que la projection  $P$  du centre de gravité soit en dehors du *polygone de sustentation*
- Le **robot est large** : le polygone de sustentation est plus grand

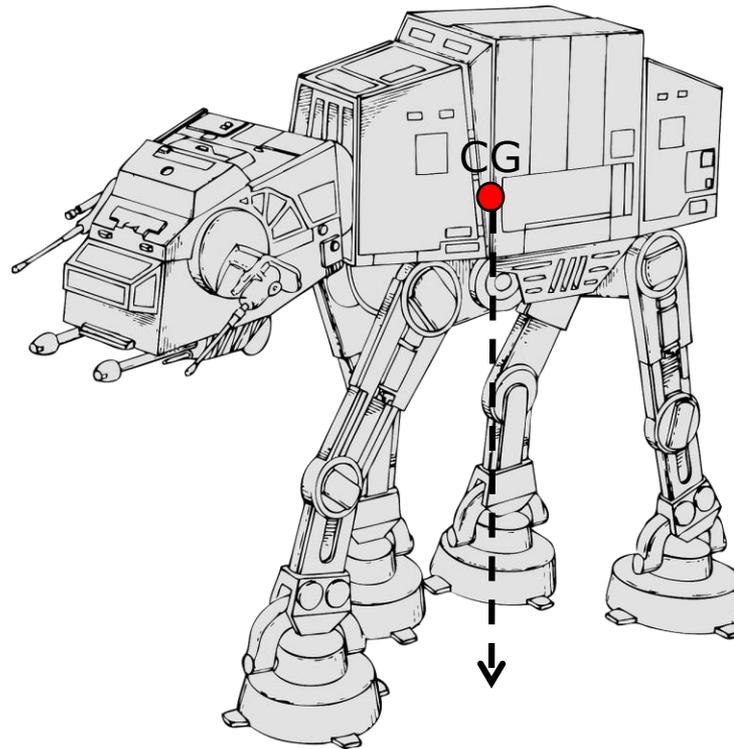


# Marche quasi-statique et stabilité statique

## Exemple :

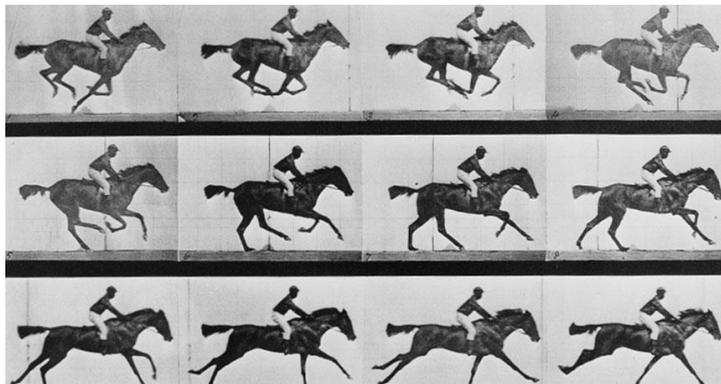
- *All Terrain Armored Transport* ou *AT-AT walker* (**Star Wars : Episode V**)

CG du robot très haut: critique pour la stabilité !

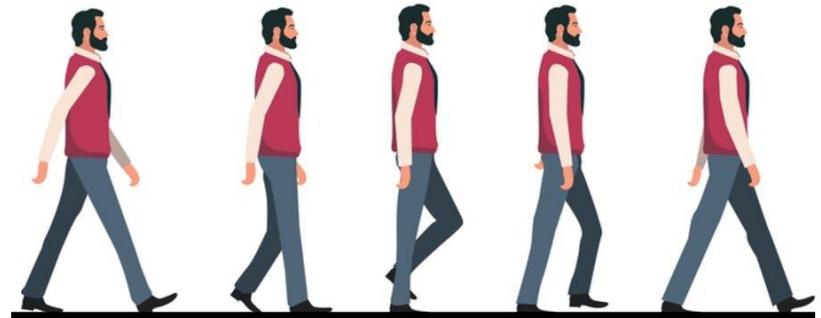


# Marche dynamique et stabilité dynamique

- La **stabilité dynamique** caractérise la stabilité d'un robot *pendant son mouvement*. Le CG est remplacé par le ZMP (*Zero Moment Point*)
- En mouvement, le robot se trouve en *déséquilibre* entre chaque pas : il récupère son équilibre au moment où il repose ses jambes situées en l'air, puis se place de nouveau en déséquilibre en soulevant d'autres jambes
  - Cela explique pourquoi il est difficile de s'arrêter en pleine marche (une **marche dynamique**)
  - Par ex. un robot sauter à une jambe, est *dynamiquement stable* mais *statiquement instable*



Eadweard Muybridge (1878)



