

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université A. Mira - Bejaia

Faculté des Sciences Humaines et Sociales

Département des Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives

BIOMÉCANIQUE

Polycopié de cours destiné aux étudiants de 2^{ème}
année Licence - STAPS

Présenté par

Dr. BENOSMANE ABDELMALIK BACHIR

Année universitaire 2024-2025

ملحق القرار رقم ١٨٤ / المؤرخ في 13 ديسمبر 2077

الذي يحدد برنامج التعليم لنيل شهادة الليسانس

في ميدان "علوم وتقنيات النشاطات البدنية والرياضية" "شعبة" "تدريب رياضي"

تخصص "التدريب الرياضي التنافسي"



السداسي 3:

نوع التقييم	مراقبة مستمرة	أخرى	الحجم الساعي للسامي (14 أسبوعاً)	الحجم الساعي الأسبوعي			المعامل	الأرصدة	عنوان المواد	وحدات التعليم
				أعمال تطبيقية *	أعمال مرجحة	دروس				
-	100%	-	00سا56	*00سا4	-	-	3	4	رياضات جماعية 1: كرة القدم / كرة اليد	وحدة تعليم أساسية الرمز: وت أس 1.1.2 الأرصدة: 10 المعامل: 8
-	100%	-	00سا56	*00سا4	-	-	3	4	رياضات قتالية 1: جيتو - مصارعة / كراتي دو - ملاكمة	وحدة تعليم أساسية الرمز: وت أس 1.1.2 الأرصدة: 10 المعامل: 8
-	100%	-	00سا28	00سا2	-	-	2	2	ثقافة بدنية 1	وحدة تعليم أساسية الرمز: وت أس 2.1.2 الأرصدة: 6 المعامل: 4
60%	40%	-	00سا42	-	30سا1	30سا1	2	3	نظرية ومنهجية التدريب الرياضي	وحدة تعليم أساسية الرمز: وت أس 2.1.2 الأرصدة: 6 المعامل: 4
60%	40%	-	00سا42	-	30سا1	30سا1	2	3	تعليمية النشاطات البدنية والرياضية	وحدة تعليم منهجية الرمز: وت م 1.2 الأرصدة: 9 المعامل: 4
60%	40%	-	00سا42	-	30سا1	30سا1	2	5	الإحصاء الاستدلالي	وحدة تعليم منهجية الرمز: وت م 1.2 الأرصدة: 9 المعامل: 4
60%	40%	-	00سا42	-	30سا1	30سا1	2	4	القياس والتقييم الرياضي	وحدة تعليم استكشافية الرمز: وت إس 1.2 الأرصدة: 4 المعامل: 3
60%	40%	-	00سا42	-	30سا1	30سا1	2	3	الميكانيكا الحيوية	وحدة تعليم استكشافية الرمز: وت إس 1.2 الأرصدة: 4 المعامل: 3
100%	-	-	00سا21	-	-	30سا1	1	1	علم النفس النمو	وحدة تعليم أيقية الرمز: وت أف 1.2 الأرصدة: 1 المعامل: 1
100%	-	-	00سا21	-	-	30سا1	1	1	لغة إنجليزية (تقنية)	وحدة تعليم أيقية الرمز: وت أف 1.2 الأرصدة: 1 المعامل: 1
-	-	-	00سا392	00سا10	30سا7	30سا10	20	30	مجموع السداسي الثالث	

* ملاحظة: المقاييس التطبيقية الخاصة بوحدة التعليم الأساسية 1 تدرس بحجم ساعي 4 ساعات أسبوعياً على حصتين مفصلتين (ساعتين لكل حصّة)



Annexe de l'arrêté n° 124 du 13 DEC. 2022

Fixant le programme des enseignements en vue de l'obtention du diplôme de Licence dans le domaine « Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives » filière « Entraînement sportif » Spécialité « Entraînement Sportif Compétitif »

Semestre 3 :

Unités d'enseignement	Intitulés des matières	Crédits	Coefficients	Volume horaire Hebdomadaire			VHS (14 semaines)	Autres	Mode d'évaluation	
				Cours	TD	TP*			Continu	Examen
UE Fondamentale Code : UEF 1.1.2 Crédits : 10 Coefficients : 8	Sport collectif 1: Foot-ball / Hand-ball	4	3	-	-	4h00	56h00	-	100%	-
	Sport de combat 1 : Judo- lutte -/ Karaté- Boxe	4	3	-	-	4h00	56h00	-	100%	-
	Culture physique 1	2	2	-	-	2h00	28h00	-	100%	-
UE Fondamentale Code : UEF 2.1.2 Crédits : 6 Coefficients : 4	Théorie et méthodologie de l'entraînement sportif	3	2	1h30	1h30	-	42h00	-	40%	60%
	Didactique des APS	3	2	1h30	1h30	-	42h00	-	40%	60%
UE Méthodologique Code : UEM 1.2 Crédits : 9 Coefficients : 4	Statistique appliquée	5	2	1h30	1h30	-	42h00	-	40%	60%
	Mesure et évaluation sportive	4	2	1h30	1h30	-	42h00	-	40%	60%
UE Découverte Code : UED 1.2 Crédits : 4 Coefficients : 3	Biomécanique	3	2	1h30	1h30	-	42h00	-	40%	60%
	Psychologie du développement	1	1	1h30	-	-	21h00	-	-	100%
UE Transversale Code : UET 1.2 Crédits : 1 Coefficients : 1	Langue anglaise (Technique)	1	1	1h30	-	-	21h00	-	-	100%
Total Semestre 3		30	20	10h30	7h30	10h00	392h00	-	-	-

* Observation : les quatre heures hebdomadaires des modules pratiques doivent être dispensées en deux séances distinctes (2h/séance).

السداسي: الثالث
عنوان الوحدة : وحدة التعليم الأساسية
المادة: الميكانيكا الحيوية

أهداف التعليم:

القواعد الأساسية والمعارف النظرية والتطبيقية المرتبطة بالتخصص.
الرفع من المستوى المعرفي والتقني والخططي للطلاب في التخصص.
الربط بين مختلف العلوم الطبيعية وعلاقتها بعلوم الرياضة.

المعارف المسبقة المطلوبة :

معرفة القواعد الأساسية للتخصص من خلال التوجيهات والمفاهيم ذات الصلة.
الاطلاع على أهم النظريات المتخلفة في الميكانيك والفيزياء والرياضيات.

محتوى المادة:

1. مدخل لعلم البيو ميكانيكا
2. مفاهيم البيوميكانيكا الرياضية: الحركة وخصائصها، أنواعها، القوانين، التحليل الحركي
3. استخدامات قوانين البيوميكانيكا في تقييم برامج التعلم الحركي
4. كينماتيكا الحركة المستقيمة: السرعة المحيطة والزاوية و العجلة الزاوية.
5. كينماتيكا الحركة الانتقالية: القوة، الدفع، الشغل، الطاقة والقدرة.
6. خصائص ومؤشرات القوة: الميكانيكية، عزم القوة، دفع القوة، قوة الاحتكاك
7. التحليل البيوميكانيكي للمهارة الرياضية : الزمني، البيوكينيماتيكي، البيوكينيتيكي.
8. تطبيقات التحليل البيوميكانيكي لبعض الأنشطة الرياضية
9. تأثير القوى الداخلية والخارجية على جسم الإنسان

طريقة التقييم: المتابعة الدائمة والامتحانات.

المراجع باللغة العربية:

1. عادل عبد البصير: الميكانيكا الحيوية والتكامل بين النظرية والتطبيق في المجال الرياضي، 1998.
2. -----: المدخل لتحليل الأبعاد الثلاثة لحركة جسم الإنسان في المجال الرياضي، 1998.
3. أمل جابر: مبادئ الميكانيكا الحيوية وتطبيقاتها في المجال الرياضي، 2008.
4. ريسان خربيط مجيد و نجاح مهدي: التحليل الحركي، 2002.

المراجع باللغات الأجنبية:

1. Groupe d'auteur ; science et motricité - n 46, de Boeck, 2/2002.
2. Groupe d'auteur ; science et motricité - n 47, de Boeck, 3/2002.
3. Mario Ilioret ; rédaction motrice du sportif, amphora, 1998.
4. Jean-Jacques temprado et gilles montagne, les coordinations perceptivo-motrices, 2001.
5. Jean-Paul doutreloux ; anatomie physiologie biomécanique * 1000questions repenses*, 2001.

السداسي: الثالث
عنوان الوحدة : وحدة التعليم الأساسية
المادة: الميكانيكا الحيوية

أهداف التعليم:

القواعد الأساسية والمعارف النظرية والتطبيقية المرتبطة بالتخصص.
الرفع من المستوى المعرفي والتقني والخططي للطلاب في التخصص.
الربط بين مختلف العلوم الطبيعية وعلاقتها بعلوم الرياضة.

المعارف المسبقة المطلوبة :

معرفة القواعد الأساسية للتخصص من خلال التوجيهات والمفاهيم ذات الصلة.
الاطلاع على أهم النظريات المتخلفة في الميكانيك والفيزياء والرياضيات.

محتوى المادة:

1. مدخل لعلم البيو ميكانيكا
2. مفاهيم البيوميكانيكا الرياضية: الحركة وخصائصها، أنواعها، القوانين، التحليل الحركي
3. استخدامات قوانين البيوميكانيكا في تقييم برامج التعلم الحركي
4. كينماتيكا الحركة المستقيمة: السرعة المحيطة والزاوية و العجلة الزاوية.
5. كينماتيكا الحركة الانتقالية: القوة، الدفع، الشغل، الطاقة والقدرة.
6. خصائص ومؤشرات القوة: الميكانيكية، عزم القوة، دفع القوة، قوة الاحتكاك
7. التحليل البيوميكانيكي للمهارة الرياضية : الزمني، البيوكينيماتيكي، البيوكينينيتيكي.
8. تطبيقات التحليل البيوميكانيكي لبعض الأنشطة الرياضية
9. تأثير القوى الداخلية والخارجية على جسم الإنسان

طريقة التقييم: المتابعة الدائمة والامتحانات.

المراجع باللغة العربية:

1. عادل عبد البصير: الميكانيكا الحيوية والتكامل بين النظرية والتطبيق في المجال الرياضي، 1998.
2. -----: المدخل لتحليل الأبعاد الثلاثة لحركة جسم الإنسان في المجال الرياضي، 1998.
3. أمل جابر: مبادئ الميكانيكا الحيوية وتطبيقاتها في المجال الرياضي، 2008.
4. ريسان خربيط مجيد و نجاح مهدي: التحليل الحركي، 2002.

المراجع باللغات الأجنبية:

1. Groupe d'auteur ; science et motricité - n 46, de Boeck, 2/2002.
2. Groupe d'auteur ; science et motricité - n 47, de Boeck, 3/2002.
3. Mario Ilioret ; rédaction motrice du sportif, amphora, 1998.
4. Jean-Jacques temprado et gilles montagne, les coordinations perceptivo-motrices, 2001.
5. Jean-Paul doutreloux ; anatomie physiologie biomécanique * 1000questions repenses*, 2001.

Avant-propos

Historiquement, les analyses du mouvement ont été nombreuses mais, tout récemment, grâce à l'avènement du cinématographe, les véritables précurseurs de cette analyse ont été Marey, Démeny et Muybridge. Le champ de l'analyse biomécanique du mouvement humain était ouvert.

A partir de documents filmés, des kinogrammes sont construits pour faciliter une vision stable de l'enchaînement du mouvement de chacun des segments corporels.

Aujourd'hui, de nombreuses équipes sportives étudient leurs performances en visionnant des enregistrements vidéo, sources de données qui sont exploitées à l'aide de logiciels de traitement dont la présentation des résultats permet d'exploiter un grand nombre de détails du geste.

Ce polycopié de cours, conforme au programme enseigné, s'adresse aux étudiants de 2^{ème} année Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives, Filières : Activités Physiques et Sportives Educative et Entraînement Sportif.

Ce cours est composé de plusieurs unités d'apprentissages ayant trait à plusieurs objectifs d'apprentissage.

Nous avons présenté un nombre suffisant d'illustrations pour retenir l'attention de l'apprenant sur des situations faciles à appréhender grâce à une observation attentive. Au-delà de cette première étape, nous présentons pas à pas les notions de mécanique utiles pour construire les représentations classiques de la cinématique, c'est-à-dire les profils descriptifs des trajectoires, des vitesses, des accélérations en fonction du temps de différents repères anatomiques. De telles représentations permettent d'apporter les éléments de réflexion nécessaires au champ scientifique du contrôle moteur. Puis, en cinétique, les forces, les moments, et les puissances recouvrent le champ de l'énergétique.

Des travaux dirigés sont proposés aux apprenants afin de contrôler et d'approfondir l'acuité de leur compréhension en complétant des exercices.

Table des matières

Avant-propos	I
Table des matières	II
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	IX
INTRODUCTION À LA BIOMÉCANIQUE	1
Objectifs d'apprentissage	1
1.Définition de la biomécanique :	2
1.1.La cinématique :	2
1.2.La cinétique :	2
2.La démarche de la biomécanique :	3
2.1.Observer :	3
2.2.Classifier :	3
2.3.Nommer	3
2.4.Mesurer	3
2.5.Analyser	3
2.6.Déterminer une problématique :	4
3.Description anatomique du mouvement :	4
3.1.Description du mouvement :	4
3.2.Types de mouvements articulaires :	4
3.3.Mouvements de la cheville :	5
3.4.Mouvements articulaires spécifiques :	5
3.5.Coordonnées :	5
3.6.Plans et axes :	5
3.7.Termes généraux :	6
LES LEVIERS.....	7
Objectifs d'apprentissage	7
1.Poids et masse.....	8
2.Les différents types de leviers :	8
2.1.Le levier inter-appui :	9
2.2.Le levier inter-résistant :	9
2.3.Le levier inter-moteur (inter-force ou interpuissant) :	10

3.L'avantage mécanique :	10
4.L'avantage cinématique :	10
5.Calcul des forces et des résistances :	11
ÉVÈNEMENTS, PHASES ET PÉRIODES.....	14
Objectifs d'apprentissage	14
Introduction	15
1.Événements, phases et périodes :	15
2.Application	18
2.1.Marche	18
CENTRES DE MASSE CORPOREL ET SEGMENTAIRE (1)	21
Objectifs d'apprentissage	21
Introduction	22
1.Centre de masse corporel.....	22
2.Mobilité du centre de masse corporel :	24
3.Base de support (polygone de sustentation) ou équilibre postural :	26
CENTRES DE MASSE CORPOREL ET SEGMENTAIRE (2)	30
Objectifs d'apprentissage	30
1.Masse et longueur segmentaire :	31
2.Distribution de la masse segmentaire :	33
3.Centre de masse combiné :	33
TRAJECTOGRAPHIE	37
Objectifs d'apprentissage	37
1.Facteurs biomécaniques associés à la longueur du saut :	38
1.1.Longueur d'appel :	39
1.2.Longueur de vol	40
1.3.Longueur de réception :	42
2.Mouvement parabolique	43
3.Équations du mouvement parabolique	45
3.1.Mouvement horizontal	46
3.2.Mouvement vertical	46
4.Description analytique d'un saut en longueur	47
4.1. Vitesse horizontale initiale.....	48
4.2.Vitesse verticale initiale	48

4.3.L'apogée ou le plus haut point de la trajectoire.....	48
4.4.Temps pour atteindre l'apogée	48
4.5.Longueur L_{OD}	49
4.6.Longueur de vol	50
5.Application de la trajectographie à la pratique sportive	51
5.1.Plus grande distance horizontale.....	51
5.2.Plus grande distance verticale	53
5.3.Plus grande précision	53
5.4.Plus grande vitesse et précision	54
LES FORCES	55
Objectifs d'apprentissage	55
1.Qu'est-ce-que les forces	56
2.Classer les forces	57
2.1.Les forces internes	57
3.Les forces externes	58
4.Le frottement	60
4.1.Frottement et force de contact normale.....	61
4.2.Frottement et surface de contact	63
4.3.Frottement et matériaux en contact.....	64
4.4.Calcul du frottement	65
MOUVEMENTS SEGMENTAIRES ET ARTICULAIRES	66
Objectifs d'apprentissage	66
Introduction	67
1.Mouvements linaires et angulaires	67
1.1.Mouvement linéaire	67
1.2.Mouvement angulaire	68
2.Vitesse et accélération moyennes et instantanées.....	69
3.Relations entre le déplacement, la vitesse et l'accélération.....	69
4.Relation entre mouvement linéaire et mouvement angulaire	70
5.Mouvement segmentaire.....	71
6.Mouvement articulaire.....	72
7.Principes associés aux mouvements segmentaires	74
ENERGIE, TRAVAIL ET PUISSANCE	75

Objectifs d'apprentissage	75
1.Travail.....	76
1.1.Travail positif et travail négatif.....	76
2.Puissance	77
3.Energie.....	Erreur ! Signet non défini.
4.Travail et énergie	80
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	81

