Locomotion / biomécanique 2019- TD4

Rémi Hackert
hackert@mnhn.fr

Exercice 1 : Coût énergétique de la marche humaine en pente.

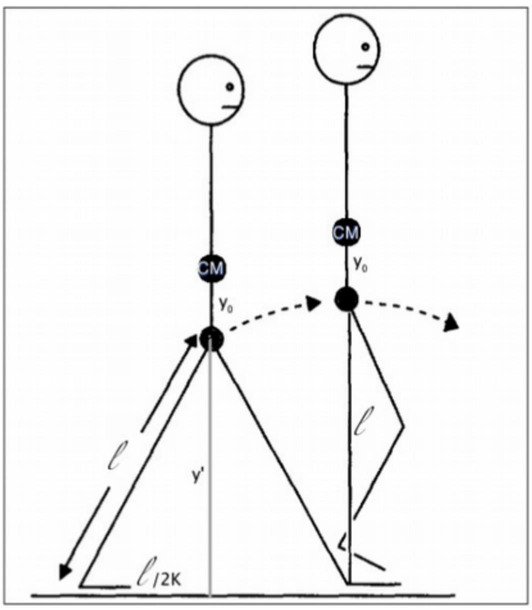
Au cours de la marche humaine, l’alternance des freinages et accélérations nécessite de réinjecter de l’énergie à chaque cycle, et ce malgré les phénomènes de transfert entre énergie potentielle et énergie cinétique qui limitent ces déperditions (modèle du pendule inverse). Le transfert d’énergie n’est en effet pas complet et a été estimé au mieux à environ 70% (Cavagna et Heglund, 1977). A chaque pas il faut donc réinjecter par du travail musculaire un peu d’énergie.

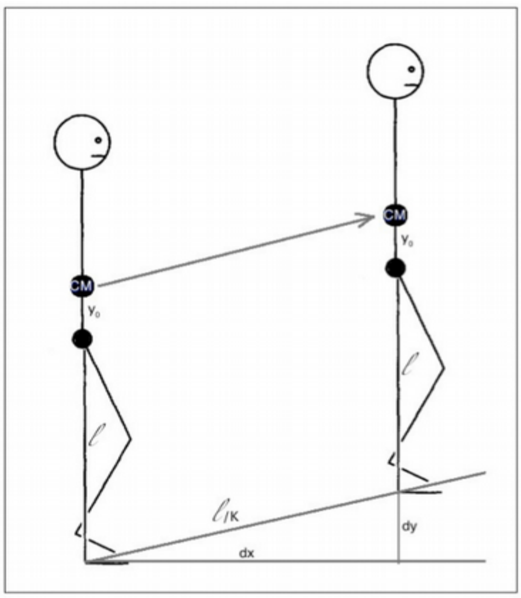
Quand on monte une pente de l’énergie est en outre nécessaire pour augmenter l’énergie potentielle de gravitation. Quand on descend par contre, l’énergie potentielle est transformée en énergie cinétique et le corps doit travailler négativement pour freiner. Il utilise l’étirement des muscles et transforme cette énergie en chaleur (Cavagna 1988).

L’énergie nécessaire à une descente (le travail de freinage) ne représente que 1/4 à 1/5 ème de celle nécessaire à une montée de même pente (établi par Kamon 1970 via des mesures respirométriques).

Margaria (1976) a mesuré la consommation d’oxygène pendant la marche et montré qu’elle était minimum pour une marche le long d’une pente négative de -10 %. Nous allons tenter de retrouver le résultat expérimental de Margaria par des considérations énergétiques simples autour du modèle du pendule inverse.

(NB : Une autre étude expérimentale menée par Minetti (1993) a montré que le coût énergétique minimum ne dépendait pas de la vitesse.)