# Marche quasi-statique VS Marche dynamique

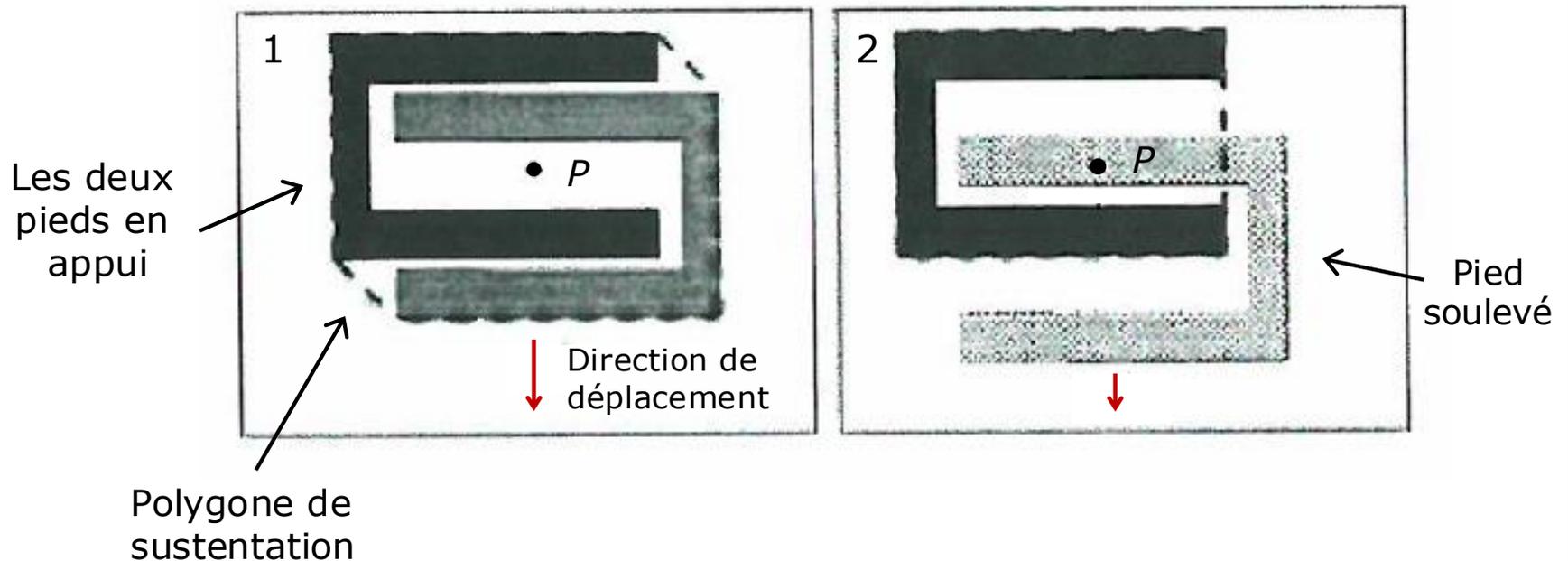
- La *marche quasi-statique* est très lente : rapport énergie/déplacement très défavorable !
- La *marche dynamique* : meilleures vitesses de déplacement, mais nécessite un contrôle actif (plus complexe) !

➡ *Equilibre et stabilité* : défis du contrôle en robotique mobile

[Vidéo \(RoboCup\)](#)

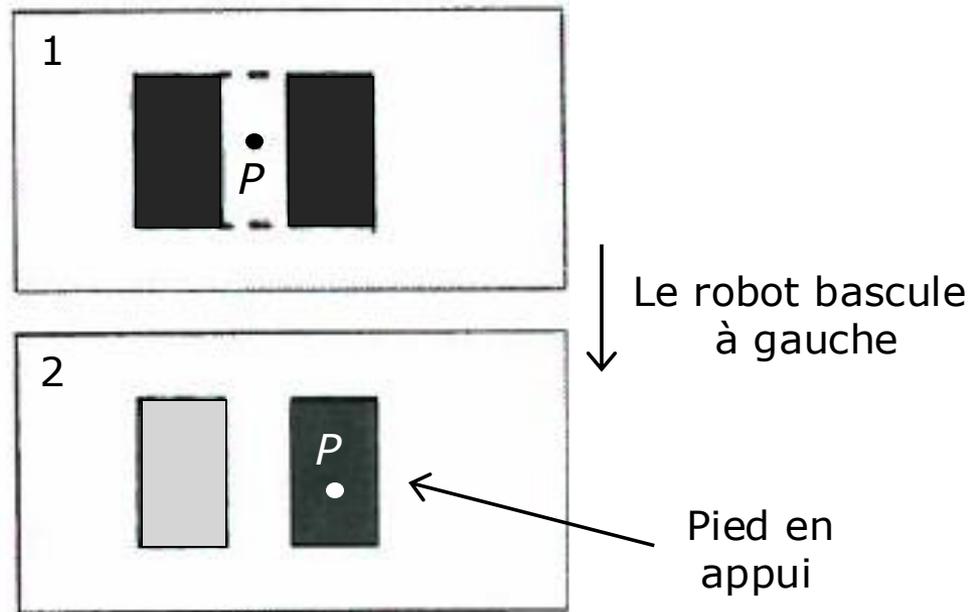
# Robot bipède et marche quasi-statique

- **Solution 1** : utiliser des pieds assez grands (par ex. en « U ») et encadrant la zone centrale (où se trouve la projection  $P$  du CG)
  - Problème: les changements de direction sont difficiles à mettre en place