Liste des figures

Figure 1: Le saut en longueur et ses différentes phases : 1,2,3 : la course d'élan ; 3,4 : l'impulsion ; 4 à 15 : la suspension ; 16 : la réception.	15
Figure 2 : Le saut en longueur et ses différentes phases comprenant une bonne illustration de la réception.	17
Figure 3 : Phases et périodes du cycle de marche. La phase de support comprend 3 périodes : la réception R, l'appui intermédiaire AI, et la poussée P, alors que la phase d'oscillation n'en a que 2, l'envol E et l'atteinte A.....	18
Figure 4 Relation entre le pas et la foulée. Les lignes pleines correspondent à la jambe droite ; les lignes pointillés représentent la jambe gauche et les courbes continues indiquent la trajectoire du centre de masse	19
Figure 5 A : appui unilatéral ; DSI : double support initial jambe droite ; DST : double support terminal jambe droite.	20
Figure 6 : Système de mesure du centre de masse corporel	23
Figure 7: La position du centre de masse, représenté par un point, varie selon la posture ;	25
Figure 8: Position du centre de masse corporel par rapport : a) au pied (hauteur), b) au plan frontal, c) au plan sagittal.	26
Figure 9: Avec un appui manuel et podal, la base de support augmente considérablement	26
Figure 10 La base de support est déterminée par le bord externe des pieds (Zone ombrée). ...	26
Figure 11: Avec les pieds au sol, les jambes écartées, le frappeur en a) a une plus grande base de support que celle de la ballerine en b) qui se tient sur la pointe d'un pied.	27
Figure 12: Deux personnes de même poids W mais de tailles différentes n'auront pas leur centre de masse au même endroit. La plus grande sera moins stable, son centre de masse sera plus élevé de ΔCM	27
Figure 13: Femme transportant une boîte. La ligne d'action de la charge et du poids corporel passe entre les pieds et demeure à l'intérieur de la base de support, ce qui assure une bonne stabilité	28
Figure 14: Position de départ d'une course	28
Figure 15: Le centre de masse de l'avant-bras est situé à 0,110 m du coude (articulation proximale) ou à 0,145 m du poignet (articulation distale)	32
Figure 16: Position du centre de masse segmentaire exprimée en pourcentage de la longueur du segment.....	32

Figure 17: Les masses de la cuisse et du segment jambe/pied sont données en a). Un système équivalent comprenant l'ensemble cuisse/jambe/pied est représenté en b)	34
Figure 18 : Les longueurs d'appel, L_1 , de vol, L_2 , et de réception L_3 , totalisent la longueur totale du saut.....	38
Figure 19 : Inclinaison de la tête des bâtons de golf. a) Les bois et b) les fers.	42
Figure 20 : Les jambes tendues et la force au sol font en sorte que la longueur de réception L_3 est maximale. L'athlète aura tendance à s'asseoir	42
Figure 21 : Les jambes fléchies, le centre de masse le plus près possible du point d'impact, l'athlète a une longueur de réception, L_3 , raisonnable. Il aura tendance à basculer vers l'avant	43
Figure 22 : Deux boules libérées simultanément. La boule A n'a pas de vitesse de départ alors que la boule B possède seulement une vitesse horizontale. La gravité attire les boules de la même manière	44
Figure 23 : a) Tir à l'arc et trajectoire de la flèche par rapport à l'horizontale ; b) une trajectoire parabolique et ses paramètres	45
Figure 24 : Trois balles sont lancées. La balle A a un angle de projection de 90° et atteint le point le plus haut. La balle B a un angle de 45° et parcourt la plus longue distance. La balle C a subi l'effet de la gravité qui l'attire très vite vers le sol.	52
Figure 25 : Les courbes A et B ont la même allure. Cependant, la balle A lancée avec la même vitesse et le même angle de projection va se rendre plus loin, car son point de départ est plus élevé.	52
Figure 26: Avant d'amorcer un rouleau ventral a), le centre de masse est plus élevé que lors d'un rouleau dorsal b)	53
Figure 27 : En a), le ballon arrive perpendiculaire à la surface délimitée par l'anneau du panier. L'angle d'approche est de 90° en a), 60° en b), 30° en c) et 20° en d)	54
Figure 28 Force de contact normale et force de frottement agissant sur le pied du coureur lors de la poussée	60
Figure 29: L'ajout de livres à la pile augmente le frottement statique entre le livre du bas et la table	61
Figure 30 : La force de frottement entre le livre et le mur et entre le livre et votre main suffit à maintenir le livre en place	63
Figure 31 : Un livre à son extrémité a une plus petite zone de contact avec la table. Cette zone de contact réduite affecte-t-elle la force de friction entre le livre et la table ?	64
Figure 32 : Représentation schématique du membre inférieur. L'angle segmentaire est mesuré à partir de l'horizontale vers le segment en question	71

Figure 33 : Angle segmentaire à la cuisse pour différentes positions dans le temps.	72
Figure 34 : Hyperextension du genou.	73
Figure 35 : Mesure de l'angle segmentaire du pied en position a) neutre, b) flexion plantaire et c) flexion dorsale	74
Figure 36 : Exemple de travail (déplacement)	76

Liste des tableaux

Tableau 1 : Phase, périodes et évènement de la course.....	16
Tableau 2 : Phases, périodes et événements d'un cycle de marche (CM).....	19
Tableau 3: Centres de masse segmentaires adaptés de Winter (1990).....	31
Tableau 4: Contributions relatives des trois longueurs totalisant la distance parcourue lors d'un saut en longueur.	39
Tableau 5 : Facteurs affectants chacune des trois longueurs fondamentales du saut en longueur.....	39
Tableau 6: Performances de saut en longueur ainsi que la vitesse de l'angle d'appel respectif	47
Tableau 7: Données de déplacements angulaires, de la jambe pour un Δt de 0,01 s.	72

INTRODUCTION À LA BIOMÉCANIQUE

Objectifs d'apprentissage

1. Circonscrire le champ d'étude de la biomécanique et le situer par rapport aux sciences des activités physiques et sportives.
2. Connaître les plans dans lesquels le mouvement s'effectue et les axes autour desquels se font les rotations.
3. Associer les mouvements articulaires aux gestes quotidiens du sportif.
4. Evoquer quelques perspectives nouvelles pour le spécialiste de l'analyse du mouvement

1. Définition de la biomécanique :

La biomécanique est considérée comme étant l'application de la physique à l'étude de tout organisme vivant, à l'étude des forces générées ou subies par l'organisme et leurs effets sur son mouvement ou ses déformations. (Allard ; Blanchi, 2001).

Elle se subdivise en l'étude de la **cinématique** et de la **cinétique**.

1.1. La cinématique :

Elle se subdivise en cinématique **linéaire** et cinématique **angulaire**.

1.1.1. La cinématique linéaire :

C'est l'étude des valeurs descriptives du mouvement des corps telles que la **distance**, le **déplacement**, la **vitesse** et l'**accélération**. Ces valeurs sont soit **scalaires**, soit **vectérielles**. Les valeurs scalaires ne sont définies que par une magnitude (norme), alors que les valeurs vectérielles sont définies par une magnitude (norme) et une direction.

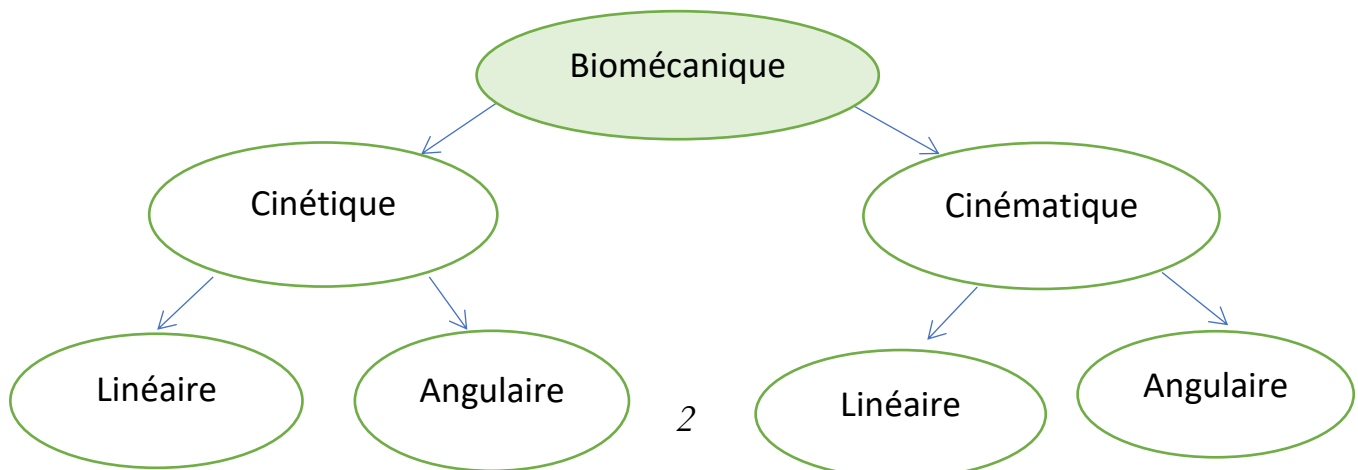
1.2. La cinématique angulaire :

C'est l'étude des valeurs descriptives du mouvement angulaire telles que le déplacement angulaire, la vitesse angulaire et l'accélération angulaire.

1.2. La cinétique :

C'est l'étude des forces qui causent ou qui résultent du mouvement des corps. Elle se subdivise en cinétique linéaire et cinétique angulaire.

- **Le mouvement angulaire** : est un mouvement de rotation autour d'un axe imaginaire ou réel où tous les points de l'objet se déplacent selon le même angle, dans le même temps.
- **Le mouvement linéaire (ou translation)** : se produit le long d'une ligne qui peut être droite ou courbe, avec toutes les parties du corps se déplaçant dans la même direction et à la même vitesse. Le mouvement peut être rectilinéaire (selon une ligne droite) ou curvilinéaire (selon une ligne courbe).



2. La démarche de la biomécanique :

2.1. Observer :

La première démarche commune à toute approche scientifique est l'observation qui permet d'obtenir un répertoire de phénomènes.

2.2. Classifier :

Puis, devant le grand nombre d'informations reçues, il est nécessaire de classifier, c'est-à-dire de regrouper des phénomènes qui vous paraissent « à priori » comparables. Ce regroupement va mettre évidence des éléments communs à plusieurs phénomènes, ce qui est déjà une première étape vers leur compréhension.

2.3. Nommer

Ce qui frappe à première vue au cours de l'observation d'un athlète en action c'est l'élégance de l'enchaînement gestuel, qui diffère d'un sportif débutant.

Dans les gestes quotidiens, il suffit d'observer attentivement un adulte entrain de marcher pour se rendre compte rapidement qu'il n'est pas facile de décrire précisément toutes les phases de ce mouvement. C'est pourquoi les entraîneurs et les athlètes utilisent un certain nombre de termes techniques pour se communiquer des informations précises.

2.4. Mesurer

Néanmoins les descriptions sont quelquefois limitées et l'utilisation de la mesure ou de l'évaluation peut affiner le niveau de compréhension de la gestuelle observée et permettre de dévoiler partiellement les facteurs de son amélioration. En athlétisme, par exemple, on mesure l'amplitude des foulées et leur fréquence. La performance est effectivement bien définie par la relation fréquence (f) – amplitude (a), puisque la vitesse de course **V** est égale au produit de ces deux grandeurs mécaniques :

$$\mathbf{V = a \times f}$$

2.5. Analyser

Comment l'athlète organise-t-il sa gestuelle pour ajuster la fréquence et l'amplitude de ses foulées au cours de la réalisation de sa performance ? On peut essayer de noter plus finement son organisation intersegmentaire qui lui permet de réaliser **a** et **f**.

Pour se faire, on peut soigneusement recopier la gestuelle enregistrée sur une bande vidéo. Pour cela il faut choisir une méthode simplifiée de représentation en assimilant les segments corporels à des lignes. On construit ainsi un kinogramme de l'enchaînement gestuel.

L'image vient ainsi suppléer à l'observation directe. En effet, une bonne méthode pour analyser la technique gestuelle est de faire des représentations schématiques qui permettent de bien polariser l'attention. Tel est le but de la réalisation de kinogrammes.

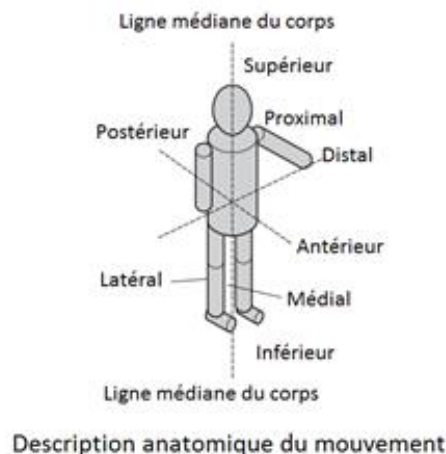
2.6. Déterminer une problématique :

Cependant, avant de se lancer dans une analyse, il est nécessaire de bien poser la problématique appropriée. Pour cela, après avoir fait le tour des données et des préoccupations relatives à une activité physique, on dispose d'un ensemble de questions dont la réponse demande réflexion.

3. Description anatomique du mouvement :

3.1. Description du mouvement :

Superficiel (proche de la surface), **profond** (éloigné de la surface), **postérieur** (en arrière), **médial** (proche de la ligne médiane), **latéral** (éloigné de la ligne médiane), **supérieur** (en haut), **inférieur** (en bas), **proximal** (proche du point d'attache au corps), **distal** (éloigné du point d'attache au corps).



3.2. Types de mouvements articulaires :

Abduction (s'éloignant de la ligne médiane), **adduction** (se rapprochant de la ligne médiane), **rotation interne ou externe** (rotation du membre inférieur vers l'intérieur ou vers l'extérieur par rapport au grand axe), **flexion plantaire ou dorsiflexion du pied** (éloignant ou rapprochant les orteils de la face antérieure du tibia), **extension ou flexion** (alignant les segments du membre ou les rapprochant), hyperextension (extension excessive).

3.3. Mouvements de la cheville :

Inversion et éversion (rotation du talon vers l'intérieur ou vers l'extérieur), **pronation** (mouvement complexe dans les trois plans comprenant une éversion, une abduction et une dorsiflexion du pied), **supination** (mouvement complexe dans les trois plans comprenant une inversion, une adduction et une flexion plantaire du pied).

3.4. Mouvements articulaires spécifiques :

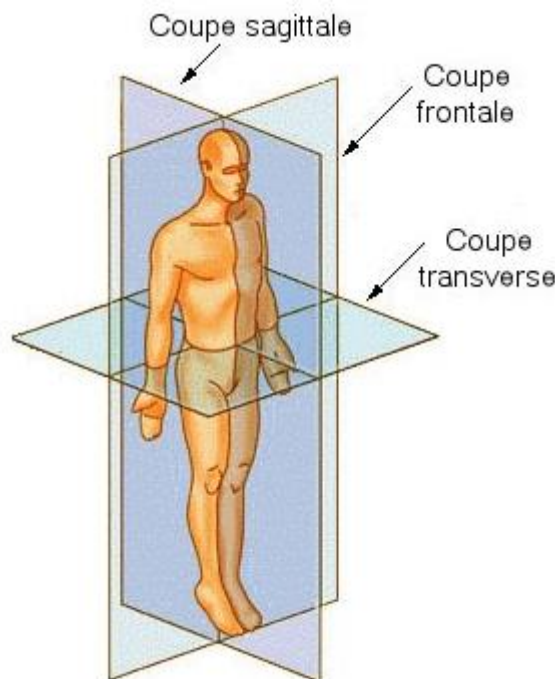
Valgus (rotation du membre inférieur selon l'axe antéro-postérieur éloignant le genou de la ligne médiane), **varus** (rotation du membre inférieur selon l'axe antéro-postérieur rapprochant le genou de la ligne médiane), **abduction ou adduction horizontale** (abduction ou adduction du bras tendu vers l'avant dans le plan transversal), **circumduction** (rotation circulaire d'un segment du corps).

3.5. Coordonnées :

Abscisse (axe x), **ordonnée** (axe y), **intersection** (point où les deux axes se croisent).

3.6. Plans et axes :

Position anatomique (sujet de face, les bras sur les côtés, les pieds en avant et parallèles, les paumes des mains en avant et les doigts en extension), **plan cardinal** (plan passant par le centre d'une masse), **plan sagittal** (plan divisant le corps en deux parties, droite et gauche), **axe transversal** (perpendiculaire au plan sagittal), **plan frontal** (plan divisant le corps en deux parties, antérieure et postérieure), **axe antéro-postérieur** (perpendiculaire au plan frontal), **plan transversal** (plan divisant le corps en deux parties, supérieure et inférieure), **axe longitudinal** (perpendiculaire au plan transversal).



3.7. Termes généraux :

Parallèle (équidistant et ne se croisant jamais), **degrés de liberté** (méthode utilisée pour décrire le mouvement ou la position), **plan diagonal** (surface plane et en pente), **traction** (force qui étire ou éloigne des segments), **compression** (force qui comprime ou rapproche des segments), **élever ou abaisser** (déplacer vers le haut ou vers le bas).

Origine (point de départ ou d'initiation du mouvement), **insertion** (origine anatomique du segment), **coordonnées** (nombre se rapportant à un système de référence), **plan** (surface plane), **perpendiculaire** (à un angle de 90°).

Translation (déplacement sans rotation), **rotation** (mouvement selon un certain angle), **vertical et horizontal** (dans un plan bidimensionnel : en hauteur (axe y) et en longueur (axe x)).

LES LEVIERS

Objectifs d'apprentissage

1. Définir les trois types de leviers.
2. Expliquer la notion de poids, de masse, et de force.
3. Donner des exemples de ces leviers dans le corps humain.
4. Calculer l'avantage mécanique et cinématique.
5. Calculer les forces et les résistances d'un système de levier au moyen de la seconde condition d'équilibre.

« Donnez-moi un levier et je soulèverai le monde » s'écria Archimède !

Définition : les leviers sont des systèmes mécaniques permettant de multiplier une force dans le but de contrer une résistance.

- Les articulations sont des points d'appui autour desquels se dressent des muscles qui entraînent un mouvement dans une direction tel que la flexion au coude. Les articulations font partie des leviers du corps humain.
- Les leviers sont aussi utilisés pour effectuer rapidement des mouvements de grande amplitude.
- Les leviers font intervenir un système de forces.

1. Poids et masse

Pour calculer les forces qui interviennent dans un système de levier, nous devons être en mesure de distinguer entre poids et masse d'un objet et de reconnaître les similitudes entre poids et force.

Un pèse-personne ou une balance nous indique notre poids. Il quantifie la pesanteur ou l'action de la gravité sur nous. La gravité cherche à nous attirer vers le centre de la terre.

Sur la terre, soumis à la force gravitationnelle, ou dans l'espace, où nous sommes en état d'apesanteur, notre quantité de matière demeure inchangée. Cette quantité de matière est notre masse. Elle est toujours la même sur la terre, sur la lune ou dans l'espace.

