

# Travaux Pratiques

## Étude expérimentale de la locomotion bipède

Antoine Amarilli

Cette séance de travaux pratiques notée s'intéresse aux fondements théoriques et à la mise en œuvre expérimentale de la méthode dite de *locomotion bipède*. Elle se compose de 5 parties, chacune dépendant des parties précédentes. Le travail à accomplir est *strictement personnel*, et devra faire l'objet pour chaque question d'une vérification par le responsable de séance. En complément des mentions explicitement requises par le sujet, on ne manquera pas de formuler, lors de la rédaction du compte-rendu de TP, toute observation pertinente que l'on souhaiterait porter à la connaissance du correcteur. L'usage de la calculatrice n'est pas autorisé.

### Considérations préliminaires

La *locomotion bipède* ou *bipédie* est un mode de déplacement qui se caractérise par l'utilisation alternée de deux membres postérieurs comme point d'appui pour parvenir à un déplacement. Au cours de cette séance de TP, on cherchera à mettre en évidence la bipédie chez l'être humain, à l'aide un expérimentateur que l'on supposera apte à la pratique de cette discipline.

**Question 0.** Examiner attentivement le corps de l'expérimentateur, et en identifier les membres. (On rappelle à toutes fins utiles qu'un *membre* est une partie extérieure allongée du corps, mais que la *tête* n'est pas considérée comme un membre.) Préciser quels sont les membres *postérieurs*, et quels sont les membres *antérieurs*.

Pour s'assurer des meilleurs résultats possibles lors de la mise en œuvre de la bipédie, on prendra soin de choisir une surface adaptée à la pratique de celle-ci. La surface devra impérativement être solide, plane, horizontale, et ne pas comporter d'obstacles ou de relief. Toutefois, et notamment au cours des premiers tests, on pourra choisir une surface d'expérimentation directement adjacente à un objet solide et stable placé à hauteur d'homme, par exemple une rampe ou à défaut une table, ce qui permettra à l'expérimentateur de se rattraper en cas d'incident lors de la manipulation. Dans cette configuration, il conviendra de positionner l'expérimentateur selon une orientation adaptée, de sorte que son déplacement s'opère suivant une direction approximativement parallèle à l'objet choisi, sans être gêné par celui-ci. Au cours de l'expérience, et même lorsque le sujet ne le précise pas explicitement, on pourra interrompre à tout moment la manipulation et faire appel aux membres antérieurs pour retrouver l'équilibre. On évitera en particulier toute chute susceptible d'endommager ou de fausser le matériel utilisé au cours de l'expérience.

On rappelle enfin que la lecture du sujet de TP est susceptible de mobiliser les membres antérieurs, les facultés sensorielles, et l'attention de l'expérimentateur. Il est ainsi recommandé de prendre connaissance des questions au préalable, et de ne pas manipuler le sujet pendant que l'on procède aux expériences.

Dans toute la suite du sujet, on fera l'hypothèse que les membres postérieurs sont les *seules* parties du corps de l'expérimentateur qui sont susceptibles d'entrer en contact avec la surface expérimentale.

En particulier, sauf dans l'éventualité d'une chute, il ne sera jamais utile ou nécessaire de prendre en compte la possibilité qu'un membre *antérieur* ne vienne à toucher la surface. Ainsi, les modes de locomotion dits à *quatre pattes* ou de *marche sur les mains*, et autres techniques avancées de ce type, ne seront pas étudiées dans le cadre de cette séance.

## 1 Pratique de l'étape élémentaire gauche de bipédie

Dans cette partie, on cherche d'abord à mettre en œuvre une première étape élémentaire du processus de bipédie, que l'on conviendra d'appeler *gauche* étant donné les choix de latéralité que l'on sera amené à faire. Cette *étape élémentaire gauche* constituera une étape importante de la locomotion bipède proprement dite, telle qu'elle sera étudiée par la suite.

**Question 1.** Placer l'expérimentateur en position debout sur la surface d'évolution. Identifier les membres postérieurs et vérifier que ceux-ci sont fermement en contact avec la surface. Rappeler l'orientation conventionnelle donnée à l'espace ambiant, et utiliser celle-ci pour identifier le membre postérieur *gauche* et le membre postérieur *droit*. Pour le bon déroulement de la suite de la manipulation, il est conseillé de placer les membres postérieurs gauche et droit à proximité l'un de l'autre sur la surface de locomotion. (On les maintiendra cependant séparés afin qu'ils puissent évoluer indépendamment, et on vérifiera en particulier que l'un ne repose pas sur l'autre.)

*Attention :* On prendra bien soin, dans la suite de cette partie, à ne pas confondre les deux membres postérieurs identifiés par l'orientation choisie. Dans la suite de cette partie, si l'une des manipulations demandées semble particulièrement périlleuse, il est recommandé de se manifester auprès du responsable de séance, afin que celui-ci puisse vérifier que la gauche et la droite ont été correctement identifiées.