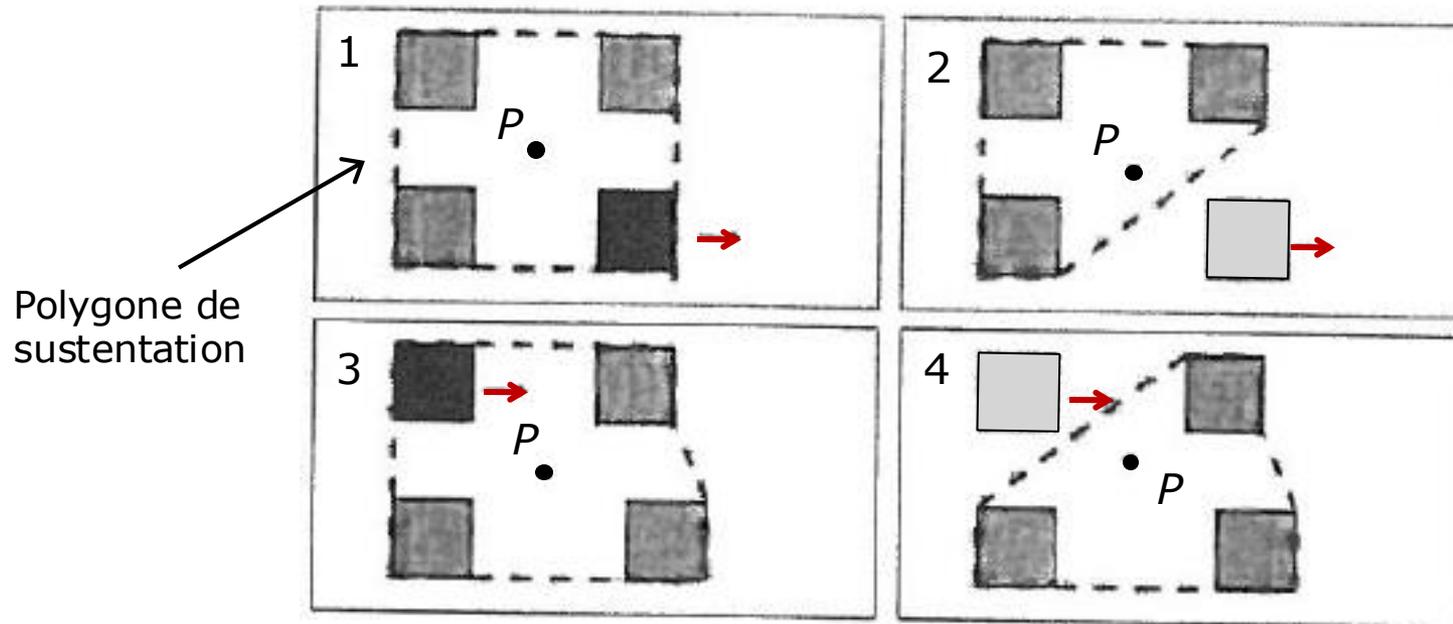
# Robot bipède et marche quasi-statique

- **Solution 2** : amener la projection du CG au polygone de sustentation
  - Il faut déplacer *avant chaque mouvement* une partie de la masse du robot au dessus du pied restant en appui, en basculant une partie du robot (par ex. le bloc batterie) à chaque déplacement. Pas banal à réaliser en pratique, mouvements lents !



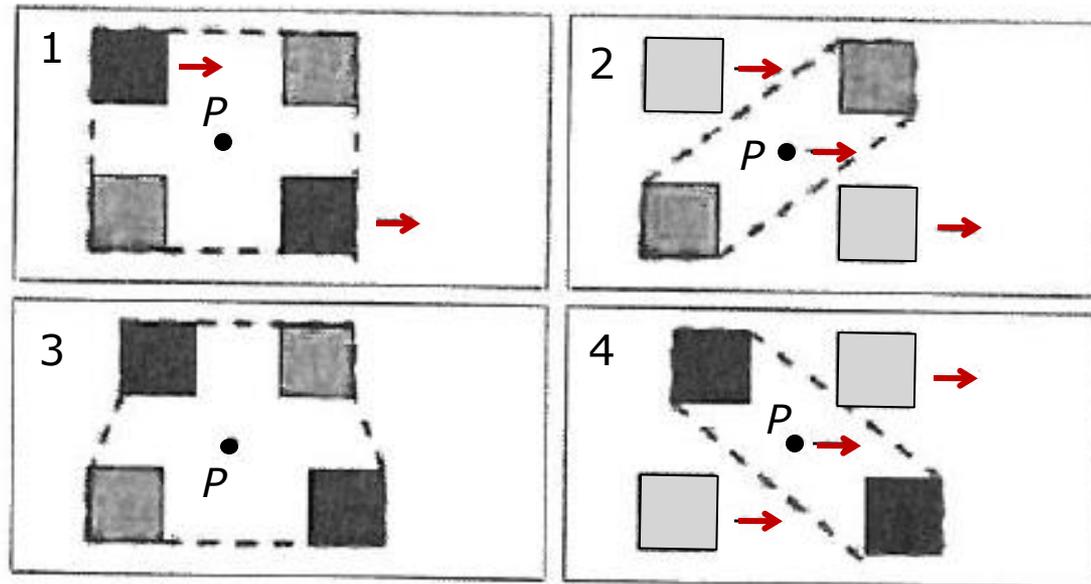
# Robot quadrupède et marche quasi-statique

- **Solution 1** : Le robot déplace les jambes une par une. L'équilibre est facilement maintenu (la projection  $P$  du CG est à l'intérieur du *polygone de sustentation*)
  - Le problème majeur de cette solution réside dans sa *lenteur*
    - En effet, le robot doit faire 4 déplacements pour avancer d'un seul pas !



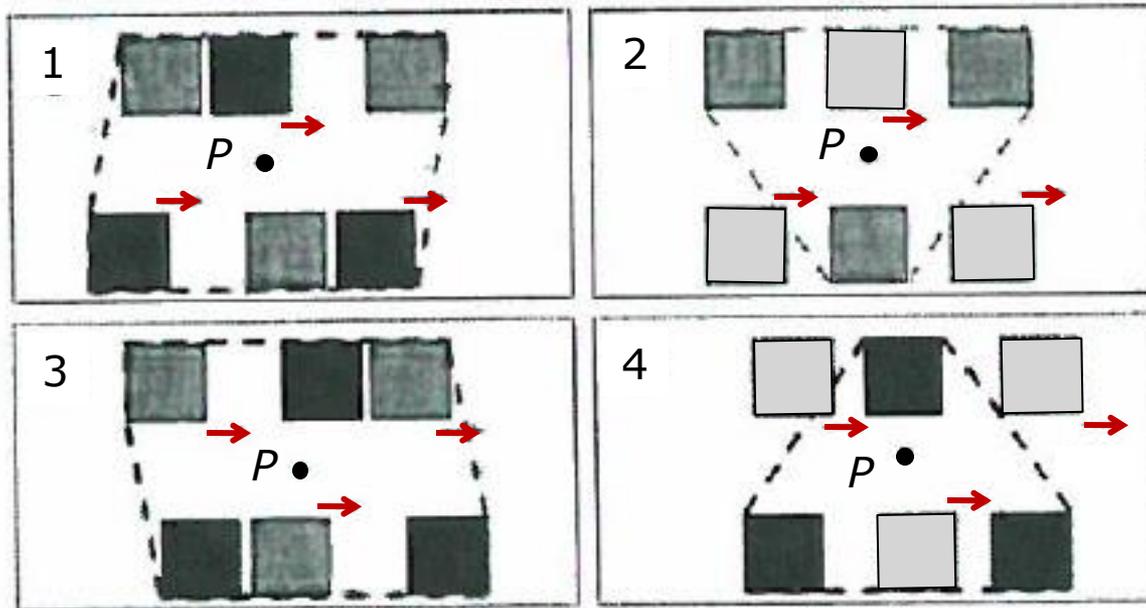
# Robot quadrupède et marche quasi-statique

- **Solution 2** : Pour augmenter la vitesse, on peut déplacer les deux jambes opposées en même temps
  - Le polygone de sustentation devient *étroit* et il est directement déterminé par la largeur des pieds
  - **Attention** : En voulant simplifier le problème, le déplacement des jambes fait bouger la position du CG. Critique !



