

## Dans ce chapitre :

### Perspectives des études 130

Les approches quantitatives et qualitatives 130

Cinématique versus cinétique 133

### Modèles biomécaniques du mouvement humain 133

Le modèle de la particule 133

Le modèle segmentaire simplifié 134

Le modèle à segments rigides 135

Étapes d'analyse 135

### Types de mouvements 135

Mouvement linéaire 135

Mouvement angulaire 136

Mouvements communs 136

### La création du mouvement 136

Calculer un moment de force 138

### Forces représentées par des vecteurs 141

Force nette 143

### Concepts de masse et d'inertie 143

Première loi de Newton :

l'inertie 145

### Concepts de force et d'accélération 145

Deuxième loi de Newton :

l'accélération 145

### Concepts d'impulsion, d'impact et de quantité de mouvement 145

### Concept d'action-réaction 147

Troisième loi de Newton :

action-réaction 147

### Mouvement d'un projectile 149

Maximiser une distance verticale et une distance horizontale 149

Départ et réception à différentes distances verticales 150

Résistance de l'air 150

Maximiser la distance horizontale 150

### La dynamique des fluides 151

Forces de traînée :

l'aérodynamique 152

La traînée de surface 152

La traînée de forme 152

Forces de portance des fluides 154

L'angle d'attaque 155

L'effet Magnus 155

### Contrôle de l'équilibre et de la stabilité 157

L'équilibre 157

La stabilité 157

Facteurs associés à l'équilibre 158

### Cinétique angulaire 159

Forces tangentielles 159

### Conservation du mouvement d'un corps 160

Rotations durant une phase d'envol 160

### Analyse qualitative du mouvement humain 162

L'objectif de la tâche 163

Analyser la tâche 163

Observation de la performance 164

Détection et correction des erreurs 165

### Sommaire 166



Explorons la biomécanique....

# CHAPITRE 7



## Comment est-ce que je bouge ? La science de la biomécanique

**A**près avoir terminé ce chapitre, vous devriez pouvoir :

- distinguer les différents types de mouvements humains et leur cause ;
- identifier les lois de Newton et présenter des applications pratiques de ces lois ;
- décrire le mouvement et la trajectoire d'un projectile ;
- décrire le principe de conservation de la quantité de mouvement d'un corps et expliquer pourquoi les changements de position d'un corps en vol affectent sa vitesse angulaire ;
- expliquer le rôle de la friction dans le contexte de la dynamique des fluides ;
- évaluer qualitativement le mouvement humain.



**L**es capacités du corps humain semblent infinies. Des premiers pas d'un enfant jusqu'à une performance olympique, la diversité des mouvements humains possibles suscite l'émerveillement. Vous avez sûrement pu observer la puissance d'impulsion d'un gymnaste dans les airs à partir du sol avant d'exécuter plusieurs saltos et de retomber sur ses pieds, ou encore peut-être avez-vous vu une plongeuse exécuter des rotations sur plusieurs axes avant d'entrer dans l'eau avec délicatesse et précision. Quels sont les facteurs qui génèrent de tels mouvements ? Comment peut-on les décrire ? Existe-t-il des limites à nos capacités physiques ? La biomécanique, une des sciences de l'activité physique, a pour but de déterminer les causes et effets du mouvement humain.

La **biomécanique** est une science qui examine les forces internes et externes qui agissent sur le corps humain ainsi que les effets produits par ces forces. En dépit du fait que la biomécanique est une science encore relativement jeune, plusieurs autres disciplines scientifiques suivent les concepts développés en biomécanique. De même, des professionnels dans divers domaines, y compris celui de la science de l'activité physique et de la santé, utilisent aujourd'hui les principes de la biomécanique. Les sciences telles la médecine, la physiothérapie, la kinésiologie, l'ingénierie biomédicale et même la zoologie, contribuent également au développement des savoirs sur les aspects biomécaniques des structures et des fonctions des organismes vivants.