Estimons d'abord les énergies en jeu pendant une marche tranquille à 1,25m/s:
Estimez l'énergie cinétique par kg transporté.
Les variations de hauteur du CdM sont d'environ 10cm. Estimez les variations d'énergie potentielle en jeu par kg.
Gottschall (2006) a quantifié la variation de vitesse du au freinage/re-accélération à chaque pas lors d'une marche sur terrain plat : il a trouvé des variations de vitesse de 0.09 m/s sur terrain plat et en descente des variations allant jusqu' à 0,18m/s.

Calculez à quelle variation de l'énergie cinétique ces variations de vitesse correspondent et comparez au variation de l'énergie potentielle calculée plus haut. Conclusion ?

On se concentre donc désormais sur l'énergie potentielle.
Et on considère notre modèle (voir graphique) . Le pas est en général plus petit que la longueur l de la jambe quand on marche. Et on notera donc l/k le pas, k étant un paramètre >1.

On note y_{max} le point haut atteint par le CdM (au dessus du pivot); exprimez le en fonction de l et y0.
On note y_{min} le point bas atteint par le CdM (double appui) ; exprimez le en fonction de y' et y0.

Appliquez le théorème de Pythagore dans le triangle rectangle (double appui) et isoler y'. Injectez l'expression de y' dans l'expression de y_{min}.
En déduire l'oscillation $\Delta y=y_{max}-y_{min}$. Et la variation d'énergie potentielle associée $\Delta U_{osc.}$ pendant un pas sur terrain plat.

Maintenant considérons la situation en pente. A chaque pas de longueur l/k, l'avancée horizontal est dx et la montée est dy. Exprimer la pente *i* en fonction de dy et dx. Isoler dy .

Appliquer le théorème de Pythagore dans le triangle rectangle et remplacer dy par sa valeur. Isoler dx et en déduire dy puis la variation d'énergie potentielle due a la pente $\Delta u_{grad.}$ C'est l'énergie qu'il faut injecter par pas pour surmonter la pente.

En déduire le coût énergétique net par pas que l'on notera E_{cost} lors d'une montée.

Dans le cas d'une pente descendante, il faut alors travailler négativement pour freiner : le coût est alors -1/5 de l'énergie à transférer E_{cost} . (Kamon 1970).

Représentez graphiquement pour différentes valeurs du paramètre k (1.5 ; 1.25 ; 1), la courbe de E_{cost} en fonction du gradient de la montée i.

Conclusions

Si nous nous plaçons maintenant dans le cas où l'énergie E_{cost} est minimale en valeur absolue c'est à dire nulle, trouver alors la relation entre i et k. Cette relation donne l'enjambée qu'il faut avoir pour monter à coût minimum une pente de gradient i.
Vous pourrez représenter graphiquement l'allure de la fonction.

Exercice 2 : Le Head-bobbing du pigeon.

Dans cet exercice on s'intéresse au mouvement de tête du pigeon alors qu'il s'approche du banc sur lequel vous vous êtes assis(e) pour chaparder les miettes qui tombent de votre pain au chocolat.
En fait la tête du pigeon ne fait pas d'aller-retour comme cela semble le cas à première vue. A bien y regarder, la tête est projetée 2 centimètres vers l'avant (phase de projection), puis s'immobilise par rapport à l'environnement (phase de maintien) et c'est le tronc de l'animal qui vient se replacer sous la tête, et ensuite on recommence.
On se place dans un repère lie au sol, l'axe des abscisses est parallèle au sol

- Représenter qualitativement sur un graphique l'allure de l'abscisse de la tête en fonction du temps lorsque le pigeon se déplace en ligne droite. Indiquer y les phases de projection et de maintien.
- On considère notre pigeon comme compose de deux masses l'ensemble tronc-patte-ailes d'un coté, et la tête de l'autre.

Au repos le centre de masse de l'ensemble tronc-pattes-aile et le centre de masse de la tête sont séparés horizontalement de 5cm.
La tête pèse seulement 1/20 ème du poids total de l'animal (200g) .
La projection en avant de la tête va entraîner un déplacement horizontal du centre de masse total de l'animal que vous calculerez.