**Question 2.** À partir de la station debout, en gardant appui sur le membre postérieur *droit*, fléchir le membre postérieur *gauche* afin de le soulever au-dessus de la surface expérimentale. On remarquera qu'au terme de cette manipulation, si celle-ci a été correctement effectuée, le sujet repose entièrement sur le membre postérieur *droit*.

**Question 3.** À partir de la position obtenue à la question précédente, peut-on *aisément* fléchir le membre postérieur *droit* et le lever au-dessus de la surface, tout en maintenant le membre postérieur *gauche* dans sa position précédente ? Proposer une justification physique au phénomène observé. (On ne cherchera pas, dans cette question, à effectuer un *saut* : ceci sera étudié dans la partie 4.)

**Question 4.** À partir de la position obtenue en question 2, déplacer le membre postérieur *gauche* vers l'avant, suivant le plan frontal, sur une distance de l'ordre du décimètre. On aura soin de maintenir ce membre au-dessus de la surface expérimentale tout au cours du déplacement. Que peut-on dire de l'évolution de la position du centre de gravité du sujet suivant son axe dorso-ventral ? Commenter.

**Question 5.** Reposer le membre postérieur *gauche* sur la surface expérimentale, et rappeler quels membres postérieurs sont à présent en contact avec celle-ci. Comparer la position courante avec celle considérée à la question 1, et observer que l'emplacement exact du sujet a changé ; on dit qu'il y a eu *déplacement*. On portera également attention à la position relative du membre postérieur *gauche* et du membre postérieur *droit* au terme de la procédure étudiée : celle-ci sera utile pour traiter les questions précédentes.

## 2 Pratique de l'étape élémentaire droite de bipédie

Cette section s'intéresse à une variante de l'étape élémentaire gauche étudiée dans la partie 1.

**Question 6.** Dans la question 1, on a supposé que les membres postérieurs avaient été initialement placés au même niveau sur la surface. Si ceux-ci avaient été initialement placés dans la situation obtenue à la fin de la question 5, quelles difficultés auraient fait obstacle à la mise en œuvre de la technique étudiée dans la partie précédente ? (On n'hésitera pas à mener prudemment l'expérience proposée afin d'identifier les étapes précises qui posent problème.) En déduire un jugement quant à la faisabilité d'effectuer successivement deux étapes élémentaires *gauches* de bipédie.

**Question 7.** On cherche dans cette section à mettre en œuvre l'étape élémentaire dite *droite*, par analogie avec l'étape gauche précédemment étudiée.

En s'inspirant du protocole expérimental de la section 1, proposer une manœuvre permettant de soulever le membre postérieur *droit* en gardant appui sur le membre postérieur *gauche*, et de le reposer devant celui-ci. Après contrôle du responsable de séance, vérifier expérimentalement que la manœuvre proposée peut être effectivement accomplie.

*Indication :* On pourra chercher à adapter la manipulation de la section précédente en inversant la latéralité, c'est-à-dire en faisant jouer au membre postérieur *gauche* (respectivement, *droit*) le rôle du membre postérieur *droit* (respectivement, *gauche*).

**Question 8.** Comme à la question 4, observer l'évolution de la position du centre de gravité du sujet au cours de la manœuvre. En conclure, comme à la question 5, qu'il y a eu *déplacement* au cours de l'étape élémentaire droite de bipédie, et en préciser l'orientation suivant l'axe dorso-ventral.

**Question 9.** Étudier le sujet expérimental et préciser quels sont ses plans de symétrie. En déduire un raisonnement expliquant les rapports qu'entretiennent l'étape élémentaire *gauche* et l'étape élémentaire *droite* de bipédie, et l'orientation des déplacements observés.

**Question 10.** Analyser la position relative des membres postérieurs au terme d'une étape élémentaire *droite* de bipédie. Comparer le résultat obtenu avec celui de la question 5, qui porte sur une étape élémentaire *gauche*. Que peut-on dire, en conséquence, des difficultés identifiées à la question 6, si l'on cherchait à effectuer successivement deux étapes élémentaires *droites* de bipédie ?

## 3 Combinaison des étapes élémentaires et pratique de la bipédie

Dans cette section, on s'intéresse à la combinaison des étapes élémentaires gauche et droite de bipédie, telles qu'étudiées dans les deux parties précédentes.

**Question 11.** Comparer les résultats obtenus à la question 5 et 6 et à la question 10. Sur la base de cette comparaison, formuler une proposition consistant en une séquence d'étapes élémentaires qui permette d'éviter les difficultés précédemment rencontrées. En utilisant la réponse apportée à la question 9, estimer les effets totaux attendus de la manipulation proposée sur le déplacement du dispositif expérimental.

*Indication :* On pourra chercher à employer alternativement les deux types d'étapes élémentaires.

**Question 12.** Mettre en œuvre expérimentalement la démarche proposée, en procédant à la répétition d'un petit nombre d'étapes élémentaires. Observer l'effet cumulé en termes de déplacements du sujet expérimental au cours de ces étapes. Comment cet effet se compare-t-il à la taille des membres du sujet lorsque le nombre de répétitions des étapes élémentaires devient suffisamment grand ? Conclure quant à la possibilité pour le sujet de procéder à un déplacement sur des distances plus grandes que la taille de ses membres. Ce résultat vous paraît-il inattendu ? Commenter.