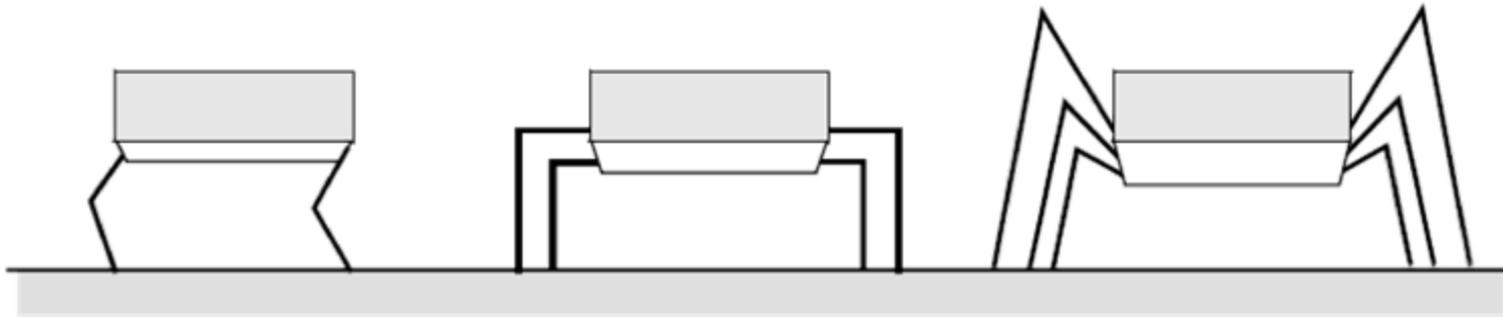
# Robot hexapode et marche quasi-statique

- Le robot se déplace en soulevant 3 jambes à la fois : les deux extrêmes d'un côté et la jambe centrale du côté opposé, puis il recommence en alternant les 3 jambes, et ainsi de suite
  - Marche tripode alternée
  - Facile à réaliser, mais difficulté dans les virages



# Configurations de jambes et stabilité

- Inspiration biologique



Mammifères :  
2 ou 4 pattes

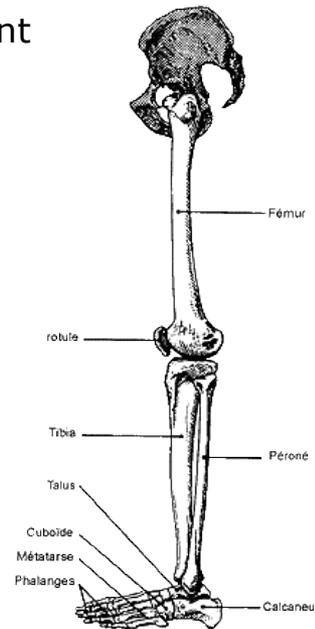
Reptiles et  
amphibiens :  
4 pattes

Insectes :  
6 pattes ou  
plus

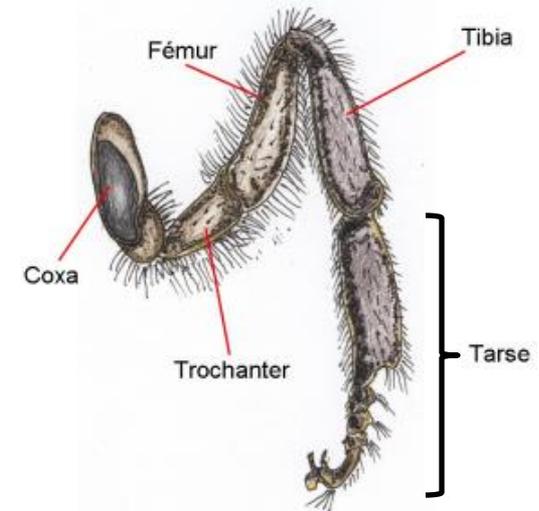
- **Stabilité statique**: il nécessite au moins 3 jambes (cf. un tabouret à trois pieds)
- La complexité de locomotion est *inversement liée* au nombre de jambes
- Pour une manœuvrabilité exceptionnelle, un contrôle actif complexe est nécessaire

# Nombre de DDL de chaque jambe

- Un minimum de 2 DDL est nécessaire pour faire bouger une jambe
  - Mouvements de levée (« lift ») et de balancier (« swing »)
  - Un mouvement de glissement dans plus d'une dimension n'est pas possible
- 3 DDL pour chaque jambe, *en général*
- 4 DDL pour la liaison de la cheville (passive généralement)
  - Permet d'améliorer la marche
  - Mais des DDL additionnels augmentent la complexité de conception et de contrôle de locomotion
- *Corps humain*
  - Environ 630 muscles
  - 148 os mobiles
  - 244 DDL
- *Jambe humaine*
  - Plus de 7 grands DDL
  - Plus de 15 groupes musculaires actionnent 8 articulations complexes