L'affichage des balances domestiques est ajusté afin de compenser l'effet dû à la gravité. Par conséquent, ces balances donnent directement notre masse dont l'unité de mesure est le kilogramme (Kg).

En multipliant la masse par l'accélération due à la gravité ($9,8 \text{ m/s}^2$) on obtient le poids.

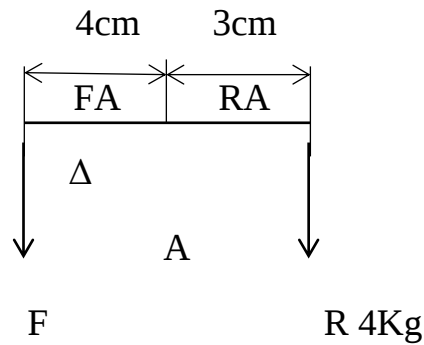
Ex : si votre masse est de 70 kg, votre poids est de 686 Newton (N).

Pour faciliter les calculs dans les exemples qui suivent, on va souvent arrondir l'accélération due à la gravité à 10 m/s^2 .

2. Les différents types de leviers :

Les leviers font intervenir les notions de force, de point d'appui et de longueur. Bien que les forces soient invisibles, nous observons leur manifestation. Pour l'instant, ces forces sont représentées par l'effort musculaire et le poids.

Un système de levier se représente comme à la figure ci-dessous où les forces se situent à une certaine distance du point A, formant le point d'appui.

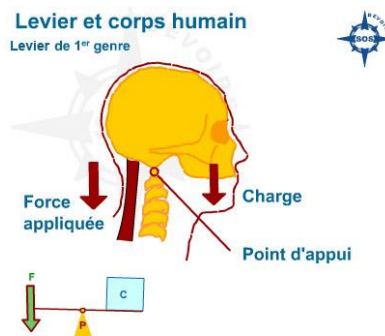


De part et d'autre nous avons les deux forces ; la force appliquée F et la résistance R . Les forces sont indiquées par une flèche pointant dans la direction de son application. Les distances du point d'appui au point d'application de la force appliquée et à celle de la résistance sont en fait les bras de levier.

On identifiera le type de levier en fonction de la composante située au milieu. Ainsi on retrouve :

2.1. Le levier inter-appui :

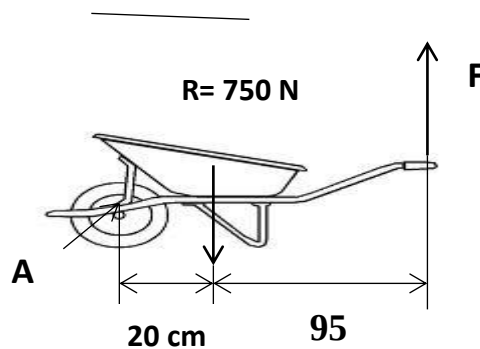
Où la force appliquée F et la résistance R se trouvent de part et d'autre de l'appui A . Dans un levier inter-appui, on cherche à garder la force appliquée le plus loin possible du point d'appui. Ex :



2.2. Le levier inter-résistant :

La résistance se situe entre la force motrice et le point d'appui.

Ex :

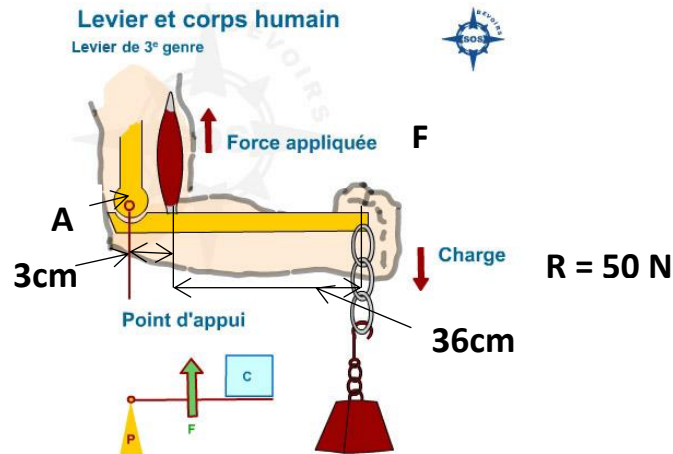


On n'en trouve que très peu dans le système musculosquelettique.

2.3. Le levier inter-moteur (inter-force ou interpuissant) :

La force appliquée ou la puissance motrice se situe entre le point d'appui et la résistance.

Ex :



3. L'avantage mécanique :

L'efficacité ou l'avantage mécanique, AM, d'un système de levier est le rapport des bras de levier, ou :

$$AM = \frac{\text{distance de l'appui à la force appliquée (lF)}}{\text{distance de l'appui à la résistance (lR)}}$$

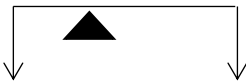
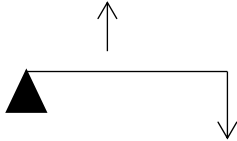
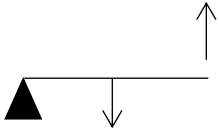
4. L'avantage cinématique :

L'avantage cinématique exprime l'amplitude du déplacement ou la rapidité du mouvement. Il est le rapport des bras de levier ou :

$$AC = \frac{LR}{LF}$$

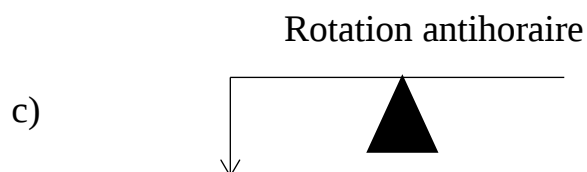
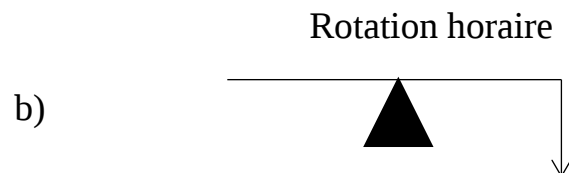
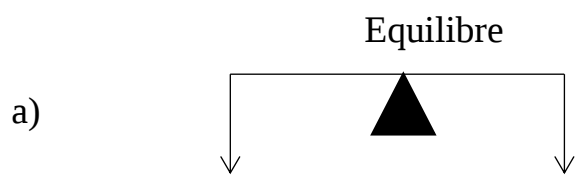
Exercice

Calculez les AM et les AC des trois exemples sus-mentionnés.

Avantage Genre	Cinématique (rapidité)	Aucun	Mécanique (force)
Inter-appui			
Inter-moteur			
Inter-résistant			

5. Calcul des forces et des résistances :

Les leviers font appel à trois éléments importants à savoir les forces appliquées ou de résistance, le point d'appui et les bras de levier. Si l'une des deux forces est absente, il y a un déséquilibre. La force qui demeure entraîne une rotation dans le sens horaire ou antihoraire comme l'indique la figure ci-dessous.



Le système de levier décrit en a) est en équilibre. Si l'on retire une des deux forces, celle qui demeure va faire basculer le levier dans un mouvement de rotation horaire ou antihoraire.

Le sens de la rotation est donné par la position de la force et la direction de la force.

La grandeur de cette rotation ou moment est donnée par le produit du bras de levier par la force. Nous avons donc l'équation :

$$M \text{ (Ncm)} = l \times F$$

où M est le moment, F la force (appliquée ou résistance) et l, la longueur du bras de levier perpendiculaire à la force.

Le moment sera positif ou négatif selon la convention adoptée, par exemple positif pour une rotation dans le sens horaire.

Chaque force possède son bras de levier et, par conséquent chaque force appliquée est à une distance d'un centre de rotation et développe son propre moment.

Dans un système de levier inter-appui, il y a deux forces, une appliquée, l'autre de résistance. On retrouve deux moments, un pour chaque force. Dans l'exemple donné sur le levier inter-appui, et en prenant comme données les mêmes que celles de l'exemple précédent, c'est-à-dire, le bras de résistance de 3 cm et le poids de la tête de 40 N. Le moment (résistance) dans le sens horaire est égal à 120 Ncm. Le moment de la force musculaire doit être aussi égal à 120 Ncm sinon tout basculerait d'un côté ou de l'autre. Il doit aussi agir dans le sens opposé pour annuler l'effet du moment de la force de résistance. Sachant que le moment de la force est de 120 Ncm, on obtient la force appliquée en divisant ce moment par son bras de levier.

$$M = l \times F$$

$$F = M/l$$

$$F = 120 \text{ Ncm} / 4 \text{ cm}$$

$$F = 30 \text{ N}$$

On aurait pu dire que la somme des moments est égale à zéro.

$$\curvearrowright \Sigma M_0 = 0$$

La somme des moments étant égale à zéro constitue la seconde condition d'équilibre. Cette condition ou cette approche est utilisée pour estimer toutes les forces appliquées dans n'importe quel système de levier. On adopte une convention en précisant que le moment est positif dans le sens horaire ou antihoraire et qu'il est calculé à partir d'un point quelconque.

Dans ce cas particulier, le moment pris au point d'appui A est positif quand il agit dans le sens horaire. Ainsi la sommation des moments au point A :

$$\curvearrowright \Sigma M_A = 0$$

$$- (\text{moment de la force}) + (\text{moment de la résistance}) = 0$$

$$- (l_{\text{force}} \times F) + (l_{\text{résistance}} \times R) = 0$$

$$F = (l_{\text{résistance}} \times R) / l_{\text{force}}$$

$$F = (3 \text{ cm} \times 40\text{N}) / 4 \text{ cm}$$

$$F = 30 \text{ N}$$

ÉVÈNEMENTS, PHASES ET PÉRIODES

Objectifs d'apprentissage

1. Savoir distinguer entre un événement, une phase et une période.
2. Appliquer ces définitions et connaître les termes spécifiques au saut en longueur, à la marche et à la course.
3. Savoir définir vitesse moyenne, cadence, pas, foulée, cycle de marche.

Introduction

En sport et dans les différentes disciplines sportives, l'activité de l'athlète est composée d'éléments particuliers. A titre d'exemple, la course et la suspension aérienne sont des éléments communs aux sauts, aux plongeurs et aux saltos, alors que le ramené de jambes est plus spécifique au saut en longueur. Ces éléments peuvent eux aussi comprendre des sous-ensembles. La course est à son tour découpée en phases de support et d'oscillation.

Les différentes périodes et phases caractérisant le mouvement dans son ensemble ainsi que les événements qui les délimitent seront décrits à travers le saut en longueur à cause de sa diversité d'éléments de base et du nombre imposant de principes fondamentaux associés au mouvement. Un autre exemple, à savoir la marche et la course, est également traité à cause de son importance dans les activités quotidiennes.

1. Événements, phases et périodes :

Le début et la fin d'une activité sont démarqués par des événements ou incidents ponctuels bien identifiables. Par exemple, la suspension (partie aérienne du mouvement) s'amorce lorsque le sauteur quitte le sol, et se termine au contact avec le sol : ce sont deux événements. Ils sont parfois difficiles à repérer à l'œil nu. L'utilisation de caméra vidéo permet de fixer le mouvement dans le temps et ainsi bien déterminer ces événements critiques.

Si l'activité principale peut se subdiviser, ces sous-activités porteront le nom de phases. La phase est une partie importante et fondamentale du mouvement ayant une durée précise et délimitée par des événements ponctuels. La figure 1 présente la position corporelle d'un sauteur à différents moments dans le temps. On y reconnaît quatre phases, à savoir la course d'élan, l'impulsion, la suspension et la réception.

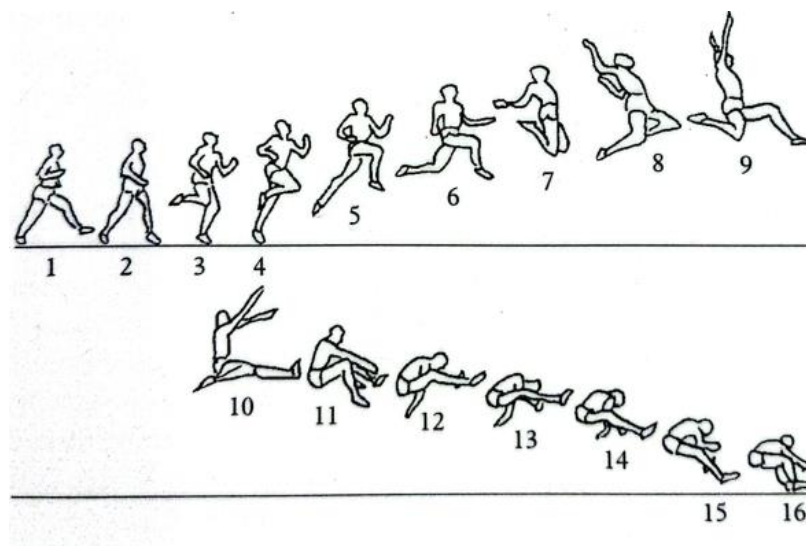


Figure 1: Le saut en longueur et ses différentes phases : 1,2,3 : la course d'élan ; 3,4 : l'impulsion ; 4 à 15 : la suspension ; 16 : la réception.

D'après Houvion, Prost et Raffin-Peyloz, (1988) in Allard et al. (2011).

La première phase, soit la course d'élan, est tout simplement une course préparatoire dont les objectifs sont d'acquérir de la vitesse et de bien viser la planche. Si le pied d'élan dépasse la planche, le saut est raté. La course d'élan débute en position d'arrêt bien avant la position 1 de la figure 1 et se termine par le contact initial avec la planche (position 3) où commence la seconde phase, celle de l'impulsion. La course d'élan dure 3 secondes ou plus selon la distance horizontale entre le sauteur et la planche d'appel.

La course, l'avant-dernier appui et le dernier appui sont des sous-phases ou périodes de la course d'élan. Celles-ci sont aussi nettement identifiées par des événements. Les phases, les périodes et les événements propres au saut en longueur sont résumé dans le tableau suivant. On note que certains événements portent le même nom que leur période. Il faut éviter de les confondre.

Tableau 1 : Phase, périodes et évènement de la course

Phase	Période (initiale)	Évènement
	Course	Arrêt
Course d'élan	Avant-dernier appui	Avant-dernier appui
	Dernier appui	Dernier appui
	Griffé	Contact initial
Impulsion	Poussée	Pied-plat
	Grandissement	Contact terminal
Suspension	Ramené des jambes	Apogée
Réception		Impact

Dans la première période de la course d'élan, la course, le sauteur cherche à développer la plus grande vitesse possible. Lors de l'avant-dernier appui (position 1, figure 1) et du dernier appui (position 2 à 4, figure 1 et figure 2 a et b), le sauteur fait les ajustements nécessaires pour atteindre la planche d'appel. Au dernier appui, le centre de masse s'abaisse légèrement sans perdre de vitesse. Cela correspond à une légère flexion du genou de la jambe portante, l'autre jambe pointant vers le bas, préparant la phase suivante de l'impulsion.

La seconde phase, à savoir celle de l'impulsion, débute par le contact initial avec la planche, événement final de la course d'élan, et se termine lorsque le sauteur quitte le sol. Elle comprend les périodes de griffé et de poussée. Le griffé et la poussée ne durent que très peu de temps et ne sont pas tout à fait bien représentés à la figure 1. Le griffé correspond à l'impact du pied qui s'écrase légèrement sur la planche.

Tout de suite après le griffé vient la poussée. Elle dure entre 10 et 15 centièmes de seconde pour les champions et débute sur le pied-plat. C'est là que le genou de la jambe libre monte et se déplace vers l'avant et la jambe portante s'allonge complètement dans une détente pour catapulter le sauteur vers l'avant et dans les airs où se termine cette période (contact terminal).

La troisième phase, la suspension, se termine à l'impact au sol. Elle comprend les périodes de grandissement et du ramenée de jambes. Le grandissement se termine au moment où le centre de masse atteint son point le plus élevé ou apogée (position 10 de la figure 1 ou figure 2 f) de sa trajectoire aérienne.

Le ramenée de jambe s'amorce à l'apogée où le corps entre dans une chute libre (position 11 à 16 de la figure 1 ou figure 2, g à i) jusqu'à l'impact. Le tronc fléchit ; les bras entre les jambes, sont portés vers l'arrière (position 12) pour entraîner les jambes vers l'avant.

Dans la dernière phase, la réception, les jambes fléchissent pour amortir l'impact. Cette poussée vers l'arrière doit être compensée par le mouvement des bras vers l'avant pour éviter que le sauteur bascule vers l'arrière. En effet, la distance est mesurée entre le point de contact au sol le plus rapproché de la planche et celle-ci, peu importe si les mains ont touché le sol à l'arrière des pieds.

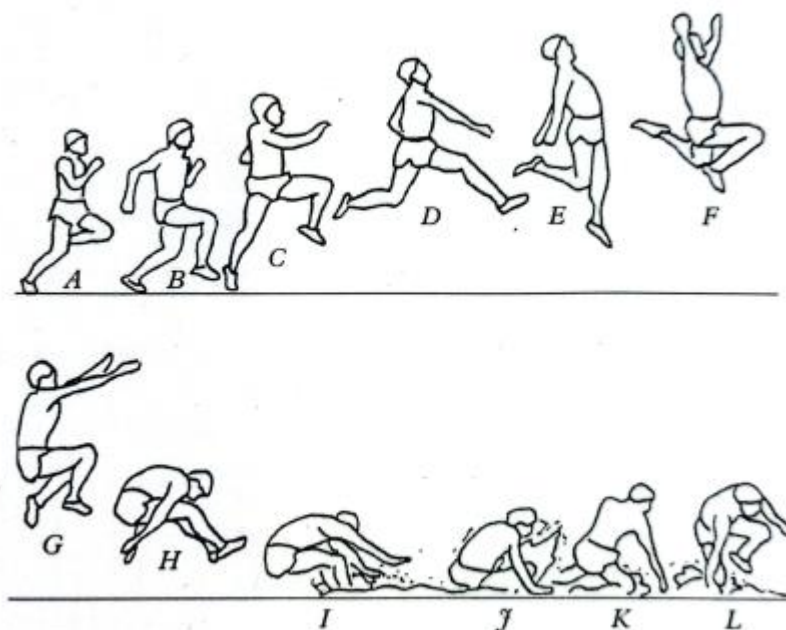


Figure 2 : Le saut en longueur et ses différentes phases comprenant une bonne illustration de la réception.

