

Cycle de marche (Annexe 1)

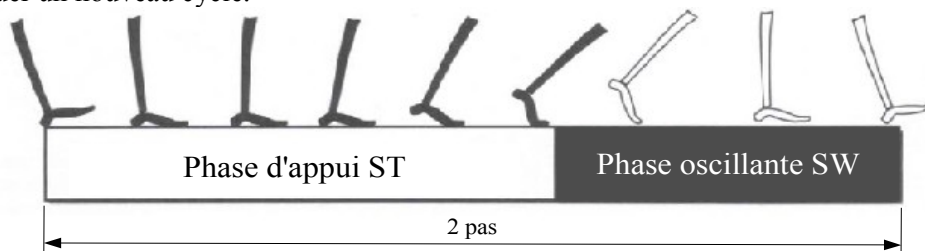
1 Phases principales

La marche est organisée en cycles de mouvements des membres inférieurs. Ces cycles sont reproductibles et symétriques. On ne s'intéresse dans cette étude qu'à la description du cycle de marche de l'ensemble transtibial en ligne droite à vitesse constante. On suppose que les membres supérieurs n'influencent pas la marche.

Le cycle de marche correspond spatialement à une enjambée ou à 2 pas. Par convention, le cycle de marche normale débute lorsque le talon d'un pied se pose et se termine lorsque ce même talon se pose à nouveau sur le sol en un endroit différent.

Le cycle comprend deux phases essentielles :

- la **phase d'appui (ST)** qui commence lorsque le talon touche le sol et se termine lorsque les orteils le quittent,
- et la **phase oscillante (SW)** pendant laquelle le pied ne touche pas le sol mais est déplacé pour effectuer un nouveau cycle.

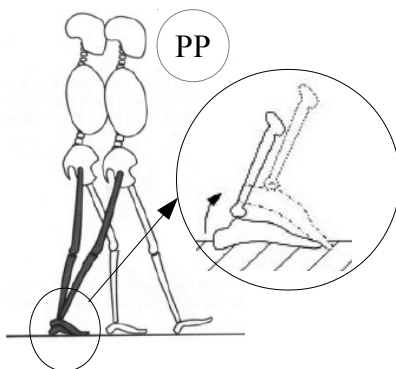
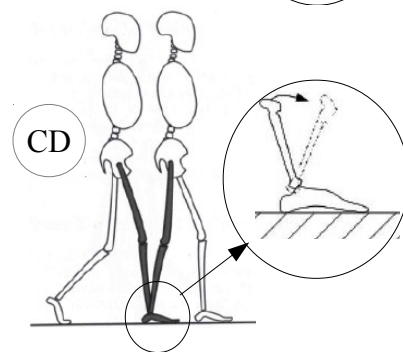
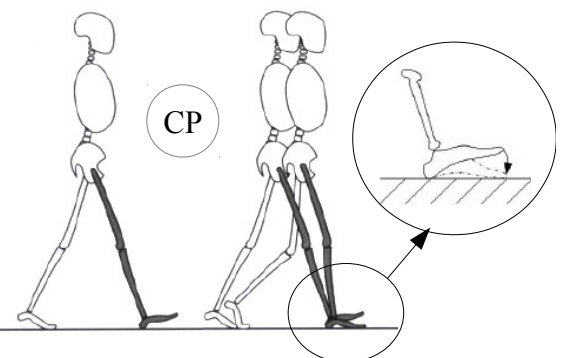


2 Sous-phases

Pour analyser plus finement la marche, on se place dans le plan médian qui sépare la moitié droite de la moitié gauche du corps (plan sagittal). En effet, la très grande majorité des mouvements se font dans des plans parallèles à ce plan sagittal, ce qui valide l'hypothèse d'une étude plane.