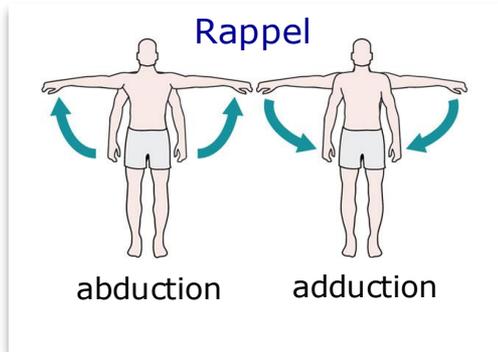


Jambe humaine

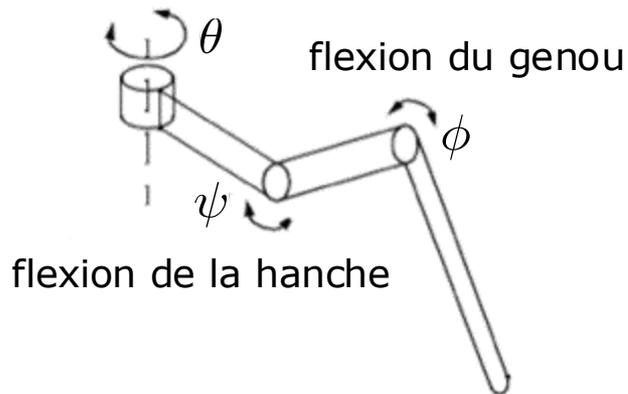


Patte d'abeille

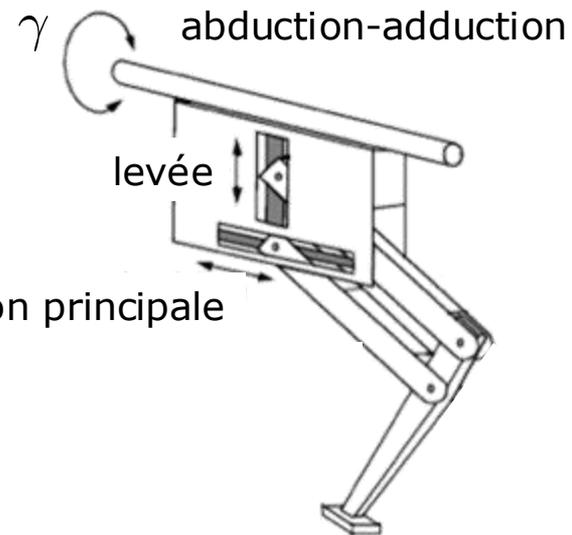
# Exemples de mécanismes à 3 DDL



abduction de la hanche



**Jambe : mécanisme 1**



**Jambe : mécanisme 2**

# Locomotion à jambes

- Augmenter le nombre de DDL d'une jambe :
  - Accroît la manœuvrabilité du robot
  - Permet d'aborder un plus grand nombre de types de terrains
  - Accrue la variétés de démarches

## Mais ...

- Plus d'énergie
  - Commande/actionneur plus compliqués
  - Masse augmente
- Robot mobile à plusieurs jambes
  - Coordination nécessaire des jambes pour la locomotion
  - Contrôle de la démarche

# Nombre d'allures de marche

- Une **allure** (« pattern ») est caractérisée par une *séquence distincte d'événements* levée/pose par jambe (individuelle)
  - Le nombre  $N$  d'allures possibles pour un mécanisme de marche avec  $k$  jambes est :

$$N = (2k - 1)!$$

## Exemples :

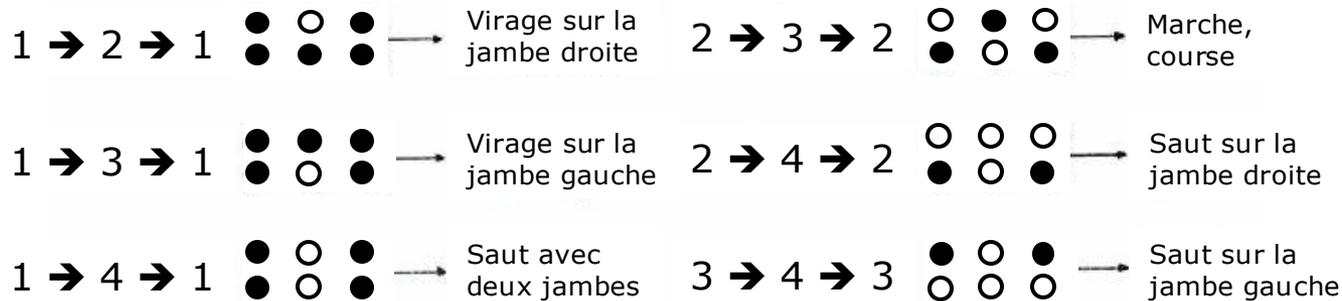
- Pour un robot bipède ( $k = 2$ ), le nombre d'allures possibles est  $N = 3! = 6$
- Pour un robot avec 6 jambes (hexapode), le nombre d'allures possibles est  $N = 11! = 39916800 \simeq 4 \times 10^7$ , c'est-à-dire 40 millions

# Marche bipède

- Avec 2 jambes (robot bipède), on peut avoir 4 états différents :

- Deux jambes posées (down) ●●
- Jambe droite posée (down), jambe gauche levée (up) ●○
- Jambe gauche posée (down), jambe droite levée (up) ○●
- Deux jambes levées (up) ○○

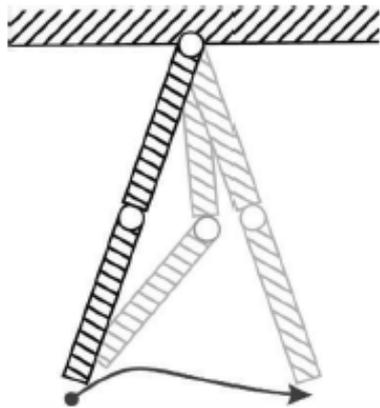
- Une *séquence distincte* peut être considérée comme un changement d'un état vers un autre et retour (« cycle »)
- Nous avons alors les allures suivantes pour un robot bipède ( $N = 6$ )



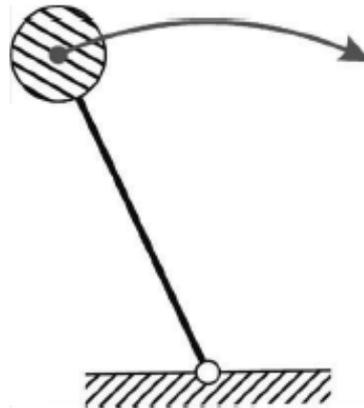
- La Nature optimise les allures (par rapport à l'énergie dépensée)

# Marche bipède et énergie

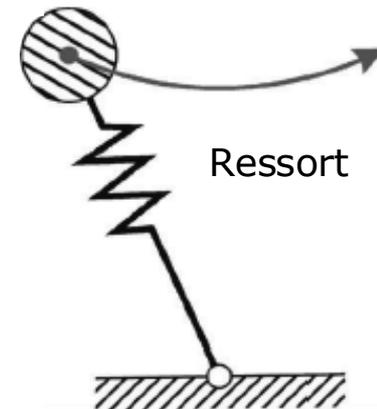
- *Éléments dynamiques* utilisés pour une marche énergétiquement efficace\*