D'après Houvion, Prost et Raffin-Peyloz, (1988) in Allard et al. (2011).

2. Application

La description temporelle est l'étape initiale de l'analyse du mouvement. On ne peut s'exprimer clairement que si l'on en maîtrise les différentes phases. La description temporelle s'applique à toutes les activités. Parmi celles-ci, nous allons retenir la marche, une activité de base.

2.1. Marche

La marche est une activité qui nous apparaît tout à fait naturelle et même banale. Il suffit d'avoir des ampoules aux pieds pour comprendre combien cette activité nous est essentielle et complexe.

La marche est divisée en deux phases, à savoir celle de support et celle d'oscillation (figure 3). La phase de support débute au contact initial du pied avec le sol. Normalement c'est le talon qui touche au sol en premier. Néanmoins, dans certaines pathologies, le premier contact est réalisé par le bout du pied (dystrophie musculaire de Duchenne) ou par le pied au complet (paralysie neuromusculaire). La fin de la phase de support et le début de l'oscillation sont délimités par le contact terminal (décollement des orteils).

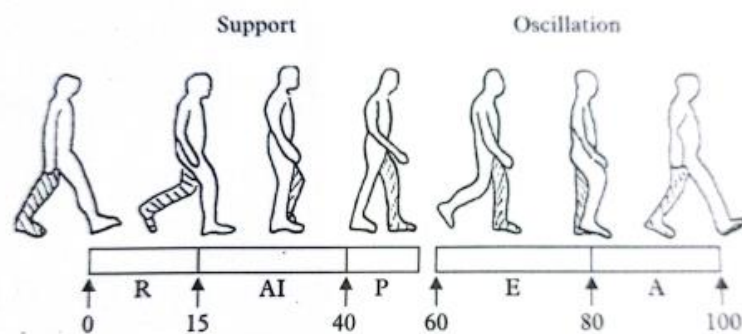


Figure 3 : Phases et périodes du cycle de marche. La phase de support comprend 3 périodes : la réception R, l'appui intermédiaire AI, et la poussée P, alors que la phase d'oscillation n'en a que 2, l'envol E et l'atteinte A.
(Allard et al., 2011)

Un cycle de marche commence au contact initial d'un pied (0 %) et se termine par le contact initial subséquent du même pied (100 %). La figure 4 illustre bien la relation entre le pas et la foulée. La distance parcourue entre chaque contact du même pied correspond à la foulée alors que la distance entre chaque pied constitue le pas. Ainsi, il faut un pas avec chaque jambe pour compléter une seule foulée. Le cycle de marche normal ou naturel dure près de 1,1 seconde.

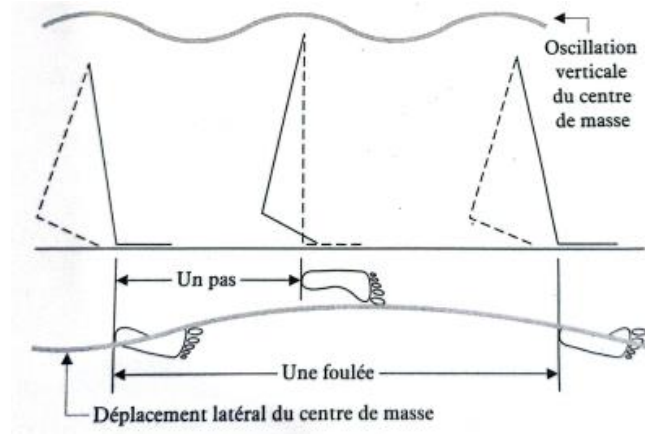


Figure 4 Relation entre le pas et la foulée. Les lignes pleines correspondent à la jambe droite ; les lignes pointillés représentent la jambe gauche et les courbes continues indiquent la trajectoire du centre de masse (Allard et al., 2011).

Durant la marche, nous nous déplaçons vers l'avant en effectuant un mouvement latéral de va-et-vient dont l'amplitude maximale se produit chaque fois qu'une des jambes est en phase de support.

Le tableau 2 résume les phases et les périodes caractéristiques de la marche ainsi que leur durée.

Tableau 2 : Phases, périodes et événements d'un cycle de marche (CM)

Phase	Période	Durée du CM	Durée (relative)	Événement (initial)
Support (0 à 60 %)	Réception	0-15 %	15 %	Contact initial
	Appui intermédiaire	15-40 %	25 %	Flexion du genou
	Poussée	40-60 %	20 %	Talon quitte le sol
Oscillation (60 à 100%)	Envol	60-80 %	20 %	Pied quitte le sol
	Atteinte	80-100 %	20 %	Pied passe devant l'autre jambe

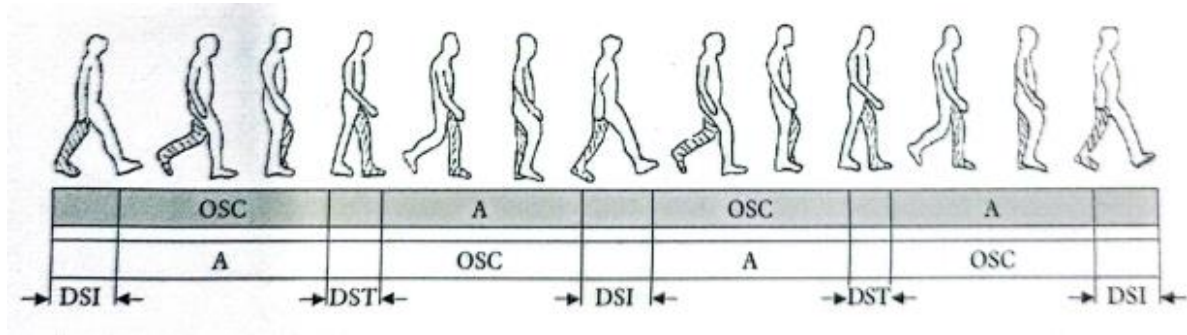


Figure 5A : appui unilatéral ; DSI : double support initial jambe droite ; DST : double support terminal jambe droite.
(Allard et al., 2011)

CENTRES DE MASSE CORPOREL ET SEGMENTAIRE (1)

Objectifs d'apprentissage

2. Expliquer la notion de centre de masse corporel.
3. Expliquer et illustrer la première condition d'équilibre.
4. Décrire la notion de base de support (polygone de sustentation).
5. Expliquer et illustrer la notion d'équilibre postural.
6. Expliquer le principe de distribution des masses segmentaires.

Introduction

Le centre de masse est un concept que l'on utilise pour faciliter la description des phénomènes mécaniques. Souvent on l'utilise inconsciemment. Lorsque l'on dit d'un sprinter qu'il est rapide, on sait fort bien que ce sont ces jambes qui courent et que c'est sa masse entière qui se déplace. Donc l'allusion au sprinter pris comme un tout est en soi une simplification qui nous rapproche de la notion de centre de masse.

1. Centre de masse corporel

Pour traiter plus facilement des phénomènes mécaniques, on fait l'hypothèse que la masse entière est située en un seul point, appelé centre de masse.

Pour une distribution uniforme de la matière comme l'indique la figure A, le centre de masse d'un ballon est situé au centre de la matière qui le constitue. Le centre de masse est un point d'équilibre où les quantités de matière de part et d'autre sont égales. La figure B montre que l'équilibre d'une poutre est atteint lorsque le centre de masse est au-dessus du point d'appui. Par contre, il n'est pas toujours situé au centre physique de l'objet, comme pour le bâton de base-ball de la figure C où il est déporté loin des mains vers l'extrémité la plus lourde du bâton. En effet, il y a plus de matière à une extrémité du bâton qu'à l'autre. La forme de l'objet et la distribution de la matière déterminent la position du centre de masse.

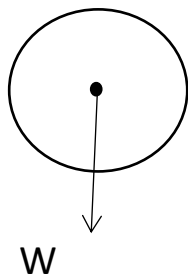


Figure A

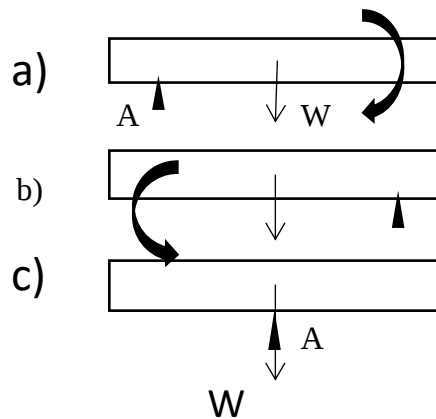


Figure B

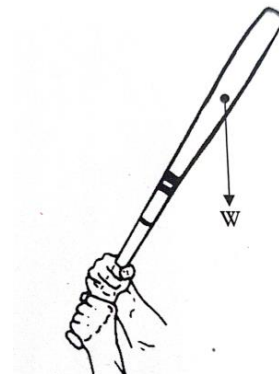


Figure C

Pour localiser la position du centre de masse d'un individu, on fait appel au principe du levier. Notons que cette méthode nous a été proposée par Borelli en 1681. Le sujet se couche, le dos collé contre une planche étroite et longue de 2m tel qu'illustré à la figure 6.

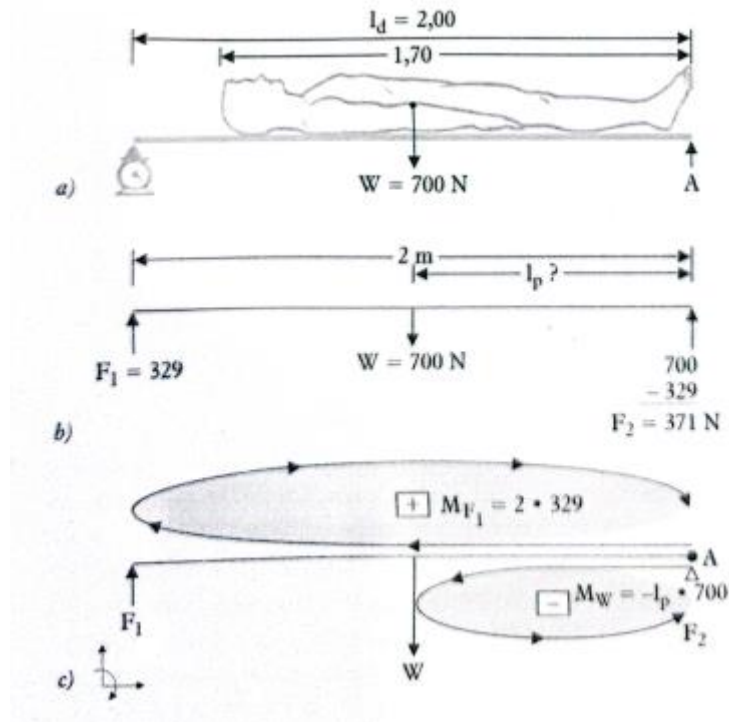


Figure 6 : Système de mesure du centre de masse corporel
(Allard et al., 2011)

Ce système représente un levier inter-résistant. Le poids du corps (la résistance) est placé entre le point d'appui situé à l'extrémité podale et la balance qui enregistre la charge sous la planche. L'effet de la planche est négligé dans le but de simplifier les calculs. Notre sujet pèse 700 N et a une taille de 1,70m. Comme le centre de masse n'est pas situé au milieu du corps, la balance indique une charge de 329 N.

L'opération mathématique pour estimer la force au point d'appui correspond à l'application de la première condition d'équilibre : la somme des forces est nulle.

$$\Sigma F = 0$$

Cette première condition d'équilibre s'applique séparément pour les directions horizontale et verticale. Il faut aussi indiquer la direction positive des forces. Ainsi, pour les forces horizontales F_h et verticales F_v l'équation devient :

$$- \Sigma F_h = 0$$

$$- \Sigma F_v = 0$$

La force au point d'appui F_2 est obtenue par :

$$- \Sigma F_v = 0$$

$$- F_1 - W + F_2 = 0$$

- $F_2 = W - F_1$
- $F_2 = 700 - 329$
- $F_2 = 371 \text{ N}$

Comme le tout est en équilibre, la sommation des moments (seconde condition d'équilibre) est aussi égale à zéro.

$$\Sigma M = 0$$

Les moments sont pris au point d'appui A, et sont positifs pour une rotation horaire. On cherche la distance l_p , représentant la position du centre de masse par rapport aux pieds. On applique ainsi la seconde condition d'équilibre et les moments sont calculés à partir du point d'appui A. Trois forces sont rapportées à la figure 7a) et chacune d'elle peut développer un moment. Le moment de la force F_1 et du poids W , sont représentés à la figure 7b). La force F_2 , appliquée au point d'appui ne développe pas de moment car cette force n'a pas de bras de levier. En effet, la distance entre le point d'appui et la ligne d'action de la force F_2 est nulle.

 $\Sigma M_A = 0$

Moment de la force de la balance — Moment dû au poids = 0

$$l_d \times 329 \text{ N} - l_p \times 700 \text{ N} = 0$$

$$2,00\text{m} \times 329 \text{ N} - l_p \times 700 \text{ N} = 0$$

$$l_p = (2,00\text{m} \times 329) / 700$$

$$l_p = 0,94 \text{ m}$$

Ainsi le centre de masse de notre sujet se situe à 0,94m du point d'appui podal. Cela représente 55% de la taille de la personne couchée sur la planche. (0,94m / 1,70m).

Nous avons deux conditions d'équilibre pour séparer l'effet des forces et celui des moments. En effet, la force a tendance à déplacer un objet le long de sa ligne d'action alors qu'un moment cherche à provoquer une rotation due à son bras de levier.

2. Mobilité du centre de masse corporel :

Le centre de masse du corps humain est normalement situé au niveau de la seconde vertèbre sacrée, S2. Mais dès que l'on déplace un bras ou une jambe on déplace le centre de masse corporel. Cela est dû au fait que notre corps n'est pas rigide mais articulé. La figure 5 illustre la position du centre de masse pour certaines activités sportives. Lors d'un saut, un déplacement des segments corporels ne changera pas la hauteur du centre de masse corporel par rapport au sol pour une même impulsion. Par exemple, le centre de masse corporel de

chacun des deux joueurs de basket-ball de la figure 7 c) atteint la même hauteur, h quels que soient les changements de position du corps en l'air. Cependant, la hauteur de la main et de la tête au-dessus du sol varie avec la position que prend le corps. Lors d'une mise au jeu au basket-ball, le joueur de la droite de la figure 7 c) garde son centre corporel en dessous de sa ceinture alors que celui du joueur de gauche est situé au-dessus de sa ceinture, dû aux bras élevés. Le joueur de droite a déplacé son centre de masse corporel vers le bas en abaissant le bras et l'épaule gauches. Cela permet à la main d'atteindre une meilleure hauteur pour prendre le ballon avant son adversaire.

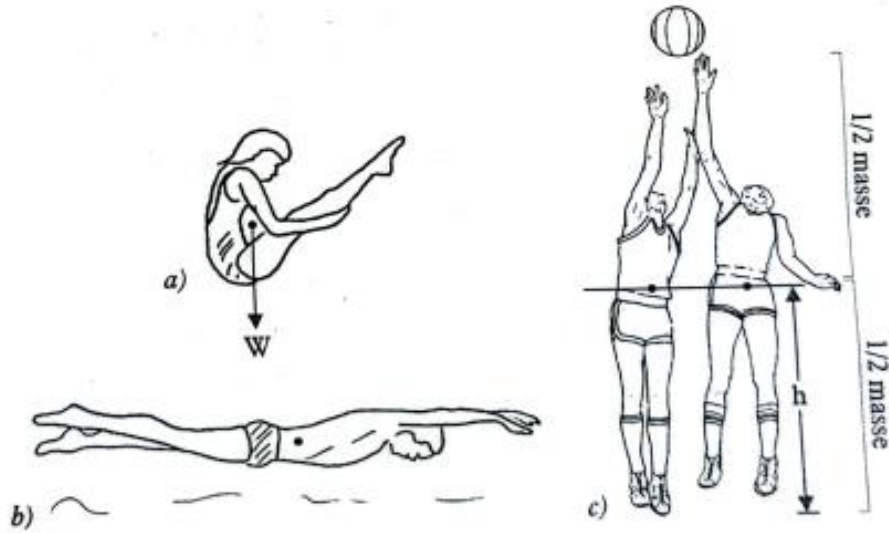


Figure 7: La position du centre de masse, représenté par un point, varie selon la posture ;
D'après Kreighmaum et Barthels (2000) in Allard et al. (2011)

Le centre de masse corporel peut se déplacer dans le plan sagittal comme dans le plan frontal. Il est possible de le localiser dans les trois plans anatomiques. On emploie la même technique que celle illustrée à la figure 8. Dans cette position, on détermine la hauteur du centre de masse par rapport aux pieds. Mais en plaçant le point d'appui entre les jambes ou près des chevilles tel qu'indiqué à la figure 8, on obtient la position du centre de masse dans les plans frontal et sagittal respectivement.

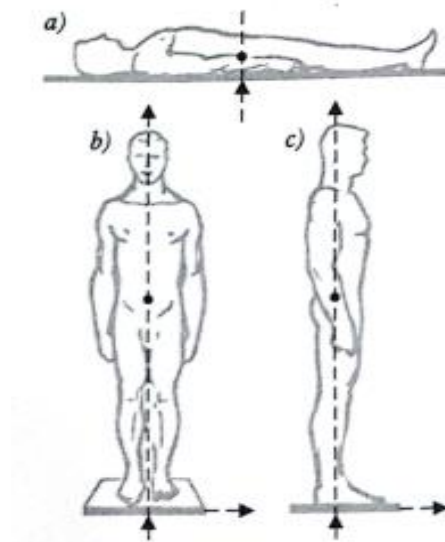


Figure 8: Position du centre de masse corporel par rapport : a) au pied (hauteur), b) au plan frontal, c) au plan sagittal.