**Question 13.** En procédant à des relevés chronométriques, estimer l'ordre de grandeur de la vitesse de déplacement qui peut être atteinte avec la bipédie. Par des considérations portant sur l'endurance et la longévité d'un être humain standard, déduire de cette mesure une estimation de la *portée effective* de la bipédie, c'est-à-dire une majoration raisonnable sur les distances qu'il est commode de parcourir en utilisant cette méthode.

**Question 14.** On considère dans cette question les autres modes de locomotion connus, qui s'appuient sur un moyen de transport mécanique extérieur au sujet. Rappeler deux tels modes de locomotion, en particulier l'ordre de grandeur de leurs vitesses et de leur portées effectives, et les comparer à la bipédie. Quels sont les avantages de la bipédie, et ses inconvénients, en comparaison avec ces modes de locomotion ? Commenter brièvement les enjeux de cette dernière, et ses perspectives d'applications industrielles et sociétales.

## 4 Prolongements

Cette section vise à étudier d'autres modes de locomotion possibles pour l'être humain, qui sont voisines de la bipédie. On ne cherchera pas à aborder cette section avant d'avoir répondu à toutes les questions précédentes.

**Question 15.** Dans cette question, on s'intéresse à un mode de locomotion où les deux membres postérieurs jouent un rôle pleinement symétrique, c'est-à-dire qu'ils sont, à tout moment, soit simultanément en contact avec la surface expérimentale, soit simultanément au-dessus de celle-ci.

En faisant appel à une phase initiale dite de *prise d'élan*, proposer un protocole expérimental permettant de passer de l'état de station debout à un état où les deux membres postérieurs sont simultanément au-dessus de la surface expérimentale. Cette position peut-elle être maintenue pendant une période prolongée ? Commenter, d'un point de vue physique, les conséquences qui s'ensuivent nécessairement. Cette technique est appelée *saut à pieds joints*.

En orientant la direction du *saut*, montrer que l'on peut parvenir à réaliser un déplacement à l'aide du saut. Le saut est-il sujet aux mêmes limitations que celles soulevées aux questions 5 et 10 ?

**Question 16.** En s'inspirant du *saut à pieds joints*, et notamment de la *prise d'élan*, proposer une méthode permettant d'effectuer un déplacement, où le membre postérieur *droit* reste au-dessus du sol pendant la totalité du processus, possiblement à l'exception de la phase de mise en place. On pourra par exemple commencer à partir de la position atteinte à la question 2. Commenter le résultat obtenu vis-à-vis de ce qui a été expliqué à la question 3. Cette technique est appelée *saut à cloche-pied gauche*.

**Question 17.** De la même manière que dans la partie 2, proposer un protocole pour le *saut à cloche-pied droit*. Étudier notamment l'orientation du déplacement obtenu en comparaison avec la question précédente, et l'expliquer par des considérations de symétrie en s'inspirant des questions précédentes.

**Question 18.** Remarquer que toutes les méthodes étudiées jusqu'à présent comportent au moins une phase pendant laquelle il y a au moins un membre postérieur qui n'est plus en contact avec la surface expérimentale. Observer qu'il est possible de faire glisser les membres postérieurs sur la surface, et en déduire un mode de locomotion où les deux membres postérieurs restent tous deux en contact avec la surface à toute étape du déplacement. Discuter des avantages et inconvénients de ce mode de locomotion par rapport aux modes précédemment étudiés, notamment en termes de stabilité et de vitesse de déplacement.

À l'inverse, si l'on s'interdit de faire glisser ou pivoter les membres postérieurs sur la surface, expliquer pourquoi, dans toute technique permettant d'aboutir à un déplacement, il doit nécessairement y avoir une phase où l'un des membres postérieurs n'est plus en contact avec la surface. Montrer également que, sous cette hypothèse, toute technique pour accomplir de grands déplacements (relativement à la taille des membres du sujet) doit nécessairement comporter, pour chaque membre postérieur, un grand nombre de phases où ce membre postérieur cesse d'être en contact avec la surface.

**Question bonus.** En adaptant la séquence proposée à la question 11 pour utiliser le saut à cloche-pied gauche et le saut à cloche-pied droit (questions 16 et 17) à la place de l'étape élémentaire gauche et de l'étape élémentaire droite de bipédie, proposer un nouveau mode de locomotion, comportant alternativement une phase de contact d'un unique membre postérieur avec la surface expérimentale et une phase où aucun membre postérieur n'est en contact avec celle-ci, la latéralité du membre de contact alternant elle-même entre *gauche* et *droit* au sein des phases de contact.

Commenter l'ordre de grandeur de la vitesse de déplacement que l'on peut espérer obtenir avec cette méthode. On notera que, lorsque l'on maîtrise bien le dispositif expérimental, ce mode de locomotion, appelé *course*, peut permettre d'obtenir une vitesse de déplacement supérieure à celle de la locomotion bipède classique étudiée dans le cadre de cette séance de TP.