La phase d'appui est constituée de 3 sous-phases successives :

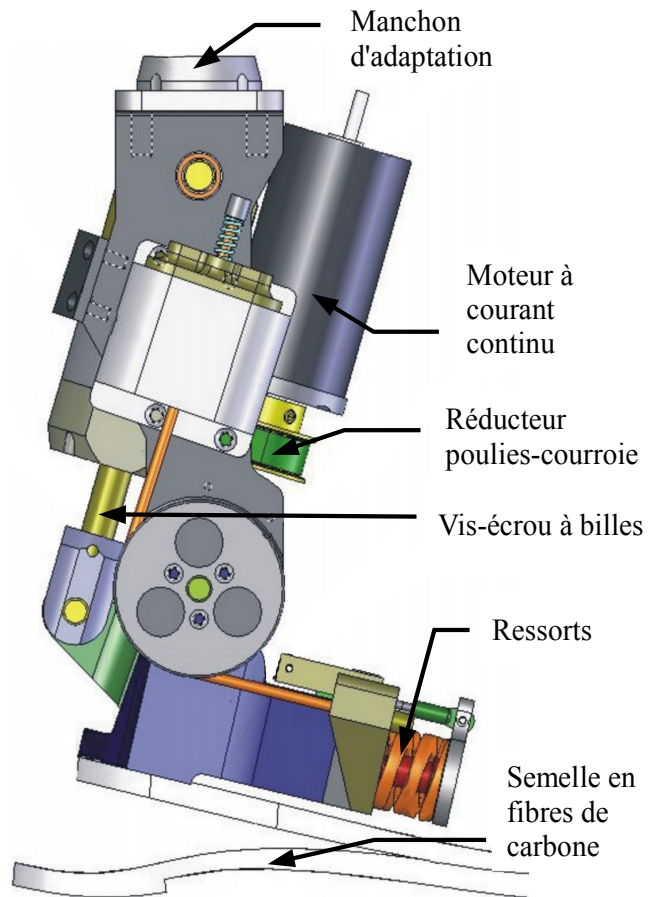
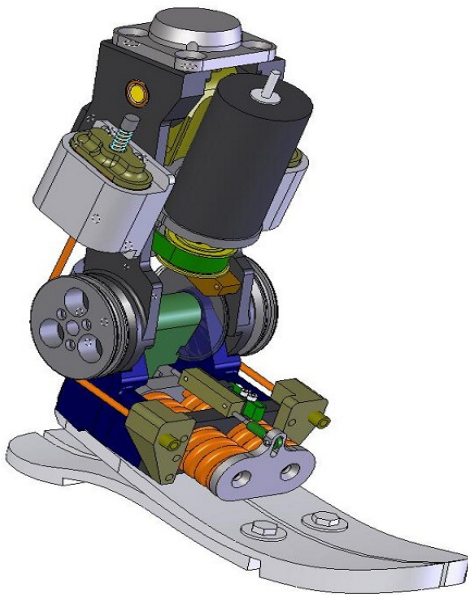
- **sous-phase « CP » (flexion plantaire amortie)** : elle débute lorsque le talon touche le sol et se termine lorsque les orteils touchent le sol (le pied est alors à plat sur le sol). C'est durant cette phase qu'intervient le transfert de charges d'une jambe à l'autre.
- **sous-phase « CD » (dorsiflexion ou flexion du pied contrôlée)** : durant cette phase, le tibia se repositionne vers l'avant de manière à pouvoir propulser le corps lors de la phase suivante.



- **Sous-phase « PP » (flexion plantaire propulsive)** : cette phase commence après la phase CD lorsque le talon commence à quitter le sol et se termine lorsque les orteils le quittent également. Pendant cette phase, l'énergie mécanique accumulée lors de la phase précédente est restituée. Cependant, pour les marches modérées à rapides, la propulsion nécessite un travail supplémentaire provenant des muscles. Ce travail noté W se caractérise physiquement par un essoufflement du marcheur lors d'une marche rapide.

1 Chaîne d'énergie

L'actionneur de la prothèse est un moteur à courant continu alimenté par une batterie rechargeable de 16 Volts. L'énergie mécanique est transmise par un réducteur de type poulies-courroie suivi d'un système vis-écrou qui adapte cette énergie mécanique pour la prothèse (ensemble de liaisons entre le pied artificiel constitué d'une semelle en fibres de carbone et le manchon ou tibia artificiel). Des ressorts permettent d'ajuster également l'énergie mécanique fournie au pied artificiel. L'effort exercé par les ressorts est directement relié au couple exercé par l'actionneur.