Double pendule pour la phase de balancier



Pendule inversé pour la phase d'appui

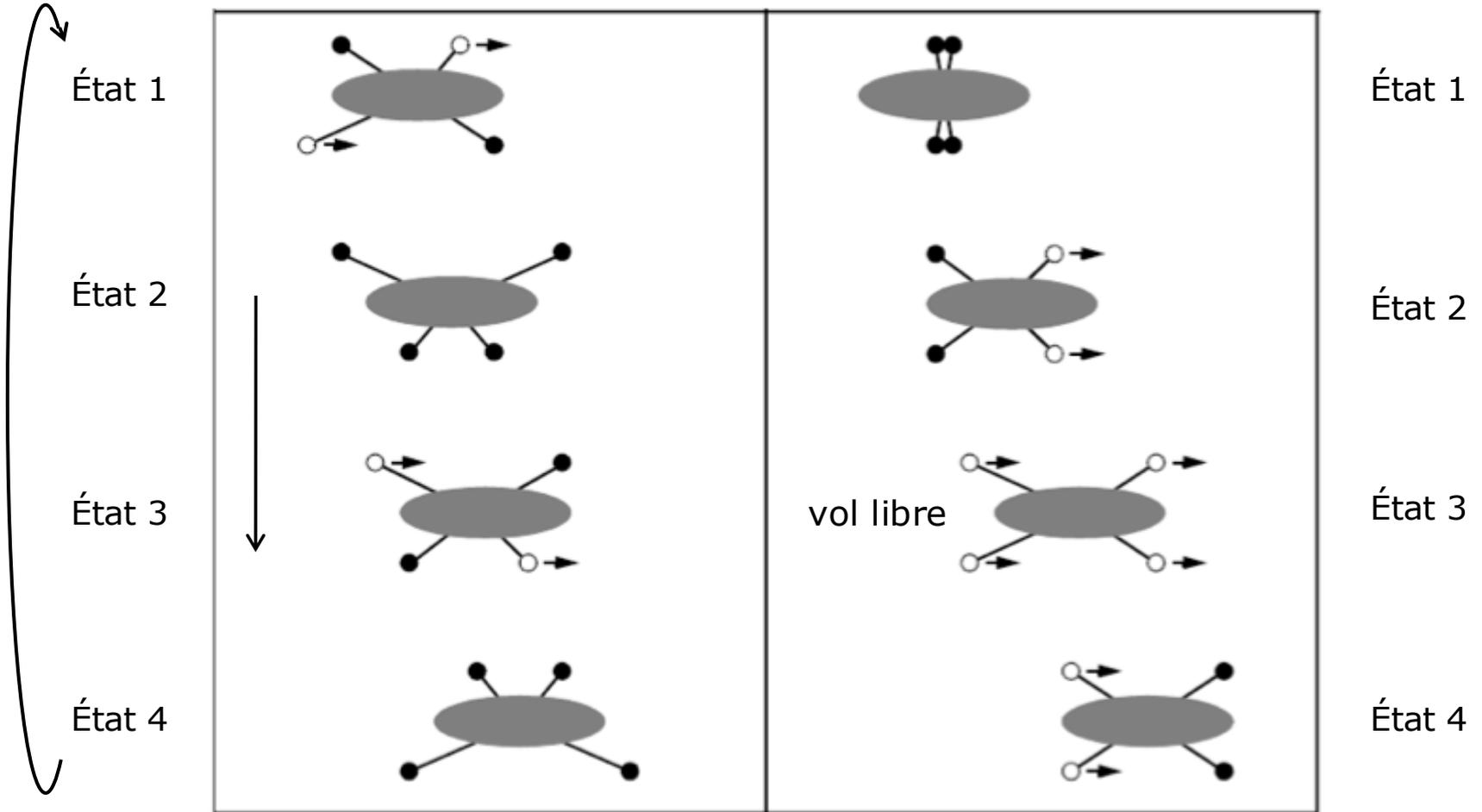


*Spring-loaded inverted pendulum (SLIP)* pour la course

- Pour les humains, la *vitesse de marche optimale* est d'environ 1 m/s (3.6 km/h)
- Pour des vitesses supérieures ou inférieures à 1 m/s, le coût du transport augmente et **plus d'énergie** est nécessaire pour parcourir la même distance

\* "*Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers*", S. Collins, A. Ruina, R. Tedrake, M. Wisse, *Science*, vol. 307, no. 5712, pp. 1082-1085, 2005

# Deux allures possibles avec 4 jambes (ex. un cheval)



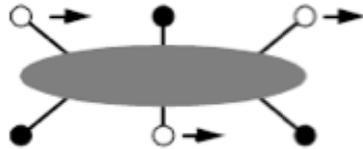
**a) Marche**

**b) Galop**

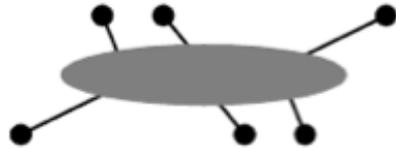
# Allure possible avec 6 jambes

## Marche tripode alternée

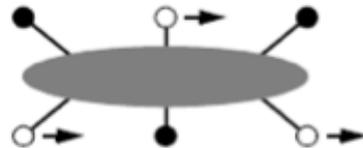
État 1



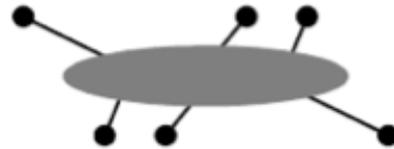
État 2



État 3



État 4



## *Marche quasi-statique*

- Il y a toujours trois jambes au sol
- Balance simplifiée

# **Robots à jambes : exemples**

<https://robotsguide.com>

- Locomotion à une jambe
  - Nombre minimal de jambes
    - Minimise la masse cumulée des jambes du robot
    - Pas de coordination de jambes
    - Un seul point de contact avec le sol