Par exemple, la biomécanique permet de comprendre pourquoi les humains marchent comme ils le font, quels effets ont la gravité sur le système musculo-squelettique, quels déficits moteurs peuvent être rééduqués chez les personnes âgées et comment une prothèse peut aider un amputé à marcher normalement. Ces défis sont réels et ont un impact incontestable sur la vie de beaucoup de citoyens. Biomécaniciens et ingénieurs ont aussi significativement contribué à améliorer la performance et la sécurité dans les sports comme le design des roues et des casques protecteurs en cyclisme, l'amélioration de la position dans le saut à ski, et des techniques plus efficaces pour le lancer du disque. Vous êtes-vous déjà demandé pourquoi la balle de certains golfeurs tend à prendre une trajectoire courbe ou pourquoi les athlètes

du saut à la perche ont toujours de la difficulté à sauter malgré l'utilisation de perches en fibre de verre ?

Que ce soit au sujet de surfaces de jeux, de pièces d'équipement ou d'espadrilles, la biomécanique joue un rôle primordial dans les recommandations de ce qui est le plus efficace et le moins dangereux dans certaines pratiques sportives. Elle permet également d'expliquer comment les athlètes réussissent à optimiser leur performance. La recherche en biomécanique se poursuit actuellement dans le but de mieux comprendre ce genre de problème et de fournir des alternatives plus efficaces.

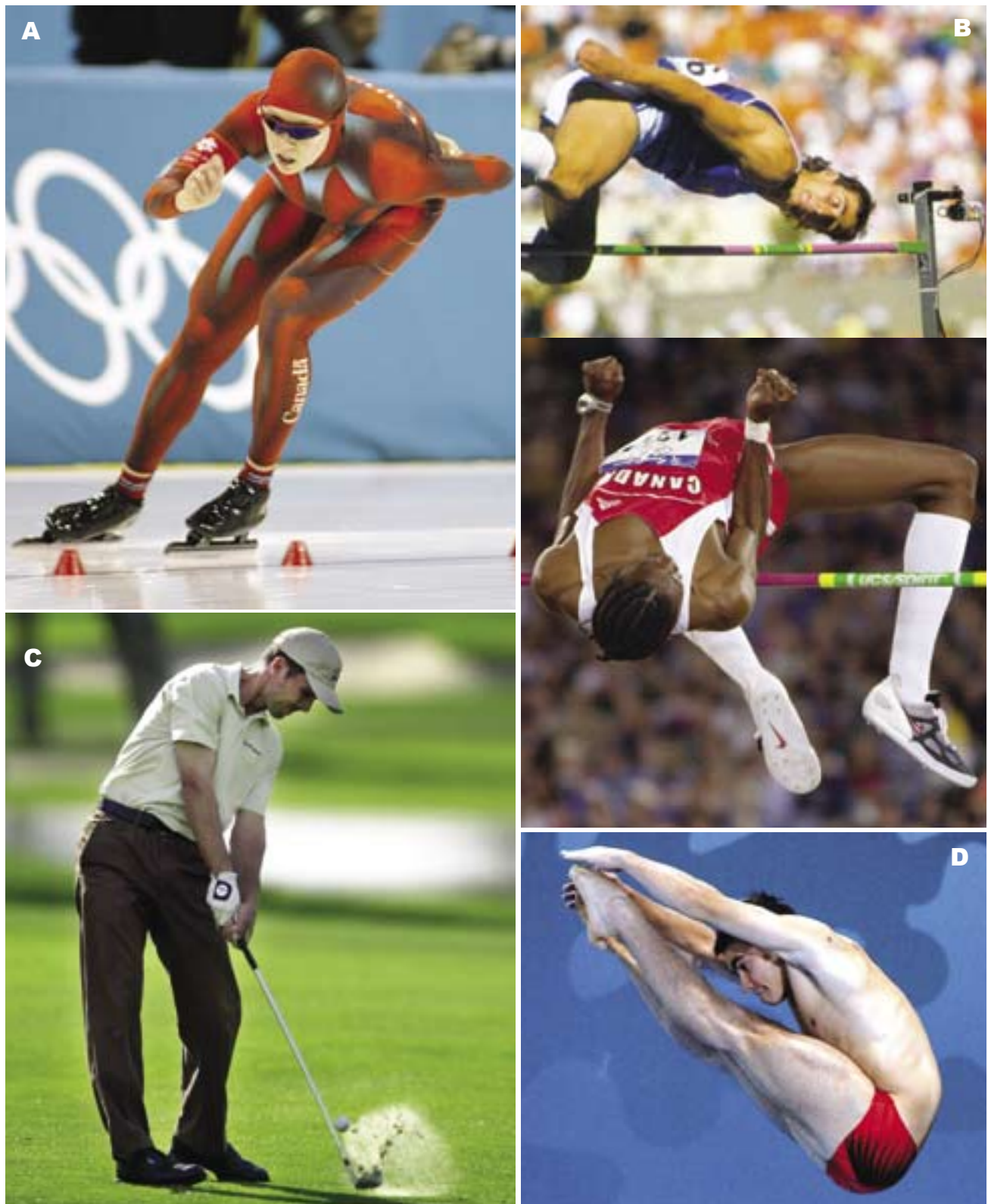
Il est certain que la recherche en biomécanique est très diverse et multidisciplinaire. Que ce soit pour l'analyse d'une technique ou pour le développement de nouveaux équipements, la biomécanique a significativement contribué au savoir sur le mouvement humain. Avant la venue des perches en fibre de verre, un saut à la perche de 6 mètres semblait impossible. La compréhension des principes mécaniques sous-tendus par les mouvements humains peut aider à résoudre des problèmes reliés à la santé et à la performance motrice humaine. Ce chapitre fournit les bases nécessaires pour identifier, analyser et répondre adéquatement aux questions liées à la biomécanique.