3. Base de support (polygone de sustentation) ou équilibre postural :

Lorsque l'on se déplace, le centre de masse corporel se déplace lui aussi. Nous avons vu plus haut que le centre de masse peut se situer à l'intérieur comme à l'extérieur du corps. Mais quelle est sa relation avec le type d'appui que nous avons au sol ?

Le contact avec le sol va délimiter notre base de support ou polygone de sustentation.

En position debout illustrée à la figure 9, la base de support est circonscrite de chaque côté par le bord externe de nos pieds. À quatre pattes, la base de support vient de s'agrandir considérablement et est essentiellement délimitée par les appuis manuels et podaux comme à la figure 10. La position du centre de masse par rapport à cette base de support va directement déterminer notre stabilité ou équilibre.



Figure 09 La base de support est déterminée par le bord externe des pieds (Zone ombrée).



Figure 10: Avec un appui manuel et podal, la base de support augmente considérablement.

Principe n°1 : l'équilibre postural est assuré aussi longtemps que le centre de masse demeure à l'intérieur du périmètre de la base de support.

Plus la grandeur de la base de support est grande plus la stabilité est accrue.

Il y a plusieurs facteurs qui affectent notre équilibre postural. Comme l'indique la figure 9, un frappeur au base-ball a un équilibre moins précaire qu'une ballerine se tenant sur la pointe d'un pied.

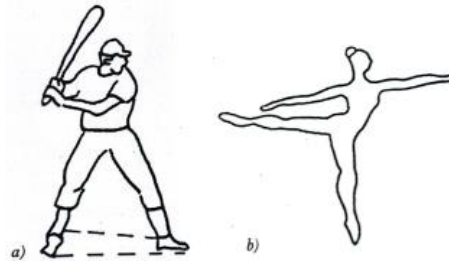


Figure 9: Avec les pieds au sol, les jambes écartées, le frappeur en a) a une plus grande base de support que celle de la ballerine en b) qui se tient sur la pointe d'un pied.
(Allard et al., 2011)

De plus, la stabilité s'accroît si l'on élargit la base de support dans la direction d'où provient la force déséquilibrante. C'est pourquoi le joueur de base-ball de la figure 11 place ses pieds l'un devant l'autre dans la direction du lanceur.

La hauteur du centre de masse joue aussi sur la stabilité. Une personne de plus grande taille possède un centre de masse plus élevé qu'une de plus petite taille comme l'illustre la figure 12.

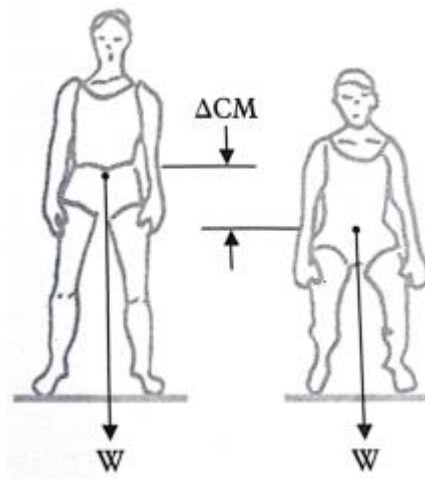


Figure 10: Deux personnes de même poids W mais de tailles différentes n'auront pas leur centre de masse au même endroit. La plus grande sera moins stable, son centre de masse sera plus élevé de ΔCM (Allard et al., 2011).

Ainsi un lutteur va se tenir debout les genoux fléchis pour abaisser son centre de masse. De cette façon, l'adversaire aura plus de difficultés à le faire basculer car la distance verticale entre son centre de masse et le sol, le bras de levier, est plus petit.

Le poids du sujet influe aussi sur l'équilibre. Un individu lourd aura plus de difficulté à reprendre son équilibre lors d'une chute qu'une personne légère, son poids favorisant la chute. En effet, le moment dû au poids sera plus important chez un sujet lourd. Par contre, on aura plus de difficulté à le déséquilibrer.

Entre en jeu également, la position de la ligne d'action de la gravité d'une charge par rapport à la base de support. Dans l'exemple de la figure 13, la ligne d'action de la gravité de la charge soulevée et du poids corporel passe au milieu de la base de support, soit entre les pieds, assurant une bonne stabilité.

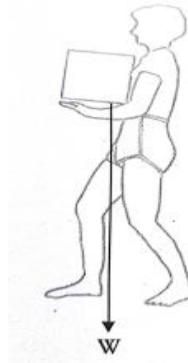


Figure 11: Femme transportant une boîte. La ligne d'action de la charge et du poids corporel passe entre les pieds et demeure à l'intérieur de la base de support, ce qui assure une bonne stabilité (Allard et al., 2011).

On met à profit ce principe pour favoriser une chute en avant du corps lors des départs en course. Le coureur de la figure 14 se tient en équilibre en gardant la ligne d'action de la gravité à l'intérieur de la base de support. Mais cet équilibre postural est instable car la ligne d'action se situe à la limite antérieure de la base de support, c'est-à-dire au niveau des mains. Dès le départ donné, le coureur retire ses mains faisant en sorte que la ligne d'action passe au-delà de la base de support, le mettant ainsi en déséquilibre total. Cet effet est recherché afin de forcer le coureur à récupérer son équilibre en avançant le plus rapidement possible donc en lui conférant un départ rapide.

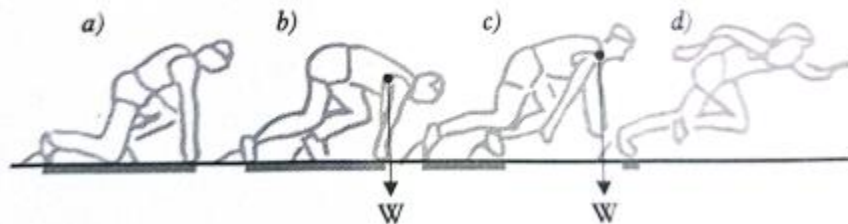


Figure 12: Position de départ d'une course (Allard et al., 2011)

Enfin une bonne adhérence entre les surfaces de contact telles que les pieds et le sol apporte un plus grand équilibre. Il est facile de comprendre les difficultés qu'une personne peut avoir à marcher sur de la glace vive ou sur un plancher mouillé.

Ainsi, les cinq facteurs biomécaniques responsables de notre équilibre postural sont :

- La grandeur de la base de support,
- La hauteur du centre de masse,
- Le poids
- La position de la ligne d'action de la gravité par rapport à la périphérie de la base de support et
- L'adhérence au sol.

CENTRES DE MASSE CORPOREL ET SEGMENTAIRE (2)

Objectifs d'apprentissage

1. Savoir calculer le poids, la masse et la longueur des différents segments corporels et localiser leur centre de masse.
2. Savoir calculer la position du centre de masse combiné de plusieurs segments corporels.

1. Masse et longueur segmentaire :

Il existe une science, l'anthropologie physique, qui étudie les différentes caractéristiques physiques de l'être humain telles que sa taille, son poids, la forme de son nez, etc. En biomécanique, certains de ces attributs sont importants pour quantifier les forces musculaires. La branche de l'anthropologie physique qui a pour objet la mesure du corps humain s'appelle l'anthropométrie. Ces mesures anthropométriques sont souvent présentées sous forme de tableaux où les valeurs sont normalisées, c'est-à-dire généralisées à l'ensemble des individus d'âges, de masses et de sexes différents.

Ainsi, tout comme notre corps a un centre de masse, chacun de ses segments possède le sien.

Tableau 3: Centres de masse segmentaires adaptés de Winter (1990)

Membre	Segment	Masse seg. / masse corp.	Distance du CM/ longueur du segment	
			Proximale	Distale
Tête, cou et tronc	Epaule/Hanche	0,578	0,66	0,34
Tête et cou	7 ^e cervical/oreille	0,081	1,000	0,000
Main	Poignet/2e articulation du majeur	0,006	0,506	0,494
Avant-bras	Coude/poignet	0,016	0,430	0,570
Bras	Epaule/coude	0,028	0,436	0,564
Membre supér.	Epaule/poignet	0,050	0,530	0,470
Pied	Malléole lat./ MTP II	0,0145	0,500	0,500
Jambe	Genou/malléole méd.	0,0465	0,433	0,567
Cuisse	Hanche/genou	0,100	0,433	0,567
Membre infér.	Hanche/malléole méd.	0,161	0,477	0,533

Le tableau 1 rapporte pour quelques segments la masse normalisée en fonction de celle de l'individu. Pour une masse totale de 70kg, votre avant-bras a une masse de 1,12 kg ($70\text{kg} \times 0,016 = 1,12\text{ kg}$). Le tableau indique également les points de repère des articulations ainsi que la position des centres de masse segmentaires rapportés en relation avec la longueur de chaque segment défini par ses repères. Ainsi, pour un avant-bras de 0,255 m de long, le centre de masse est situé à 0,110 m ($0,255\text{ m} \times 0,430 = 0,110\text{ m}$) de l'articulation proximale, soit le coude, comme l'indique la figure 1. Mais il est aussi bien situé à 0,145 m ($0,255\text{ m} \times 0,570 = 0,145\text{ m}$) de l'articulation distale, soit celle du poignet.

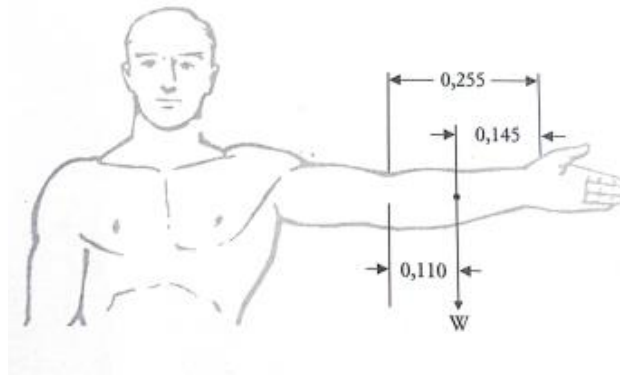


Figure 13: Le centre de masse de l'avant-bras est situé à 0,110 m du coude (articulation proximale) ou à 0,145 m du poignet (articulation distale) (Allard et al., 2011).

La figure 16 illustre pour l'ensemble du corps, la position des centres de masse segmentaires exprimée en pourcentage de la longueur des segments respectifs et par rapport aux articulations proximales et distales. Contrairement au centre de masse corporel qui peut se déplacer selon le mouvement des bras ou des jambes, le centre de masse segmentaire est fixe à l'intérieur du segment. Notons que, bien que le centre de masse soit fixe par rapport au segment, il peut se déplacer avec celui-ci, par rapport au reste du corps.

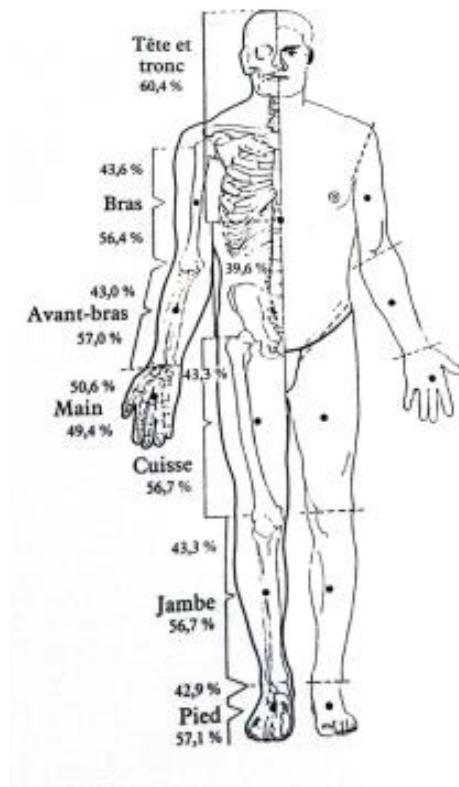


Figure 14: Position du centre de masse segmentaire exprimée en pourcentage de la longueur du segment (Le Veau, 2011 in Allard et al., 2011).

2. Distribution de la masse segmentaire :

Il est intéressant de noter la distribution de la masse des différents segments du corps humain par rapport à l'axe vertical du segment tronc/tête. La figure 2 illustre la répartition des masses segmentaires. Le tronc et la tête représentent près de 60 % du poids total du corps humain. Les membres supérieurs comptent pour 10 % du poids du corps alors que les membres inférieurs en constituent plus de 32 %.

Les segments du membre supérieur et inférieur sont d'autant moins lourds que l'on s'éloigne de l'axe du tronc et cela dans un rapport d'environ 5 ; 3 ; 1 : le bras est 4,7 fois plus lourd que la main et l'avant-bras est 2,7 fois plus lourd que la main. Pour le membre inférieur, la cuisse fait 6,9 fois le poids du pied et la jambe 3,2.

L'effort nécessaire pour déplacer un segment dépend de sa masse et de la distance entre le centre de masse et l'axe de rotation. Or, les segments qui se déplacent le plus dans l'espace, comme la main ou le pied, sont les moins lourds, facilitant notamment la tâche de lancer ou de botter. C'est cette distribution de masses segmentaires du plus lourd au plus léger qui constitue le second principe de la biomécanique du mouvement humain.

Principe 2 : les masses segmentaires les plus légères sont les plus éloignées du tronc.

Le fait d'avoir les masses segmentaires les plus légères aux extrémités nous favorise. Nos articulations font surtout partie d'un système de levier inter-moteur. C'est-à-dire que nous avons cédé l'avantage mécanique pour faciliter nos mouvements par un meilleur avantage cinématique. La position des masses segmentaires les plus lourdes près du tronc réduit l'effort musculaire que nous devons déployer dans un système de levier inefficace. Nous pouvons apprécier l'effet contraire en portant des poids aux poignets et aux chevilles. Plusieurs sportifs s'entraînent de cette façon car des poids relativement légers deviennent un fardeau lorsqu'ils sont situés aux extrémités des membres.

3. Centre de masse combiné :

En additionnant toutes les masses segmentaires, on obtient la masse totale du corps.

$$M = m_{\text{tête}} + m_{\text{tronc}} + m_{\text{bras}} + m_{\text{avant-bras}} + m_{\text{mains}} + m_{\text{cuisse}} + m_{\text{jambes}} + m_{\text{pieds}}$$

$$M = \sum m_i$$

Où M est la masse corporelle totale, m la masse du segment, et i un chiffre se rapportant à chaque segment.

De la même façon, en tenant compte de tous les centres de masse segmentaires et de leurs valeurs individuelles, on pourrait déterminer la position du centre de masse du corps humain. A titre d'exemple, calculons la position du centre de masse du complexe cuisse/jambe/pied illustrée à la figure 3.

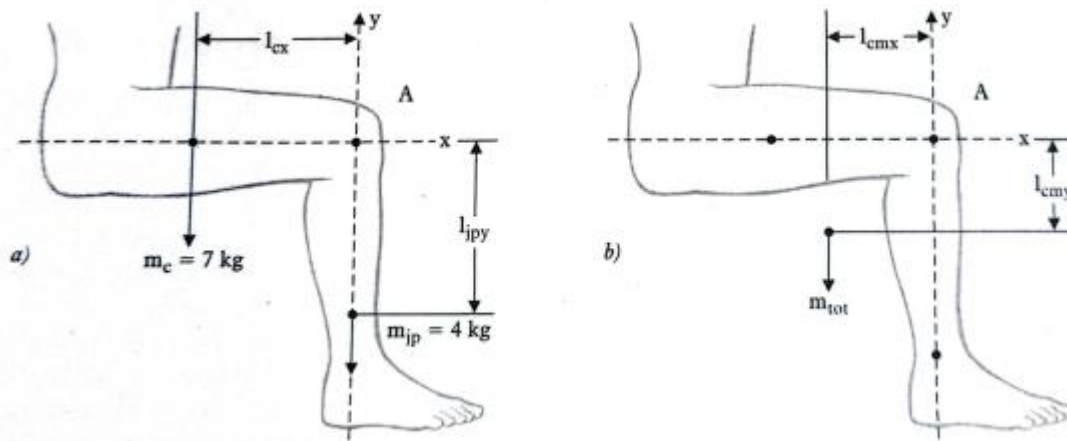


Figure 15: Les masses de la cuisse et du segment jambe/pied sont données en a). Un système équivalent comprenant l'ensemble cuisse/jambe/pied est représenté en b) (Allard et Blanchi, 2000).

Pour simplifier les calculs, on connaît déjà la masse de la cuisse, m_c (7 kg), celle de du segment jambe-pied, m_{jp} (4 kg). La position des centres de masse est aussi donnée. Il s'agit maintenant de déterminer la position du centre de masse combiné.

Pour déterminer la position du centre de masse, on établit un système équivalent. Dans l'exemple suivant, nous allons déterminer le centre de masse total ou combiné à partir de deux centres de masse segmentaire. La figure 17a) présente séparément la masse de la cuisse et celle du segment jambe/pied, alors que la figure 17b) représente un système équivalent à une seule masse totalisant celle de la cuisse et du segment jambe/pied. Il s'agit de trouver le centre de masse de la masse équivalente ou totale. Dans cet exemple, il n'y a que deux segments. Le centre de masse de l'ensemble de ces segments se trouve sur une droite reliant le centre de masse de la cuisse à celui du segment jambe-pied. Cela correspondrait à la distance moyenne pondérée en relation avec la distribution des masses. On effectue le calcul par rapport à un point donné, A, soit au genou dans ce cas particulier.

Au point A, se situe l'origine d'un système de coordonnées c'est-à-dire que l'on dresse un axe vertical (vers le haut) et un autre horizontal (vers la droite). L'axe verticale correspond à l'axe des y alors que l'axe horizontal est celui des x. Chaque axe constitue une échelle de distance, mesurée en m. On identifie un point quelconque par une coordonnée correspondant au croisement des axes (échelles).