2 Chaîne d'informations

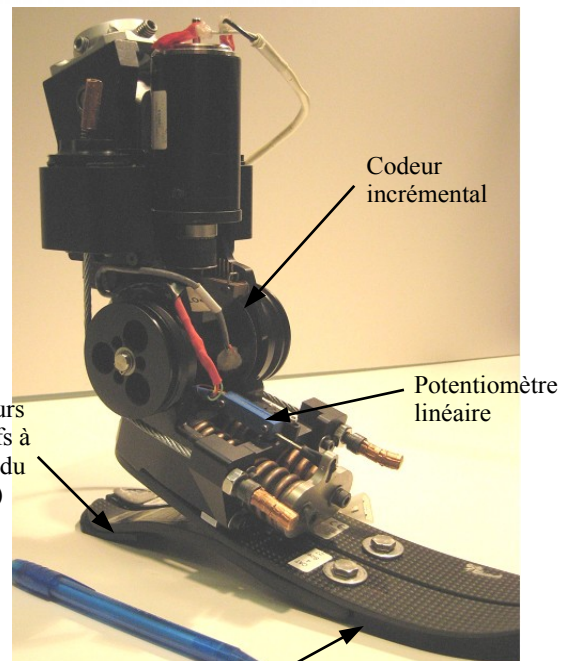
La chaîne d'informations est constituée d'un ensemble de capteurs permettant d'acquérir différentes informations :

- un potentiomètre linéaire qui mesure l'allongement/écrasement du ressort,
- un codeur incrémental placé au niveau de l'articulation pied/tibia,
- plusieurs capteurs capacitifs disposés sous la semelle du pied au niveau du talon T_a et à l'avant du pied P .

Les informations délivrées par les capteurs sont traitées par un ordinateur qui élabore la commande en tension du moteur, u_M appliquée par l'amplificateur.

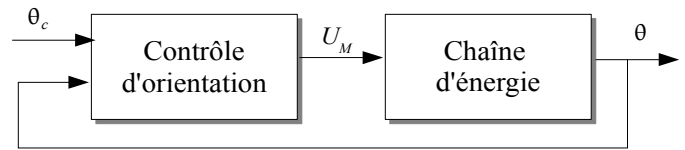
Cette commande est définie suivant deux modes hiérarchiques :

- le premier de niveau haut, définissant les modes de commande à adopter (choix du type d'asservissement)
- le deuxième de niveau bas, contrôlant le processus suivant l'asservissement défini.

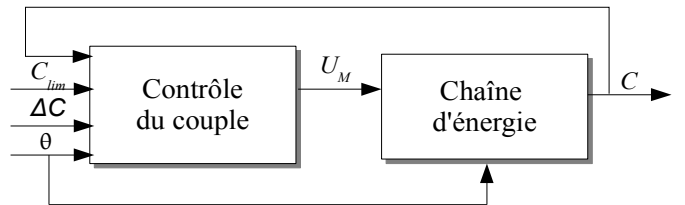


Pour obtenir la loi de consigne $C_{th}(\theta)$ souhaitée, l'asservissement s'effectue en position ou en couple.

- Pendant la phase oscillante (le pied n'est plus en contact avec le sol), un asservissement de position est réalisé (contrôle d'orientation du pied).
- Pendant la phase d'appui, l'asservissement retenu doit permettre :
 - d'ajuster les pentes de la courbe $C_{th}(\theta)$ en fonction du signe de θ
 - d'ajouter un couple ΔC à partir du moment où le couple dépasse une valeur limite C_{lim} et ce jusqu'au moment où le pied n'est plus en contact avec le sol.