---

## Perspectives d'études

### Les approches quantitatives et qualitatives

Les biomécaniciens dévouent beaucoup de leur temps à réviser les techniques utilisées dans la mesure de variables biomécaniques qui sont considérées importantes pour optimiser la performance. Ces chercheurs peuvent ainsi explorer : (1) les forces exercées par le pied sur un bloc de départ au sprint ; (2) la séquence des contractions musculaires durant la course par le biais de l'électromyographie ; ou (3) les mouvements de chacun des membres lors d'un saut en hauteur par le biais de la cinématique haute vitesse tridimensionnelle ou un système d'analyse du mouvement automatisé. Ces études sont des exemples d'**analyses quantitatives** de la



**Figure 7.1** La biomécanique peut nous aider à comprendre les performances sportives et nous assister dans le développement de meilleures techniques d'enseignement et d'entraînement (A), en comparant les différentes techniques utilisées pour compléter une même tâche (B), et en améliorant les techniques de détection et de correction des erreurs (C, D).



## Variables cinématiques

### Temps

Combien de temps faut-il pour courir une distance définie, élaner un bâton au base-ball, faire une savate au karaté, ou préparer un saut au volleyball ? Combien de temps un plongeur est en vol avant d'entrer dans l'eau ? Les caractéristiques temporelles d'une performance peuvent être analysées soit sur la performance en entier ou sur une des phases du mouvement. Le temps calculé correspond à l'intervalle de temps entre le début et la fin de la phase ou du geste.

### Déplacement

Le **déplacement** indique la **longueur (ou distance)** et la **direction** de la trajectoire réalisée par un athlète entre le début et la fin d'une performance ou d'une portion du mouvement. Un sprinter peut courir 100 m vers l'est. Un joueur saute 0.8 m vers le haut pour contrer une attaque.

### Déplacement angulaire

Le **déplacement angulaire** mesure la direction et l'amplitude du plus petit **changement angulaire** entre la position angulaire initiale et finale. Lorsqu'on se met en station debout à partir d'une position assise, l'articulation du genou et de la hanche effectuent un déplacement angulaire de  $90^\circ$  et ce dans une direction opposée (horaire et anti-horaire). Un plongeur effectuant  $1\frac{1}{2}$  salto vers l'avant complète un déplacement angulaire de  $180^\circ$  dans le sens horaire ou anti-horaire, selon le point d'observation.