Ainsi, l'origine ou le point A, possède les coordonnées 0,0, c'est-à-dire, zéro en x et zéro en y. Tous les points ou les coordonnées à gauche ou au-dessous de l'origine sont négatifs. Les coordonnées du centre de masse de la cuisse sont -0,227m en x et 0,000m en y (-0,227, 0,000). Lorsqu'une valeur est nulle, cela signifie que le point se situe à gauche de l'origine et sur l'axe horizontal. Les coordonnées du centre de la jambe/pied sont de 0,000 m en x et -0,240 m en y (0,000, -0,240).

Ce calcul s'apparente à celui du moment. Ici on ne considère pas l'effet de la gravité ($9,8\text{m/s}^2$) car ce terme se retrouve de chaque côté de l'équation. Par contre si on le conserve, on a alors l'équation du moment car des Newton sont multipliés par une unité de longueur.

Données du problème pour l'axe des x (horizontal) :

Masse de la cuisse	$m_c = 7 \text{ kg}$
Masse du segment jambe/pied	$m_{jp} = 4 \text{ kg}$
Masse totale (7 + 4)	$m_{\text{tot}} = 11 \text{ kg}$
Bras de levier de la cuisse en x	$l_{cx} = -0,227 \text{ m}$
Bras de levier du segment	
Jambe/pied en x	$l_{jpx} = 0,000 \text{ m}$ (la ligne d'action passe par le point A donc aucun bras de levier en x)
Bras de levier de la masse totale	$l_{cmx} = \text{à déterminer}$

Pour déterminer la position du centre de masse combiné sur l'axe des x (axe horizontal), l_{cmx} on calcule l'effet de la cuisse et du segment jambe/pied à l'aide des données précédentes.

Effet cuisse	Effet Jambe/pied	Effet total
$m_c \cdot l_{cx}$	$+ m_{jp} \cdot l_{jpx}$	$= m_{\text{tot}} \cdot l_{cmx}$
$7 \text{ kg} \times -0,227 \text{ m}$	$+ 4 \text{ kg} \times 0,000$	$= 11 \times l_{cmx}$
$- 1,589$	$+ 0,000$	$= 11 \times l_{cmx}$
$- 1,589/11$		$= l_{cmx}$
$- 0,144 \text{ m}$		$= l_{cmx}$

Ou 14,4 cm à gauche du point A

Pour déterminer la position du centre de masse le long de l'axe des y, l_{cmy} , on procède de la manière que pour trouver l_{cmx} . Cette fois-ci, par contre, les bras de levier ne sont plus pris à l'horizontale, mais à la verticale et toujours par rapport au point A.

Données pour l'axe y (vertical) :

Bras de levier de la cuisse en y $l_{cy} = 0,00\text{m}$ (la ligne d'action passe par le point A donc aucun bras de levier en y)

Bras de levier du segment jambe/pied en y : $l_{jpy} = -0,240\text{ m}$

Bras de levier de la masse totale : $l_{cmy} = \text{à déterminer}$

Pour déterminer la position du centre de masse combiné sur l'axe des y (axe vertical), l_{cmy} on calcule l'effet de la cuisse et du segment jambe/pied à l'aide des données précédentes.

Effet	Effet	Effet
Cuisse	jambe/pied	total
$m_c \times l_{cy}$	$+ m_{jp} \times l_{jpy}$	$= m_{tot} \times l_{cmy}$
$7\text{ kg} \times 0,00$	$+ 4\text{ kg} \times (-0,240)$	$= 11 \times l_{cmy}$
$0,00$	$-0,960$	$= 11 \times l_{cmy}$
$-0,960/11$		$= l_{cmy}$
$l_{cmy} = -0,0873\text{ m}$		

ou 8,73 cm en bas du point A. La coordonnée du centre de masse combiné est $(-0,144, -0,087)$.

TRAJECTOGRAPHIE

Objectifs d'apprentissage

1. Nommer et expliquer les facteurs qui influent sur la distance parcourue lors du saut en longueur.
2. Calculer la vitesse linéaire.
3. Savoir utiliser les équations du mouvement parabolique pour estimer la hauteur, la distance horizontale, l'angle et la vitesse de projection.
4. Maîtriser les facteurs influant sur le mouvement parabolique et les appliquer à différentes pratiques sportives.

La notion de centre de masse nous permet de représenter le corps humain comme une masse qui se déplace dans l'espace. Le mouvement le plus simple à analyser est celui de la chute libre car il n'y a aucune force externe à l'exception de celle due à la gravité. Des règles simples servent à décrire toutes les trajectoires aériennes qu'il s'agisse de celle d'un ballon, d'une balle de golf, d'un plongeur ou d'une gymnaste. Nous allons décrire la trajectoire aérienne du centre de masse d'un athlète lors d'un saut en longueur. Cela permettra d'estimer sa performance en calculant la distance horizontale franchie durant son envol. Mais auparavant, examinons les facteurs biomécaniques qui influent sur le saut en longueur.

1. Facteurs biomécaniques associés à la longueur du saut :

L'objectif du sauteur est d'obtenir un déplacement horizontal maximal de son centre de masse tout en respectant les règles qui régissent l'épreuve. Cela signifie que le sauteur doit atteindre la plus grande distance horizontale possible.

La distance totale du saut, à savoir du bord avant de la planche d'appel à la marque dans le sable produite par le sauteur, est considérée comme étant la somme de trois longueurs telle qu'indiqué à la **figure 18** :

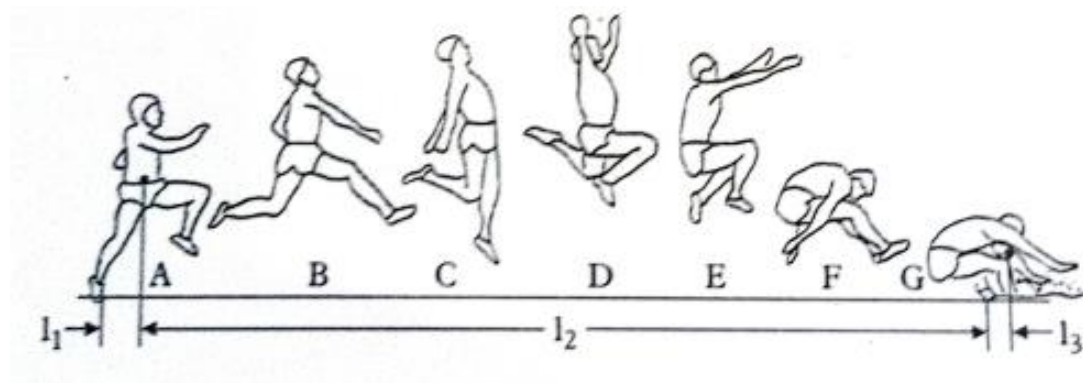


Figure 16 : Les longueurs d'appel, $L1$, de vol, $L2$, et de réception $L3$, totalisent la longueur totale du saut.

- 1) La distance entre le bord avant de la planche d'appel et le centre de masse du sauteur constitue la longueur d'appel, l_1 .
- 2) La distance horizontale parcourue par le centre de masse lors de la phase de suspension est la longueur de vol, l_2 .
- 3) La distance entre la position du centre de masse à l'impact et la marque produite dans le sable donne la longueur de réception, l_3 .

La contribution de chacune des trois longueurs par rapport à la distance totale parcourue est donnée au tableau 1 :

Tableau 4: Contributions relatives des trois longueurs totalisant la distance parcourue lors d'un saut en longueur.

Longueur	Distance (m)	%
Appel	0,24	3,6
Vol	5,98	88,6
Réception	0,53	7,8
Total	6,75	100

Près de 90 % de la distance est parcourue dans les airs. Or dans les airs, la principale force qui agit c'est la force due à la gravité.

Les facteurs affectants chacune des trois longueurs fondamentales du saut en longueur sont résumés au tableau 5 :

Tableau 5 : Facteurs affectants chacune des trois longueurs fondamentales du saut en longueur.

Longueurs	Facteurs
Appel	Précision d'appel
	Morphologie
	Position du corps
	Hauteur d'appel
Vol	Vitesse d'appel
	Angle d'appel
	Résistance de l'air
Réception	Position du corps à l'impact
	Grandeur et orientation des forces

1.1. Longueur d'appel :

La longueur d'appel dépend premièrement de la précision avec laquelle le sauteur pose son pied sur le bord avant de la planche. D'autre part, tout ce qui est avant la planche d'appel

ne compte pas dans la mesure de la longueur du saut. D'autre part, le sauteur doit s'efforcer de ne pas dépasser le bord avant de la planche d'appel car le saut sera rejeté. On parle donc de la précision d'appel.

Les facteurs morphologiques sont aussi très importants. La longueur d'appel est proportionnelle à la longueur du membre inférieur du sauteur. Elle correspond à peu près à la longueur du membre inférieur fois le cosinus de l'angle formé par l'axe de la jambe et l'horizontal. Plus l'athlète est petit, moins grande sera sa longueur d'appel.

La position du corps au moment du contact terminal joue sur l'angle du membre inférieur. Plus l'athlète est penché vers l'avant, plus la distance d'appel sera grande.

1.2. Longueur de vol

Les facteurs qui affectent la longueur de vol chez le sauteur sont les mêmes qui régissent le vol des engins et des missiles. Ces facteurs affectent le saut en longueur, le saut en hauteur et le triple saut aussi bien que le plongeon. Le mouvement de l'athlète dans les airs est régi par les lois de la trajectographie. La trajectographie est l'étude de la trajectoire ou du chemin parcouru par un projectile, un sauteur ou un engin.

La résistance de l'air, la hauteur d'appel, la vitesse d'appel et l'angle d'appel déterminent la trajectoire aérienne du sauteur.

La vitesse de l'air peut aider ou nuire au saut. Si le vent vient de l'arrière et pousse dans le dos du sauteur, son saut sera d'autant meilleur, par contre, si le vent souffle de face, la résistance de l'air va réduire sa vitesse horizontale et forcer le sauteur à atterrir vite.

A la fin de l'impulsion, l'athlète se tient debout, légèrement incliné vers l'avant. Son centre de masse est à peu près à 1,10 m du sol. Cela correspond à la hauteur d'appel. A la réception, le sauteur est replié sur lui-même avec les jambes presque à l'horizontale. Son centre de masse est à 0,45 m du sol. Il y a une différence de 0,65 m entre la hauteur du centre de masse à l'appel et celle à l'impact. Cette différence permet à l'athlète de parcourir une plus grande distance horizontale.

On voit immédiatement une situation complexe à la fin de la phase d'impulsion. D'une part, on veut s'incliner le plus possible pour augmenter la longueur d'appel et d'autre part, on doit augmenter la hauteur du centre de masse en restant le plus droit possible pour favoriser une plus grande longueur de vol. Une façon d'augmenter la hauteur d'appel ou d'élever son centre de masse sans jouer sur l'inclinaison du tronc est de relever les bras et la jambe lors de la phase d'impulsion. Cela aura pour effet d'augmenter la hauteur effective du centre et par conséquent la hauteur d'appel.

La vitesse d'appel est la vitesse de l'athlète au moment du contact terminal avec la planche. C'est de loin le facteur le plus important et il dépend entièrement de la vitesse que l'athlète pourra développer lors de la course d'élan et des pertes de vitesse associées aux

ajustements qu'il a faits dans la préparation de la phase de suspension. La combinaison idéale est de maximiser la vitesse de course et minimiser les pertes d'ajustements.

Le rapport des vitesses verticale et horizontale (plus exactement l'arctangente du rapport des vitesses) constitue l'angle de projection.

$$\text{Angle de Projection} = \arctan \left(\frac{\text{vitesse verticale}}{\text{vitesse horizontale}} \right)$$

L'angle de projection est l'angle auquel un engin ou un corps quelconque est propulsé dans les airs. Au golf il y a plusieurs sortes de bâtons mais les plus communs sont les bois, les fers et le putter. Les bâtons sont utilisés pour frapper la balle à différentes distances selon que le trou est proche ou éloigné du golfeur. Les bois sont employés pour les longs coups de départ. Le poids de la tête ou de l'extrémité d'un bois va conférer une bonne impulsion à la balle de golf. Dans le *fairway* ou le parcours, les fers sont habituellement utilisés. Une fois sur le vert, le golfeur se sert d'un putter pour faire rouler la balle dans le trou. Le choix d'un bâton repose sur l'inclinaison de la lame qui confère à la balle un angle de projection adapté à la distance à franchir jusqu'au trou. L'inclinaison de la tête des bâtons de golf, illustrée à la **figure 19** varie entre 7° pour un bois 1 (driver) à 23° pour un bois 5. Et entre 15° pour un fer 1 et 56° pour un *sandwedge* utilisé dans les frappes de sable. A titre d'exemple, un fer 2 servira loin du trou afin de donner une longue trajectoire à la balle de golf. Par contre, un fer 9 sera employé près du trou afin que la balle s'élève haut dans les airs pour retomber sur le vert souvent situé sur un monticule légèrement plus élevé que le *fairway*. Le *putter* qui a une lame plate sans inclinaison fera rouler la balle plutôt que la projeter dans les airs.

Pour le saut en longueur, l'angle de la projection est appelé angle d'appel, pour l'associer à l'instant où l'athlète quitte la planche d'appel. Il ne faut pas confondre l'angle d'appel avec l'angle du membre inférieur. Le premier est un rapport de vitesses alors que le second est une position adoptée par l'athlète. Il faut toutefois préciser que l'angle d'appel se maintient aux environs de 22°, témoignant d'une vitesse horizontale trois fois supérieure à la vitesse verticale. Encore une fois, l'athlète est pris dans une situation de compromis. Il cherche à développer la vitesse verticale qui le maintiendra le plus longtemps possible dans les airs tout en favorisant une vitesse horizontale pour la plus grande distance. De plus, en courant rapidement, l'athlète passe moins de temps au sol. Il lui est donc difficile de développer une grande vitesse verticale tout en maintenant une vitesse horizontale élevée.

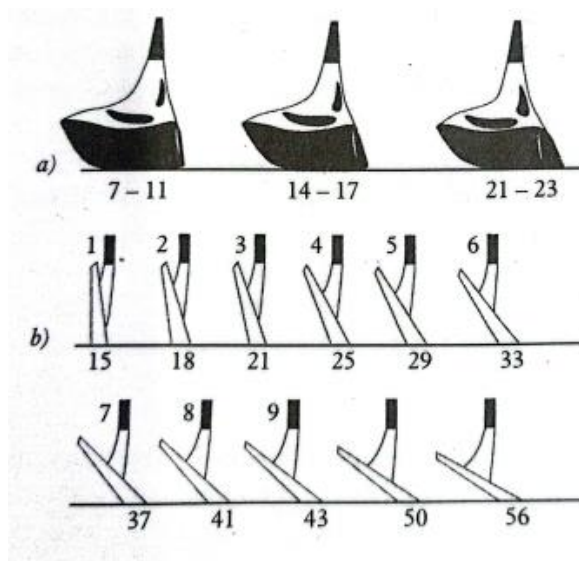


Figure 17 : Inclinaison de la tête des bâtons de golf. a) Les bois et b) les fers (Allard et Blanchi, 2000).

1.3. Longueur de réception :

La longueur de réception dépend de la position du corps de l'athlète au moment de l'impact et des actions mises en œuvre pour le projeter vers l'avant et éviter de le faire basculer vers l'arrière. Une mauvaise réception réduirait la longueur de saut. Les facteurs affectant la position du corps à l'impact sont les rotations imparties au corps lors de l'impulsion, les mouvements effectués à la phase de suspension et la préparation à l'impact.

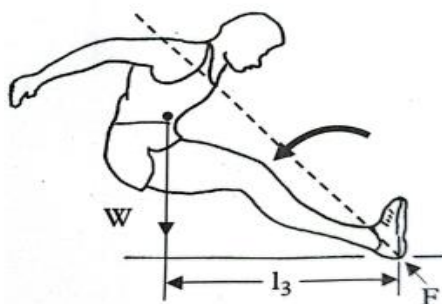


Figure 18 : Les jambes tendues et la force au sol font en sorte que la longueur de réception L_3 est maximale. L'athlète aura tendance à s'asseoir (Kreighbaum et Barthels, (1985) in Allard et al. (2011)).

Le fait que le sauteur tombe à la renverse dans le sable ou bascule vers l'avant dépend de la position du corps de l'athlète en relation avec la magnitude et l'orientation des forces exercées sur lui lors de l'impact. Si l'athlète touche le sable de la fosse, les jambes tendues comme à la **figure 20** la force d'impact au sol aura tendance à freiner son mouvement vers l'avant. Son poids situé à l'arrière du point de contact fera tomber le sauteur vers l'arrière. Par contre, si ces pieds touchent au sol légèrement en avant de son centre de masse, le corps aura tendance à pivoter sur les pieds et à basculer vers l'avant comme l'indique la **figure 21**. (Il y a aussi un

autre facteur, la quantité de mouvement, qui cherche à entraîner l'athlète vers l'avant). L'athlète doit atteindre un compromis entre ces deux positions extrêmes où la première (**figure 21**) lui donne la meilleure distance de réception, l_3 et l'autre l'empêche de tomber vers l'arrière.

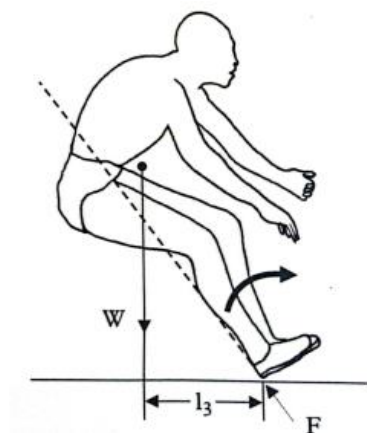


Figure 19 : Les jambes fléchies, le centre de masse le plus près possible du point d'impact, l'athlète a une longueur de réception, l_3 , raisonnable. Il aura tendance à basculer vers l'avant (Kreighbaum et Barthels, (1985) in Allard et al. (2011)).