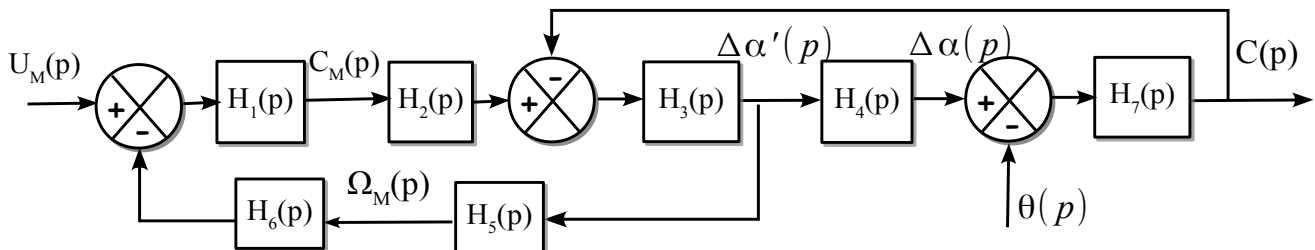
Mode de commande en orientation



Mode de commande en couple

On retient donc pour cette phase un pilotage en couple.

Modélisation de la chaîne d'énergie (Annexe 3)



avec les grandeurs temporelles suivantes :

- u_M tension d'alimentation du moteur (V)
- C_M couple exercé par le moteur (N·m)
- ω_M vitesse angulaire du moteur (rad·s⁻¹)
- α angle de rotation du basculeur (rad) tel que $\alpha = \alpha_r + \Delta\alpha$ où α_r est la position repos et $\Delta\alpha$ est la variation angulaire autour de la position repos (voir annexe 5 ci-après). On a alors : $\frac{d\alpha}{dt} = \frac{d\Delta\alpha}{dt}$. On note $\Delta\alpha'(p)$ la transformée de Laplace de $\frac{d\Delta\alpha}{dt}$
- θ angle de rotation du pied (rad) tel que $\theta = 0$ rad pour la position repos
- C couple exercé par le pied (N·m).

On note en majuscule, lorsque cela est possible, les variables associées aux grandeurs temporelles dans le domaine symbolique.

Caractéristiques du moteur à courant continu (Annexe 4)

Moteur Maxon RE40

Tension maximale u_{max} : 16 V	Résistance R : 1 Ω
Vitesse angulaire maximale sans charge N_{max} : 7600 tr·min ⁻¹	Constante de couple k_c : 0,02 N·m·A ⁻¹
Couple maximal (pic) C_{max} : 2,5 N·m	Constante de f _{cem} $k_e = k_c$: 0,02 V·s
Courant sans charge : 0,07 A	Inertie du rotor J_M : 1,34·10 ⁻⁵ kg·m ²

Paramétrage de la prothèse (Annexe 5)

- Le repère $R_0(O, \vec{x}, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ est lié au tibia noté 0 fixe dans toutes nos études. Ce repère est supposé galiléen (hypothèse justifiée dans le sujet).
- Le repère $R_1(O, \vec{x}, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$ est lié au pied artificiel noté 1, supposé indéformable. On note $\theta(t) = (\vec{y}_0, \vec{y}_1) = (\vec{z}_0, \vec{z}_1)$ l'angle de rotation du pied par rapport au tibia. D'autre part, le vecteur unitaire \vec{n}_1 définit la direction des ressorts avec $\delta = (\vec{y}_1, \vec{n}_1)$ considéré comme constant tout au long du cycle de marche.
- Le repère $R_2(O, \vec{x}, \vec{y}_2, \vec{z}_2)$ est lié au basculeur noté 2. On note $\alpha(t) = (\vec{y}_0, \vec{y}_2) = (\vec{z}_0, \vec{z}_2)$ l'angle de rotation du basculeur par rapport au tibia.
- Le repère $R_3(A, \vec{x}, \vec{y}_3, \vec{z}_3)$ est lié au vérin électrique 3. On note $\beta(t) = (\vec{y}_0, \vec{y}_3) = (\vec{z}_0, \vec{z}_3)$ l'angle de rotation du vérin électrique par rapport au tibia. Le vérin électrique comporte une tige notée 3_1 et un corps noté 3_2 .