### Vélocité

La **vélocité** est la mesure du déplacement par unité de temps. On peut calculer la vélocité

instantanée, c'est-à-dire une vélocité calculée sur une période infiniment petite, ou encore, on peut calculer la vélocité moyenne (1 km couru en 2:30 min donne une vitesse moyenne de 11.1 m/s). Aux Jeux olympiques de 1996, Donovan Bailey a atteint une vitesse instantanée maximale de 12.1 m/s tandis que sa vitesse moyenne sur les 100 m était de 10.14 m/s (100 m / 9.86 s).

### Vélocité angulaire

La **vélocité angulaire** est la mesure du déplacement angulaire par unité de temps, ou encore, la vitesse à laquelle un corps tourne. La rotation du bras à l'épaule lors du lancé d'une boule de quilles a une vitesse angulaire plus petite que lors d'un lancé d'une balle rapide au base-ball.

### Accélération

L'**accélération** est le taux de changement de la vélocité. Dans beaucoup d'activités sportives, le succès provient de l'habileté de l'athlète à augmenter ou diminuer rapidement sa vitesse et/ou direction. Par exemple, il y a les changements de direction au football ou au basket-ball, un vol de but au base-ball, un sprint de 100 m, un lancé du poids, ou bien amortir une balle lors d'un attrapé.

### Accélération angulaire

L'**accélération angulaire** est la mesure du changement de la vélocité angulaire par unité de temps. Lors d'un soleil à la barre fixe, un gymnaste commence en appui tendu renversé et tourne autour de la barre. Avec la gravité, le gymnaste est soumis à une accélération angulaire durant sa descente et une décélération angulaire durant la remontée vers la position initiale.

performance et elles sont très utiles aux chercheurs.

Les entraîneurs et les éducateurs n'ont toutefois pas toujours accès à l'équipement nécessaire pour faire des analyses quantitatives et doivent alors avoir recours à l'information disponible par le biais de leurs sens, tels la vision et l'audition, afin d'évaluer les performances motrices qu'ils observent. Ce type d'analyse est nommé l'**analyse qualitative**. Une analyse qualitative nécessite un schéma de travail strict avec lequel on évalue la performance motrice.

C'est un ensemble de principes avec lesquels les mouvements sont analysés, une liste d'identification des erreurs et des techniques à utiliser pour corriger les erreurs observées. Une bonne analyse qualitative mène à une bonne analyse quantitative.

Que ce soit en travaillant avec des athlètes en développement ou avancés, les biomécaniciens peuvent fournir aux entraîneurs et éducateurs : (1) le savoir sur la mécanique d'un mouvement ; (2) un système de comparaison des techniques ; (3) des techniques



d'enseignement et d'entraînement améliorées ; et (4) des méthodes de détection et de correction des erreurs dans la performance motrice (figure 7.1).

## Cinématique versus cinétique

L'étude de la **cinématique** a pour but de décrire les caractéristiques spatiales et temporelles du mouvement humain. Ces variables sont utilisées pour décrire les mouvements linéaires et angulaires (voir l'encadré sur les *Variables cinématiques*). Elles répondent à quatre questions : a) à quelle distance ? ; b) à quelle vitesse ? ; c) avec quelle stabilité ? ; et d) en combien de temps le mouvement a-t-il été exécuté ?

La **cinétique**, d'autre part, a pour but de décrire les forces qui causent le mouvement. Les forces qui agissent sur le corps humain peuvent être **internes** ou **externes**. Les forces internes sont celles générées par les muscles qui tirent sur les os via leurs tendons ainsi que les forces observées sur les surfaces des articulations qui joignent les os entre eux. Les forces externes sont celles qui agissent sur le corps humain comme la **gravité** ainsi que toute force produite par le contact du corps avec le sol, l'environnement, l'équipement sportif ou même un adversaire. En général, les forces internes *causent* des mouvements segmentaires alors que les forces externes *affectent* les mouvements du corps.