2. Mouvement parabolique

Dans le saut en longueur, la longueur la plus importante est celle parcourue dans les airs. À ce moment, seul l'effet de la gravité tend à faire tomber l'athlète dans son vol. Quatre facteurs influant sur la trajectoire aérienne ont été décrits ci-haut. Mais de quelle manière ces facteurs interviennent-ils ?

Avant d'appliquer les lois de la trajectographie aux sports et plus particulièrement au saut en longueur, nous allons revoir quelques notions de base de la cinématique.

A la **figure 22**, deux boules sont libérées en même temps et des clichés photographiques ont été pris à un intervalle régulier (tous les soixantièmes de seconde ou tous les 0,0167 s) pour fixer dans le temps la position des boules. La première tombe suivant une ligne droite correspondant à la verticale. On note l'effet de la force due à la gravité qui attire tout objet vers le centre de la terre. La seconde suit une trajectoire bien différente. On remarque cependant que son déplacement vertical est exactement le même que celui de la première boule ! Cela est parfaitement normal car les deux boules sont attirées de la même manière par l'attraction de gravité. Ce qui distingue la seconde de la première boule est sa trajectoire courbée ou parabolique. La première boule a été tout simplement laissée tomber alors que la seconde a été poussée horizontalement par un ressort. On remarque que la distance horizontale entre deux positions successives de la seconde boule est constante alors que son déplacement (ou distance) verticale d'une position à l'autre augmente sans cesse.

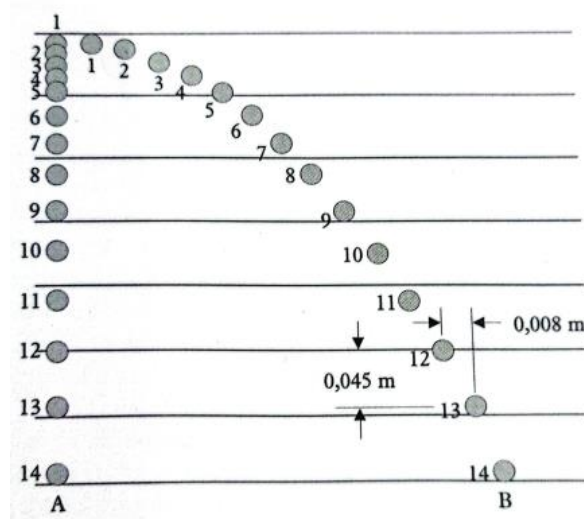


Figure 20 : Deux boules libérées simultanément. La boule A n'a pas de vitesse de départ alors que la boule B possède seulement une vitesse horizontale. La gravité attire les boules de la même manière
(Allard et Blanchi, 2000).

À partir du déplacement parcouru par une des deux boules et le temps écoulé entre deux positions de celle-ci, on calcule sa vitesse :

$$v = \Delta d / \Delta t \quad (2)$$

Où v est la vitesse exprimée en mètre par seconde (m/s), Δd le déplacement en mètre et Δt l'intervalle de temps en seconde (s). Comme le déplacement vertical des boules augmente continuellement pour un intervalle de temps régulier, la vitesse verticale augmente au fur et à mesure que les boules s'approchent du sol, soit un mouvement uniformément accéléré. Par contre, le déplacement horizontal pour la première boule est nul donc la vitesse est aussi nulle. Pour la seconde boule, son déplacement horizontal est régulier et sa vitesse est constante ; elle a donc un mouvement uniforme.

Par exemple, le déplacement vertical de la première boule entre les positions 12 et 13 est de 45 mm ou 0,045 m et le temps écoulé est de 0,0167 s. la vitesse verticale est de 2,7 m/s (0,045/0,0167). Pour le même instant (positions 12 et 13), le déplacement horizontal de la seconde boule est de 0,008 m ; donc la vitesse horizontale est de 0,48 m/s (0,008/0,0167).

Dans un autre exemple, il est important de distinguer la trajectoire parabolique telle que suivie par la flèche de la **figure 23 a)** et la ligne de vision. Cette dernière est simplement une droite allant de l'œil à la cible. La ligne de vision correspond à l'horizontale lorsque l'œil et la cible sont de même niveau. En absence de gravité, la vitesse verticale demeurerait constante tout comme la vitesse horizontale. La trajectoire de la flèche à vitesse constante serait une droite dont la pente ou l'angle avec l'horizontale serait égale à l'angle de projection.

La **figure 23 b)** illustre une trajectoire parabolique où les vitesses aux points A à E sont identifiées. La vitesse horizontale est constante (en absence de la résistance de l'air) et est toujours dirigée vers la droite. Par contre dans la phase ascendante (point A) de la courbe, la

vitesse verticale est orientée vers le haut alors que dans la phase descendante (point C à E) elle est dirigée vers le bas. Par conséquent, la vitesse verticale doit avoir un point, situé entre A et C, où elle est nulle, ni dirigée vers le haut, ni orientée vers le bas. Ce point est l'apogée, tout comme pour le saut en longueur. Il se situe au sommet de la trajectoire au point B.

Pour la partie au-dessus de l'horizontale, la trajectoire d'une courbe parabolique est symétrique par rapport à son apogée. On peut poursuivre la trajectoire plus loin que le point D, tel que représenté par le segment DE situé au-dessous de la ligne horizontale à la **figure 6 b)**. Cette trajectoire correspond à celle du centre de masse de l'athlète effectuant un saut en longueur, celui d'un caillou projeté dans les airs, ou d'un plongeon, etc. Le fait de partir d'un point O, un peu plus haut qu'à l'arrivée E, permet de parcourir une longueur horizontale l_{DE} de plus à la longueur de base l_{OD} .

Durant la phase de suspension du saut en longueur, on peut calculer les vitesses horizontale et verticale du sauteur. Comme pour la boule, les vitesses représentent celles du centre de masse du sauteur. Un peu plus loin on verra comment calculer les déplacements et les vitesses de tous les segments du corps.

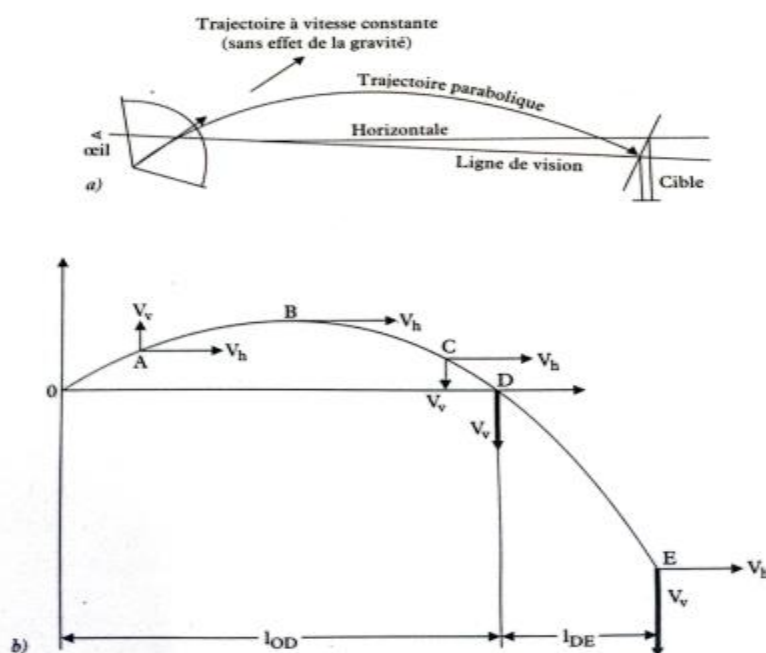


Figure 21 : a) Tir à l'arc et trajectoire de la flèche par rapport à l'horizontale ; b) une trajectoire parabolique et ses paramètres (Allard et Blanchi, 2000).

3. Équations du mouvement parabolique

Comment fait-on pour calculer la hauteur ou la distance parcourue ? On se sert des vitesses, de la gravité et du temps écoulé.

Avant tout, on décompose le mouvement parabolique en deux, à savoir les composantes horizontale et verticale. En effet, le mouvement vertical est indépendant du mouvement

horizontal. Il y a un peu moins de deux mille quatre cents ans, Aristote (384 à 322 av. J.-C.) faisait déjà la distinction entre le mouvement dit « naturel » et le mouvement « non-naturel » (Parker, 1992). Un objet qui se déplace vers le haut ou vers le bas est animé d'un mouvement « naturel ». C'est l'exemple de la pierre qui tombe, de la fumée qui s'élève. Par contre, le mouvement est « non-naturel » s'il a une trajectoire horizontale comme un caillou ou une balle projetée au loin. Aristote avait compris les principes du mouvement aérien quelque deux mille ans avant que Galilée (1564-1642) les énonce.

3.1 Mouvement horizontal

La vitesse d'appel ou de projection correspond à la vitesse de l'athlète à l'instant où il quitte le sol. Cette vitesse a une composante horizontale et une verticale. La composante horizontale est obtenue en multipliant la vitesse d'appel par le cosinus de l'angle de projection.

3.2 Mouvement vertical

Trois équations régissent la composante verticale de la trajectoire parabolique. Elles sont :

$$V_f^2 = V_i^2 - 2 g y \quad (3)$$

$$V_f = V_i - g t \quad (4)$$

$$y = V_i t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (5)$$

Où V_i est la vitesse verticale initiale en m/s, au centre de masse ; V_f est la vitesse finale en m/s au point d'intérêt et NON A LA FIN DU SAUT ; g est la constante due à la gravité et est égale à $9,8 \text{ m/s}^2$ et t le temps exprimé en seconde. La position y du centre de masse du sauteur ou de l'engin est donnée par rapport à sa hauteur initiale avant son envol. Ainsi, à l'instant où le sauteur quitte la planche d'appel, y (la hauteur) augmente lorsque le centre de masse s'élève dans les airs (**figure 23 b**) et devient négatif lorsque le centre de masse est plus bas que sa position initiale à l'appel (**figure 23, point E**).

Avec les équations 2 et 5 on décrit de manière quantitative toutes les trajectoires paraboliques. Pour mieux saisir le sens de ces quatre équations, nous allons les reprendre pour décrire un saut en longueur.

4. Description analytique d'un saut en longueur

Tableau 6: Performances de saut en longueur ainsi que la vitesse de l'angle d'appel respectif

Athlète	Longueur de saut (m)	Vitesse d'appel (m/s)	Angle d'appel (degré)
G. Bell (E.U)	7,77	9,10	21°50'
R. Boston (E.U)	8,28	9,54	21°50'
J. Owens (E.U)	8,13	9,20	22°00
I. Robertson (E.U)	8,11	9,31	19°10
E. Shelby (E.U)	7,50	8,80	21°10

Le **tableau 6** rapporte pour quelques athlètes les principales caractéristiques de leur saut. À titre d'exemple, prenons le saut d'Owens (USA). La vitesse de projection ou d'appel est de 9,2 m/s et son angle de projection ou d'appel est de 22°. Si son centre de masse se situe à 1,10 m du sol, quelle est sa longueur de vol ? Quelle est la distance totale parcourue incluant les longueurs d'appel et de réception ?

Pour répondre à ces questions, les équations (2) et (5) vont être utilisées pour décrire de manière analytique la trajectoire aérienne du saut d'Owens. La trajectoire du centre de masse ressemble beaucoup à celle de la **figure 23 b**) où le point de départ (l'origine, O) est situé à 1,10 m du sol et le point d'arrivée à l'impact est à 0,45 m du sol de la fosse.

Aux exemples suivants, nous allons calculer dans l'ordre la hauteur de l'apogée (point C de la **figure 23 b**), le temps pour atteindre l'apogée, la longueur horizontale parcourue par le sauteur une fois que son centre de masse revient à la hauteur de départ (distance OD de la **figure 23 b**), la longueur de vol et finalement la longueur totale de saut. Ces exemples sélectionnés à des instants précis sur la trajectoire aérienne du sauteur illustrent des aspects importants relatifs à l'utilisation des équations du mouvement parabolique. Si notre objectif est d'estimer la longueur de vol, il n'est pas nécessaire de faire tous les calculs mais seulement ceux qui se rapportent à la longueur de vol.

4.1 Vitesse horizontale initiale

Sachant que la vitesse d'appel est orientée à 22° par rapport à l'horizontale, on détermine la composante horizontale de la vitesse en multipliant $9,2 \times \cos 22^\circ = 9,2 \times 0,927 = 8,53$ m/s. La vitesse horizontale initiale est de 8,53 m/s.

4.2. Vitesse verticale initiale

Pour obtenir la vitesse verticale initiale, on multiplie la vitesse d'envol par $\sin 22^\circ$. Ainsi on obtient $9,2 \times \sin 22^\circ = 9,2 \times 0,375 = 3,45$ m/s. La vitesse verticale initiale est de 3,45 m/s.

4.3. L'apogée ou le plus haut point de la trajectoire

On se sert l'équation (3) ou (5) pour estimer la hauteur, y . Mais comme on ne connaît pas le temps qui s'est déroulé pour arriver à l'apogée, on se sert de (3) et on isole y , la hauteur.

$$V_f^2 = V_i^2 - 2 g y$$

$$\begin{aligned} y &= (V_i^2 - V_f^2) / 2 g \\ &= (3,45^2 - 0) / (2 \times 9,8) \\ &= 11,9/19,6 \\ &= 0,61 \text{ m} \end{aligned}$$

La hauteur maximale atteinte par Owens est de 0,61 m au-dessus de son point de départ qui était déjà à une hauteur de 1,10 m. Donc la hauteur par rapport au sol est de $0,61 + 1,10 \text{ m} = 1,71 \text{ m}$. C'est le point B de la **figure 23 b**). L'apogée est donc à 1,71 m au-dessus de la fosse.

4.4. Temps pour atteindre l'apogée

Maintenant que la hauteur atteinte à l'apogée est connue, on peut utiliser l'équation (4) ou (5) afin d'estimer le temps pour l'atteindre, car on connaît tous les paramètres à l'exception du temps. L'équation (5) est plus complexe que l'équation (4); donc, nous utiliserons l'équation (4) et où V_f est nulle car nous ne nous déplaçons ni vers le haut ni vers le bas.

$$V_f = V_i - g t$$

$$\begin{aligned} t &= (V_i - V_f) / g \\ &= 3,45 / 9,8 \\ &= 0,35 \text{ s} \end{aligned}$$

4.5. Longueur L_{OD}

Quelle est la longueur parcourue par le centre de masse pour atteindre la même hauteur que celle de départ à savoir 1,10 m au-dessus du sol de la fosse ? Cette distance est la longueur L_{OD} et correspond au point D de la **figure 23 b**). Il ne faut pas oublier que l'origine est située à 1,10 m au-dessus du sol. Donc la hauteur y au point D est nulle (zéro mètre) et NON PAS 1,10 m, car le sol se trouve à - 1,10 m par rapport à notre origine située au centre de masse de l'athlète.

Au point D, le centre de masse a une vitesse verticale dirigée vers le bas. Celle-ci nous est inconnue. Donc, pour estimer la distance L_{OD} , on prend différents chemins tout en se reposant sur les équations (2) et (5). Une façon est d'utiliser l'équation (3) pour estimer la vitesse finale, V_f , de prendre l'équation (4) pour calculer le temps pris pour arriver au point D puis employer l'équation (2) pour trouver la distance L_{OD} , car L_{OD} est une distance horizontale et non verticale.

$$V_f^2 = V_i^2 - 2 g y$$

$$\begin{aligned} V_f &= (V_i^2 - 2 g y)^{1/2} \\ &= (3,45^2 - 2 \times 9,8 \times 0)^{1/2} \\ &= \pm 3,45 \text{ m/s} \end{aligned}$$

NB : La racine carrée d'un nombre peut être positive ou négative. Ici, nous savons que la vitesse finale verticale est négative puisqu'elle est dirigée vers le bas. Elle a la même valeur que la vitesse initiale mais avec une orientation ou une direction opposée. La vitesse verticale est donc de -3,45 m/s.

L'équation (4) nous donne le temps, mais cette fois on utilise 3,45 m/s pour la vitesse initiale et -3,45 m/s pour la vitesse finale.

$$V_f = V_i - g t$$

$$\begin{aligned} t &= (V_i - V_f)/g \\ &= (3,45 - (-3,45)) / 9,8 \\ &= (6,90/9,8) \\ &= 0,70 \text{ s} \end{aligned}$$

Le temps de 0,70 s correspond au double du temps pris pour atteindre l'apogée ! La symétrie de la courbe fait en sorte que le temps pris durant la partie ascendante de la courbe est le même que pour la portion descendante.

Avec l'équation (2) on obtient la distance L_{OD} , la vitesse étant égale à la vitesse horizontale initiale de 8,53 m/s.

$$V = \Delta d / \Delta t$$

$$\Delta d = v \Delta t$$

$$= 8,53 \times 0,70$$

$$= 5,97 \text{ m}$$

La longueur L_{OD} est de 5,97 m.

Il reste la dernière partie de la trajectoire où l'athlète franchit la longueur horizontale comprise entre 1,10 m au dessus de la fosse et la réception où son centre de masse est à 0,45 m du sol, soit à -0,65 m par rapport à l'origine.

4.6. Longueur de vol

Pour déterminer la longueur de vol, on procède de la même manière que pour trouver la distance L_{OD} . La hauteur prend alors une valeur négative par rapport à l'origine et est de -0,65 m, car le centre de masse se situe à 0,45 m du sol. On estime la vitesse finale à l'aide de l'équation (3).

$$v_f^2 = v_i^2 - 2 g y$$

$$v_f = (v_i^2 - 2 g y)^{1/2}$$

$$= (3,45^2 - 2 \times 9,8 \times -0,65)^{1/2}$$

$$= (11,9 + 12,7)^{1/2}$$

$$= (24,6)^{1/2}$$

$$= \pm 4,96 \text{ m/s}$$

La vitesse finale juste avant l'impact à la fin de suspension est de - 4,96 m/s car l'athlète continue sa chute.