### **Mais ...**

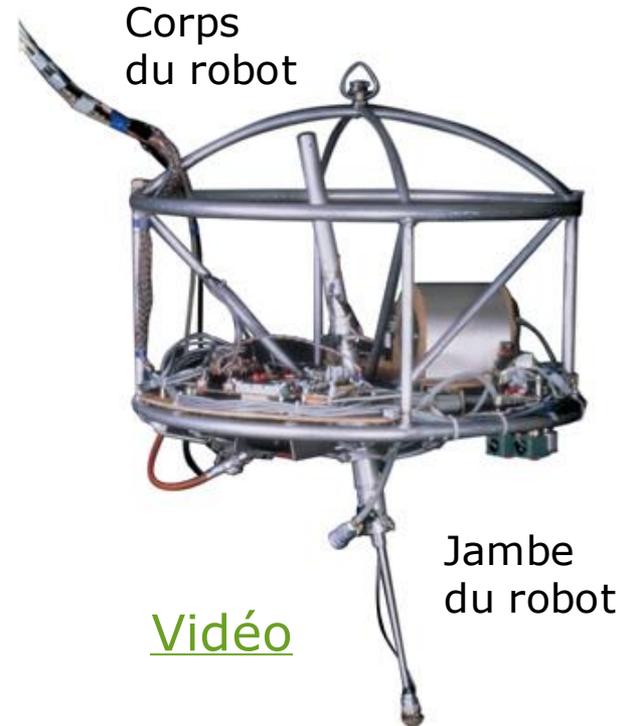
- *Instabilité*: marche quasi-statique impossible
- Stabilisation dynamique *indispensable*

# Exemples

- Une jambe

- Robot sauteur de Marc Raibert (Carnegie Mellon University, Leg Laboratory, années 1980)

- Le robot corrige en continu l'attitude et sa vitesse en ajustant l'angle de la jambe par rapport au corps
- Un *actionneur hydraulique* garantissant une extension longitudinale de grande puissance est utilisé, ce qui permet de sauter
  - Même s'il est très puissant, ce type d'actionneur a besoin d'une *pompe hydraulique* très performante connectée en permanence au robot



# Exemples

- Deux jambes (robot bipède)
  - Sérieux modèles depuis 20 ans
    - Sony
    - Honda
    - Hyundai
    - Unitree



Evolution des robots bipèdes de Honda

- Innovations technologiques:
  - Réduction de la taille des actionneurs
  - Accroissement de la puissance des actionneurs
  - Nouveaux capteurs de couple
  - Commande bas niveau en boucle fermée

# Exemples

- Deux jambes

- P2 de *Honda* (1996)
  - Vitesse max: 2 km/h
  - Autonomie: 15 min
  - Poids: 210 kg
  - Taille: 1.82 m
  - DDL des jambes:  $2 \times 6$
  - DDL des bras:  $2 \times 7$



... ancêtre d'Asimo de *Honda* (2005-**2011**)

- Vitesse: 2.7 km/h (marche), 6 km/h (course)
- Autonomie: 1h (marche)
- Poids: 48 kg
- Taille: 130 cm
- DDL totaux: 57
- Prix: 5 M€



Asimo (2011)

[Vidéo - course](#)

[Vidéo - saut](#)

# Exemples

- Deux jambes
  - Wabian-2R de l'Université de Waseda, Japon (2006-): WAseda BIpedal humANoid No.2 Refined »
    - Poids (avec batterie): 64 kg
    - Taille: 150 cm
    - 41 DDL



# Exemples

- Deux jambes
  - HRP-4 du *AIST* et de *Kawada Industries*, Japon (2010-) : « Humanoid Robotics Project »
    - Poids: 39 kg
    - Taille: 151 cm
    - 34 DDL
    - Prix: 300 k\$
  - HRP-4C (Miim) (2009-)
    - Poids: 43 kg (batterie incluse)
    - Taille: 158 cm
    - 30 moteurs (corps), 8 moteurs (expressions faciales)



HRP-4

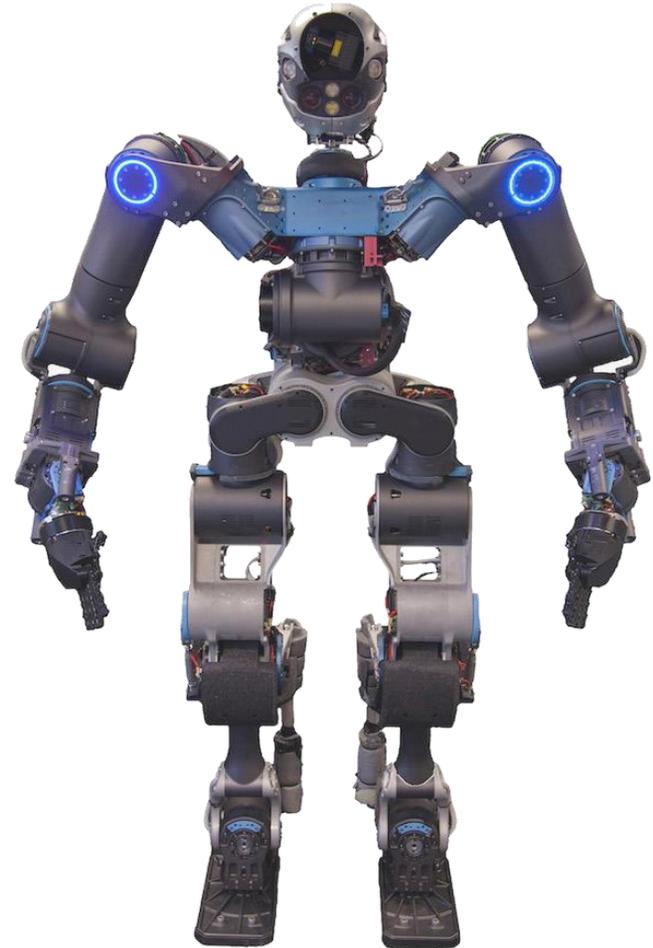


HRP-4C

[Vidéo](#)

# Exemples

- Deux jambes
  - WALK-MAN de l'IIT et de l'Université de Pise, Italie (2013-): « Whole Body Addaptive Locomotion and Manipulation »
    - Poids: 120 kg (avec batteries)
    - Taille: 185 cm
    - Couple des articulations des jambes: jusqu'à 320 Nm (moteurs électriques)
    - Participation à la *DARPA Robotics Challenge* en 2015