---

## Modèles biomécaniques du mouvement humain

La biomécanique a été définie comme étant la science qui étudie les forces externes et internes agissant sur le corps humain ainsi que leurs effets. Par exemple, un joueur de hockey patinant sur la glace génère des forces internes avec ses jambes à chacun de ses coups de patins. Ces forces internes résultent en une séquence de poussées sur la glace avec la lame du patin. À chacune des poussées sur la glace, celle-ci renvoie une force sur le joueur de hockey et le résultat est un mouvement du joueur vers l'avant. D'autres forces externes telles que : la gravité, la masse du bâton de hockey, ou le plaqué d'un joueur adverse,

peuvent aussi agir sur le patineur. Chacune de ces forces externes causent à leur tour un effet sur le mouvement du corps humain.

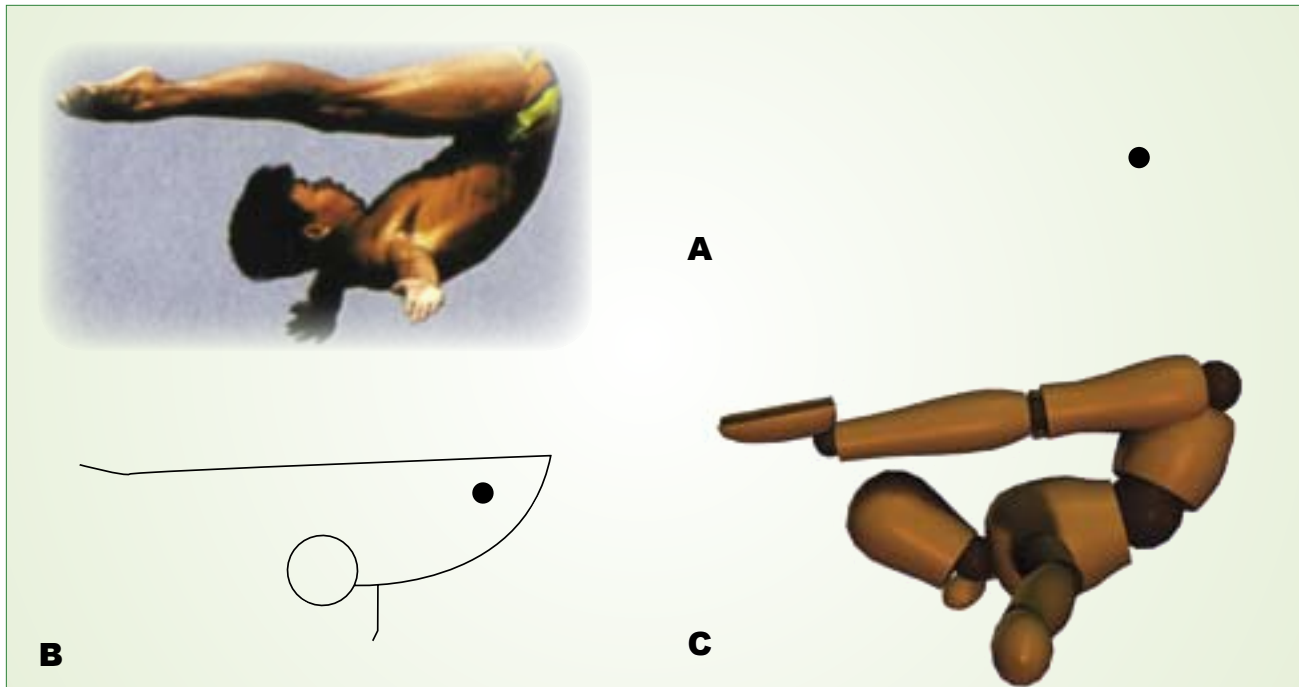
Tandis qu'on peut imaginer un joueur de hockey entrer en contact avec les planches, le corps humain avec ses os, muscles, tissus et organes, est en revanche trop complexe pour la plupart des analyses biomécaniques. Des différences anatomiques dues à la race, l'âge, le sexe, la santé et le style de vie, existent entre les individus. Tous les tissus corporels, y compris les os, subissent des déformations lors de mouvements sportifs. De plus, la nature multi-segmentaire du corps humain est telle qu'un même objectif moteur peut être achevé par le biais de plusieurs séquences de mouvements. Finalement, la grande majorité des mouvements sportifs se réalisent en trois dimensions ; ce qui rend l'observation et la compréhension du mouvement humain très complexe.