On pose : $\vec{OA} = a\vec{z}_0$, $\vec{BA} = \lambda(t)\vec{y}_3$, $\vec{BO} = b\vec{y}_2$, $\vec{SO} = b\vec{z}_2$ avec $b = 0,039$ m et $a = 0,117$ m

En l'absence d'action sur la prothèse, une position repos est identifiée par les paramètres θ_R , α_R et δ_R . Cette position est notamment obtenue lorsque le tibia est vertical et que le pied est en appui horizontalement sur le sol. Les valeurs numériques sont alors : $\theta_R = 0^\circ$, $\alpha_R = 9^\circ$ et $\delta_R = \delta = -17^\circ$.

Afin de linéariser le comportement autour de la position repos, on écrira le cas échéant :

- $\alpha = \alpha_R + \Delta\alpha$
- $\theta = \theta_R + \Delta\theta = \Delta\theta$ avec $\Delta\alpha$ et $\Delta\theta$ les variations angulaires autour de la position repos.

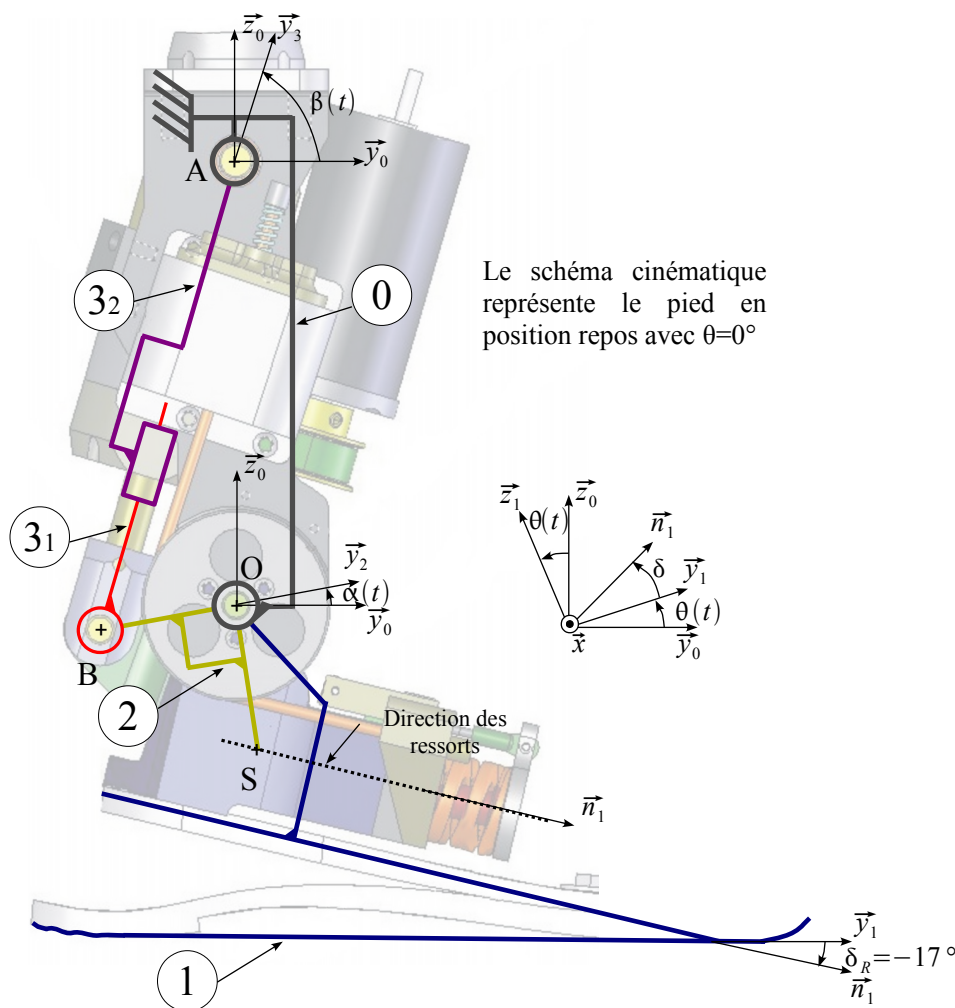


Schéma cinématique de la prothèse en position repos