# Exemples

- Deux jambes
  - ATLAS de *Boston Dynamics* (2013-): « Agile Anthropomorphic Robot »
    - Poids: 75 kg
    - Taille: 150 cm
    - Charge maximale: 11 kg
    - Alimentation: batterie
    - Perception: LIDAR et vision stéréo
    - 28 articulations (actionneurs hydrauliques). Depuis avril 2024, uniquement actionnement électrique
    - Participation à la *DARPA Robotics Challenge en 2015* (plate-forme adoptée par 6 équipes)



# Exemples

- Deux jambes

- H1 Evolution V3.0 de *Unitree* (2024), [www.unitree.com/h1](http://www.unitree.com/h1)
  - Poids: 47 kg
  - Vitesse max: 3.3 m/s (record de vitesse)
  - Taille: 1.8 m
  - Autonomie (batterie): 864 Wh
  - Couple max sur les articulations: 360 Nm
  - Pic de densité de couple: 189 Nm/Kg
  - Perception:
    - LIDAR 3D (LIVOX-MID360)
    - Camera de profondeur (Intel RealSense D435i)
  - Nombre de DDL par bras: 4



[Vidéo H1](#)

[Vidéo G1](#)

# Exemples

- Deux jambes
  - Nao de *Aldebaran* (2006-2025)
    - Poids: 4.3 kg
    - Taille: 58 cm
    - DDL totaux: 25
    - Ordinateur embarqué avec Wi-Fi
    - Synthèse et reconnaissance vocale
    - 2 cameras
    - Programmable par:
      - *ROS*
      - *Choregraphe*
      - *Gostai Urbi*



[www.aldebaran.com](http://www.aldebaran.com)

# Exemples

- **Quatre jambes** (robots quadrupèdes)
  - Stabilité statique
  - Marche : coordination des jambes, déplacement du centre de gravité
- Aibo de *Sony* (2000 et 2018)
  - Chien artificiel
    - Vision stéréo
    - Capteurs tactiles
    - Poids (sans batterie): 1.2 kg
    - Taille: 25 cm × 23 cm × 13 cm
- CyberDog 2 de *Xiaomi* (2023)
  - 19 capteurs différents
  - Système CyberGear:  
12 micro-moteurs gérés par IA
  - Poids: 8.9 kg
  - Longueur: 36.7 cm



Nouveau Aibo  
<https://us.aibo.com>



# Exemples

- **Quatre jambes**
  - BigDog de *Boston Dynamics* (2005-2015)
    - Robot à terrain difficile : marche, course (max 6.4 km/h), transport de charges lourdes comme un « mulet » (max 150 kg)
    - 4 actionneurs par jambe (un moteur à combustion à deux temps de 11 kW alimente une pompe hydraulique qui pilote les actionneurs)
    - Capteurs de position angulaire, contact/sol
    - GPS, LIDAR, vision stéréo, gyroscope



[Vidéo](#)

[Vidéo "version bêta"](#)

# Exemples

- **Quatre jambes**

- Spot et SpotMini de *Boston Dynamics/Hyundai* (2021-)

**Spot**



- Poids: 75 kg
- Taille: 0.94 m
- Charge maximale: 45 kg
- Alimentation: batterie (auton. 45 min.)
- Actionneurs hydrauliques
- Perception: LIDAR 3D
- Nombre d'articulations: 12

**SpotMini**



[Vidéo](#)

[Vidéo backflip](#)

- Poids: 30 kg
- Taille: 0.84 m
- Charge maximale: 14 kg
- Alimentation: batterie (auton. 90 min.)
- Actionneurs électriques
- Perception: système de vision 3D
- Nombre d'articulations: 17
- Intégration possible d'un bras articulé

# Exemples

- **Quatre jambes**

- Cheetah II du *MIT* de Boston, Biomimetic Robotics Lab: (2014-)
  - Saut d'obstacles (jusqu'à 40 cm, 80% longueur de jambe)
  - Vitesse maximale: 6 m/s ( $\sim$  22 km/h)
  - LIDAR, centrale inertielle, encodeurs sur les articulations
  - Actionneurs électriques



[Vidéo](#)

# Exemples

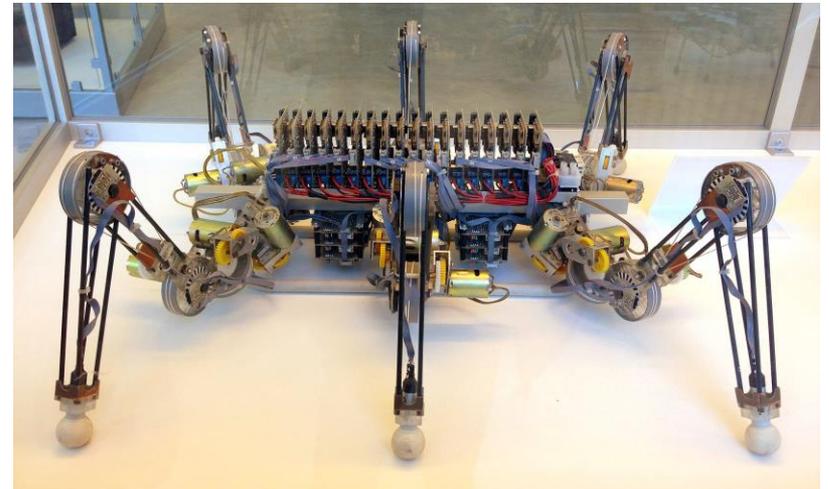


Genghis

- **Six jambes** (hexapodes, ex. Genghis, cf. Introduction)
    - Configuration très étudiée
    - Stabilité statique
    - Jambes à 3 DDL (en général)
      - Flexion de la hanche
      - Flexion du genou
      - Abduction de la hanche
- } Réduction de la complexité de la commande (cf. mécanisme 1)

# Exemples

- Six jambes
  - *Lauron II* (Legged Autonomous Robot Neural Controlled), Forschungszentrum Informatik, FZI, Allemagne (à partir de 1995)
    - Vitesse max: 0.5 m/s
    - Poids: 16 kg
    - Taille: 30 cm
    - Longueur: 70 cm
    - DDL totaux:  $6 \times 3$



Lauron I (1994)

Lauron V (2013-)

[Vidéo](#)