Afin de rendre l'étude du mouvement humain plus accessible, la biomécanique a adopté trois modèles de simplification du mouvement humain : le modèle de la particule, le modèle segmentaire simplifié et le modèle à segments rigides.

## Le modèle de la particule

Dans le **modèle de la particule**, un simple point représente le centre de masse d'un corps entier (voir l'encadré sur le *Centre de masse*, page 143 et la figure 7.2 A). Ce modèle est utilisé lorsqu'un corps est dans les airs. Quand un corps est dans les airs, il est libre de tout contact avec son environnement. Généralement, la gravité (voir l'encadré sur *La gravité*, page 144) est alors la seule force agissant sur le corps, et ce, par son centre de masse. Pour les objets qui atteignent une grande vitesse, tels les balles, les javelots et les disques, l'air devient alors une source significative de forces appliquées sur l'objet en plus de la gravité (voir figure 7.13, page 151). Cette force externe, connue sous le terme de résistance de l'air, affecte aussi le mouvement d'un corps.

Puisque le modèle de la particule ne représente que le centre de masse d'un corps, son application est limitée aux situations où le corps étudié est dans les airs. En situation sportive, ces situations incluent toute



**Figure 7.2** Trois modèles sont utilisés pour représenter le plongeur ci-dessus. **A.** Le modèle de la particule. **B.** Le modèle segmentaire simplifié. **C.** Le modèle à segments rigides. Le choix du modèle dépend de l'analyse biomécanique qu'on cherche à réaliser.

balle ou tout objet lancé, frappé ou botté, ainsi qu'un corps humain en phase d'envol durant un plongeon, un saut en hauteur ou une acrobatie. Dans tous ces exemples, le corps est considéré comme un projectile.

### Le modèle segmentaire simplifié

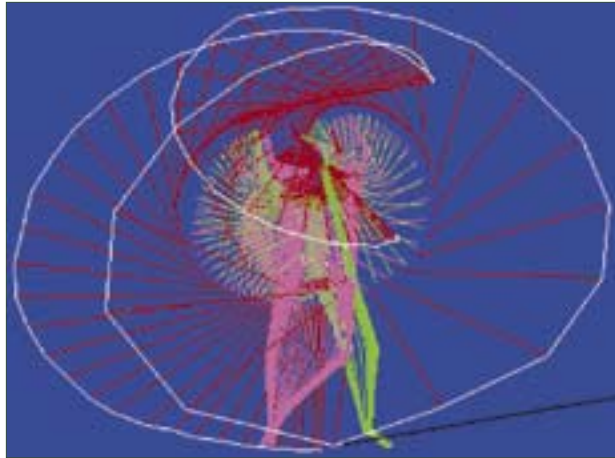
Pour les athlètes qui sont en contact direct ou indirect avec le sol (un tremplin de plongeon, par exemple) le **modèle segmentaire simplifié** est utilisé pour représenter leurs corps (figure 7.2 B). Les segments corporels sont représentés par des traits simples qui sont joints aux articulations. Un modèle segmentaire simplifié représente une approximation des positions et orientations des segments corporels, leurs liens (les articulations, par exemple) et leurs tailles. Les forces externes, représentées par des vecteurs, sont illustrées en fonction de leur action sur le modèle, et ce, à l'endroit où elles sont appliquées.

Le modèle segmentaire simplifié est utilisé pour représenter la configuration globale du corps entier durant une tâche motrice, et ce, dans deux dimensions. Un départ au sprint, une course et un

saut périlleux en sont de bons exemples. Toutefois, il est plus difficile de représenter des positions et mouvements plus subtils comme la position des doigts sur une balle de base-ball avec ce type de modèle. De plus, il ne permet pas de représenter directement des rotations longitudinales, que ce soit une rotation du corps entier (une vrille, par exemple) ou la rotation d'un segment (une pronation). Ainsi, ce type de modèle ne facilite pas la représentation de plusieurs mouvements du corps entier en trois dimensions.

Une séquence de figures utilisant le modèle segmentaire simplifié peut représenter un mouvement du corps entier ou d'un segment dans un **diagramme composite** (figure 7.3). Ces diagrammes fournissent une représentation du mouvement à l'étude à partir desquel nous pouvons nous représenter le mouvement réel dans notre tête. Toutefois, puisque le modèle segmentaire simplifié n'a que deux dimensions, il ne peut être complètement individualisé pour chaque athlète.

Le modèle segmentaire simplifié est préférable au modèle de la particule dans le sens que plusieurs



**Figure 7.3** Un diagramme composite donne une impression générale de la performance. Toutefois, tout mouvement hors du plan – en 2 dimensions – du diagramme n'est pas visible dans ce type de diagramme. Ainsi, la mesure exacte de la vitesse angulaire d'un mouvement au golf est difficile à saisir puisqu'une partie de l'élan est perpendiculaire au plan (mouvements avant-arrière sur l'image).

vecteurs peuvent être représentés sur un diagramme de corps libérés. Ces vecteurs peuvent représenter la gravité ou la résistance de l'air agissant sur le centre de masse ainsi que les forces de réaction (décrites plus loin dans ce chapitre) agissant sur le corps en contact avec son environnement. Certaines de ces forces peuvent créer des moments de force et ainsi générer une rotation du corps ou de certains de ses segments (figure 7.9, page 142).

## Le modèle à segments rigides

Un modèle élaboré en trois dimensions (3D) et utilisé par les biomécaniciens est le **modèle à segments rigides** dans lequel chacun des segments du corps est une forme irrégulière en 3D (figure 7.2 C). Ce modèle permet, entre autres, de modéliser la déformation complexe des segments corporels durant des activités vigoureuses.

## Étapes d'analyse

Les trois étapes préliminaires ci-dessous doivent toutefois être finalisées avant de pouvoir décrire le

mouvement d'un corps selon un des trois modèles biomécaniques.

### Étape 1

Identifier le système étudié : en d'autres mots, isoler l'objet analysé de toute structure environnante (bras, jambe, ou corps entier d'un coureur, figure 7.4).

### Étape 2

Identifier le schéma de référence (ou le système de coordonnées) dans lequel le mouvement prend place (un coureur qui change sa position par rapport au sol ainsi qu'à son point de départ ; figure 7.4). Bien que la plupart des sports soient généralement décrits dans deux dimensions (course, saltos), la majeure partie des activités sportives (ou certaines composantes) se réalisent dans les trois dimensions.

### Étape 3

Identifier le type de mouvements en cours, les **plans corporels** dans lequel/lesquels le mouvement prend place (sagittal, frontal, et transversal, voir chapitre 2), et les **axes de rotation** autour desquels le mouvement prend place (soit autour d'une articulation ou du corps entier).

---

## Types de mouvements

L'être humain est capable de réaliser un certain nombre de types de mouvements fondamentaux. On peut tout d'abord différencier les mouvements linéaires des mouvements angulaires, qui une fois combinés, forment des mouvements communs.

### Mouvement linéaire

Un **mouvement linéaire** se réalise quand toutes les parties du corps se déplacent d'une même distance et dans la même direction, et ce, au même moment. La descente en ski est un bon exemple de mouvement linéaire (figure 7.5 A). Un terme analogue au mouvement linéaire est la **translation** ; un terme qui réfère à un mouvement du corps