Avec l'équation (4), on obtient le temps écoulé entre l'impulsion et la réception.

$$v_f = v_i - g t$$

$$t = (v_i - v_f) / g$$

$$= (3,45 - (-4,96)) / 9,8$$

$$= 8,41 / 9,8$$

$$= 0,858 \text{ s}$$

Le temps écoulé est de 0,858 s. Finalement, l'équation (2) permet d'estimer la longueur de vol.

$$V = \Delta d / \Delta t$$

$$\Delta d = v \Delta t$$

$$= 8,53 \times 0,858$$

$$= 7,32 \text{ m}$$

La longueur de vol est de 7,32 m alors que la hauteur calculée à l'instant où le centre de masse du sauteur revient à sa hauteur de départ est de 5,97 m. Cela représente une augmentation de 1,25 m de la longueur parcourue à cause d'une différence de seulement 0,65 m entre la hauteur d'appel et la hauteur du centre de masse à la réception.

La longueur de vol de 7,32 m ne correspond pas à la distance totale du saut d'Owens qui est de 8,13 m. Si on se rapporte au tableau 1, la longueur de vol représente près de 88,6 % de la longueur totale. En appliquant la règle de trois on obtient une longueur totale estimée de 8,26 m soit 13 cm de plus que la vraie performance d'Owens. Ne sachant pas exactement les longueurs d'appel et de réception ainsi que l'effet du vent (favorable ou non), l'estimation est relativement bonne.

5. Application de la trajectographie à la pratique sportive

Pour le saut en longueur, le but de l'activité est d'atteindre la plus grande distance horizontale. Il en est de même pour certains lancers comme au base-ball. Les lois de la trajectographie s'appliquent tout aussi bien pour atteindre la plus grande hauteur, la précision lors d'un tir au basket-ball, où la vitesse et la précision d'un service ou d'un smash au volley-ball. Nous allons voir maintenant comment les facteurs mécaniques qui régissent le mouvement parabolique peuvent être utilisés à l'avantage de l'athlète lors de mouvements aériens.

5.1.Plus grande distance horizontale

Pour obtenir la plus grande distance d'un lancer ou d'un saut en longueur, il faut augmenter la vitesse de projection en déplaçant son bras plus rapidement ou en courant. Comme l'angle de projection est directement affecté par la vitesse de projection, le but visé devient alors très important. S'il s'agit de parcourir la plus grande distance horizontale, on cherchera à garder un angle de projection tout près de 45°. C'est-à-dire que la composante horizontale de la vitesse de projection est égale à la composante verticale.

La figure 24 illustre trois trajectoires, toutes avec les mêmes conditions de départ sauf que l'angle de projection varie. Le premier (A) est effectué avec un angle de projection de 90° où la vitesse horizontale est nulle, alors que le second lancer (B) est fait avec un angle de 45° et le troisième (C) avec un angle de projection très faible de 5°.

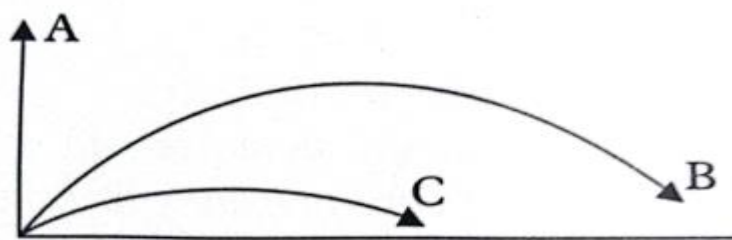


Figure 22 : Trois balles sont lancées. La balle A a un angle de projection de 90° et atteint le point le plus haut. La balle B a un angle de 45° et parcourt la plus longue distance. La balle C a subi l'effet de la gravité qui l'attire très vite vers le sol.

Avec un angle de projection de 90° la balle atteint la plus haute apogée mais revient au point de départ sans avoir progressé vers l'avant. Avec un angle de 5° , la balle possède la plus grande vitesse horizontale. Tout porte à croire qu'elle franchira la plus grande distance. Mais non. L'effet de la gravité l'entraîne prématurément au sol et toute cette vitesse horizontale ne peut la maintenir dans les airs. Entre ces deux extrêmes, il y a une condition où il existe un compromis entre la vitesse horizontale pour aller le plus loin possible et la vitesse verticale pour résister à l'effet de la gravité. Avec un angle de projection de 45° , le compromis est atteint et la plus grande distance horizontale est obtenue. Pour des hauteurs de départ similaires, on recherche une grande vitesse ainsi qu'un angle de projection tout près de 45° .

La hauteur de départ est aussi importante. Un athlète de grande taille a un avantage marqué sur un plus petit. La différence de hauteur entre les centres de masse contribue à augmenter la longueur de vol. Cela est illustré à la **figure 25** et correspond au segment LDE de la **courbe b**).

La taille de l'athlète favorise ou nuit à sa performance sportive. Coluche disait fort bien, tout le monde est égal ; mais mieux vaut être un athlète grand et fort que petit et faible du mois pour effectuer un bon saut en longueur.

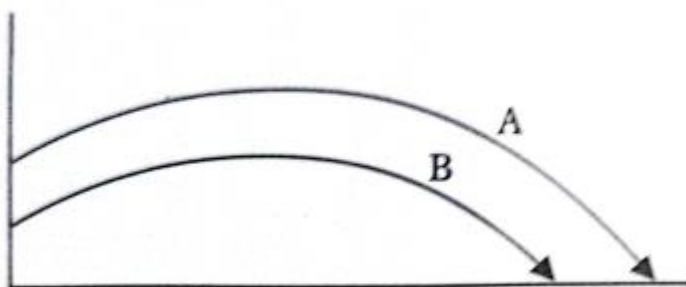


Figure 23 : Les courbes A et B ont la même allure. Cependant, la balle A lancée avec la même vitesse et le même angle de projection va se rendre plus loin, car son point de départ est plus élevé.

5.2.Plus grande distance verticale

Pour le saut en hauteur, périlleux, ou des rouleaux (ventrale ou dorsal) on projette le corps haut dans les airs. Une bonne vitesse verticale et un angle de projection plus ouvert (vers 55°) vont faciliter le travail de l'athlète.

La figure 26 illustre un athlète amorçant un rouleau ventral, puis dorsal. Pour bien effectuer un rouleau ventral, l'athlète projette une jambe vers le haut, élevant son centre de masse. Par contre, lors du rouleau dorsal (**figure 26 b**) le centre de masse est plus bas et projette le sauteur vers le haut. Le sauteur aura au moins le temps pour réaliser son rouleau dorsal. Cela explique en partie la difficulté à réaliser un rouleau dorsal par rapport au rouleau ventral.

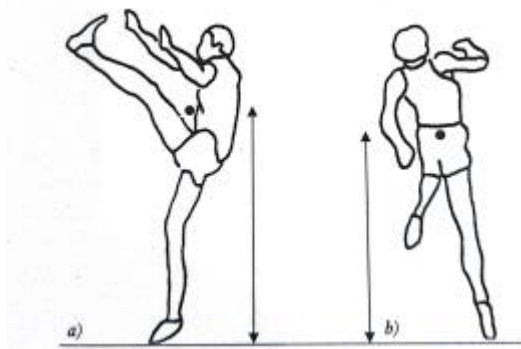


Figure 24: Avant d'amorcer un rouleau ventral a), le centre de masse est plus élevé que lors d'un rouleau dorsal b) (Allard et al.,2011).

5.3.Plus grande précision

Au basket-ball, par exemple, on cherche la hauteur mais aussi de la précision dans le tir. Vu d'en haut, le panier a un diamètre de 46 cm. A partir d'un lancer qui projette le ballon assez haut, il y a suffisamment pour que le ballon puisse passer librement. Le ballon a un diamètre de 25 cm soit un peu moins que deux fois celui du panier. Mais qu'arrive-t-il quand le ballon entre de côté ? **La figure 27** présente quatre tirs au panier où le ballon arrive avec un certain angle par rapport au panier. En premier, le ballon arrive avec un angle d'approche de 90° . Pour les trois autres conditions, le ballon arrive à l'oblique et la surface projetée par l'anneau du panier est plus petite. Ainsi à mesure que l'angle formé par la direction du ballon et l'horizontale diminue, on voit que le diamètre effectif du panier passe de 40 cm à 16 cm. Le dernier lancer est impossible à réussir. Pourquoi ?

Pour ces situations où l'on cherche de la précision, la vitesse de projection, la distance horizontale à parcourir, la taille de l'athlète et l'angle d'approche sont des paramètres à contrôler.

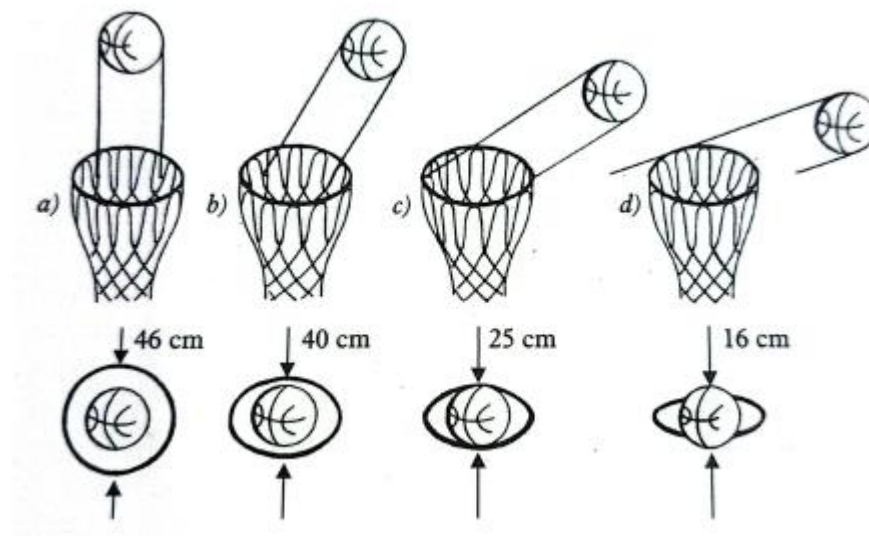


Figure 25 : En a), le ballon arrive perpendiculaire à la surface délimitée par l'anneau du panier. L'angle d'approche est de 90° en a), 60° en b), 30° en c) et 20° en d) (Allard et al., 2011).

5.4.Plus grande vitesse et précision

Lors d'un service au volley-ball ou au tennis, on doit maîtriser la vitesse et la précision du ballon ou de la balle. En effet, une balle frappée trop fort et mal dirigée dépasse la zone de jeu et le service est rejeté. Inversement, si la balle n'a pas assez de vitesse ou a un angle de projection trop faible, elle peut frapper le filet.

Il faut donc une vitesse de projection assez rapide pour que la balle puisse franchir le filet et déjouer l'adversaire sans qu'elle ne dépasse la zone de jeu si personne ne l'intercepte. Il faut également que l'angle de projection soit assez ouvert par rapport à l'horizontale pour franchir le filet, mais pas trop sinon la balle monte trop haut et laisse le temps à l'adversaire de réagir.

La trajectoire du centre de masse représente assez bien celle d'un sauteur ou d'une gymnaste qui s'élance dans les airs. La notion de centre de masse est utile pour décrire les trajectoires aériennes, cependant, nous devons aussi considérer les actions individuelles de chacun des segments corporels. Par exemple, 10 % de la longueur du saut est attribué aux actions faites par le sauteur durant la phase de suspension. De plus, lorsque nous sommes en présence de forces externes, les équations du mouvement parabolique ne s'appliquent plus. Nous avons donc recourt à l'analyse des mouvement segmentaires et articulaires.

LES FORCES

Objectifs d'apprentissage

1. Définir la force et le poids
2. Classer les forces
3. Définir la force de frottement

À chaque instant de notre vie, nos corps sont soumis à des forces. Les forces sont importantes pour le mouvement car elles nous permettent de commencer à bouger, d'arrêter de bouger et de changer de direction. Les forces sont également importantes même si nous ne bougeons pas. Nous manipulons les forces qui agissent sur nous pour maintenir notre équilibre dans des positions stationnaires. Pour compléter une analyse biomécanique d'un mouvement humain, nous avons besoin d'une compréhension de base des forces : comment les ajouter pour produire une force résultante, comment résoudre les forces en composantes et comment les forces doivent agir pour maintenir l'équilibre.

1. Qu'est-ce-que les forces

Simplement définie, une force est une poussée ou une traction. Les forces sont exercées par des objets sur d'autres objets. Les forces viennent par paires : la force exercée par un objet sur un autre est associée à une force égale mais dirigée de manière opposée exercée par le deuxième objet sur le premier - **action et réaction**. Une force est quelque chose qui accélère ou déforme un objet. En mécanique des corps rigides, nous ignorons les déformations et supposons que les objets analysés ne changent pas de forme. Ainsi, dans la mécanique des corps rigides, les forces ne déforment pas les objets, mais elles accélèrent les objets si la force n'est pas opposée. Mécaniquement parlant, quelque chose accélère au démarrage, s'arrête, accélère, ralentit ou change de direction. Ainsi, une force peut provoquer un démarrage, un arrêt, une accélération, un ralentissement ou un changement de direction.

➤ **Simplement défini, une force est une poussée ou une traction.**

L'unité de mesure de la force est le newton. Le newton est abrégé par N. Un newton de force est défini comme la force requise pour accélérer une masse de 1 kg à 1 m/s^2 , ou algébriquement comme suit :

$$1.0 \text{ N} = (1.0 \text{ kg}) (1.0 \text{ m/s}^2)$$

Pensez à la façon de décrire une force. Par exemple, supposons que vous vouliez décrire la force exercée par un lanceur de poids sur un poids à l'instant indiqué à la figure 1.1. La description de la taille de la force fournirait-elle suffisamment d'informations à ce sujet pour en prévoir les effets ? Que voudrions-nous savoir d'autre sur la force ? Certaines autres caractéristiques importantes d'une force sont son point d'application, sa direction (ligne d'action) et son sens (qu'il pousse ou tire sur cette ligne). Une force est ce que l'on appelle une quantité vectorielle. Un vecteur est une représentation mathématique de tout ce qui est défini par sa taille ou son ampleur (un nombre) et sa direction (son orientation). Pour décrire complètement une force, vous devez décrire sa taille et sa direction.

Si nous voulons représenter graphiquement une force (ou tout autre vecteur), une flèche est bien représentée. La longueur de la flèche indique la taille de la force, le manche de la flèche indique sa ligne d'application, la pointe de la flèche indique son sens ou sa direction le long de cette ligne d'application et l'une des extrémités de la flèche indique le point d'application de la force. Il faut aussi souligner que le point d'application de la force définit également l'objet sur lequel la force agit (et définit ainsi la paire de forces - action ou réaction - que nous examinons).

2. Classer les forces

Considérons maintenant les différents types de forces et leur classification. Les forces peuvent être classées comme internes ou externes.

2.1. Les forces internes

Les forces internes sont des forces qui agissent à l'intérieur de l'objet ou du système dont le mouvement est étudié. Rappelez-vous que les forces viennent par paires - action et réaction. Avec les forces internes, les forces d'action et de réaction agissent sur différentes parties du système (ou du corps). Chacune de ces forces peut affecter la partie du corps sur laquelle elle agit, mais les deux forces n'affectent pas le mouvement de tout le corps car les forces agissent en opposition.

Les forces internes sont des forces qui agissent à l'intérieur de l'objet ou du système dont le mouvement est étudié.

Dans la biomécanique du sport, les objets dont nous sommes curieux de voir le mouvement sont le corps de l'athlète et les instruments manipulés par l'athlète. Le corps humain est un système de structures - organes, os, muscles, tendons, ligaments, cartilage et autres tissus. Ces structures exercent des forces les unes sur les autres. Les muscles tirent sur les tendons qui tirent sur les os. Aux articulations, les os poussent sur le cartilage, qui pousse les autres cartilages et les os. Si les forces de traction agissent sur les extrémités d'une structure interne, les forces de traction internes sont appelées **forces de traction** et la structure est sous tension. Si les forces de poussée agissent sur les extrémités d'une structure interne, les forces de poussée internes sont appelées **forces de compression** et la structure est en compression. Les forces internes maintiennent les choses ensemble lorsque la structure est sous tension ou en compression. Parfois, les forces de traction ou de compression exercées sur une structure sont supérieures aux forces internes que la structure peut supporter. Lorsque cela se produit, la structure échoue et se brise. Une défaillance structurelle du corps se produit lorsque les muscles tirent, que les tendons se rompent, que les ligaments se déchirent et que les os se cassent.

Nous pensons aux muscles comme aux structures qui produisent les forces qui nous poussent à changer de mouvement. En réalité, les muscles ne pouvant produire que des forces

internes, ils sont incapables de modifier le mouvement du centre de masse corporel. Il est vrai que les forces musculaires peuvent produire des mouvements des membres du corps, mais ces mouvements ne produiront aucun changement de mouvement du centre de masse du corps à moins que des forces externes n'agissent sur le système. Le corps ne peut changer de mouvement que s'il peut pousser ou tirer contre un objet externe. Imaginez un joueur défensif en basket-ball qui saute pour bloquer un tir. S'il a été trompé par le tireur et qu'il saute trop tôt, il ne peut s'empêcher d'attendre que le tireur tire. La seule force externe agissant sur lui dans ce cas est la gravité. IL doit toucher quelque chose pour créer une autre force externe pour contrer la force de gravité. Donc, il doit se remettre sur le sol. Ensuite, il peut pousser contre le sol et créer une force de réaction externe qui le fait sauter à nouveau. Le sol fournit la force externe qui provoque le changement de mouvement du joueur de basketball.

Les forces internes peuvent être importantes dans l'étude de la biomécanique du sport et de l'exercice si nous nous préoccupons de la nature et des causes des blessures, mais elles ne peuvent produire aucun changement dans le mouvement du centre de masse corporel. Les forces extérieures sont seules responsables de cela.

3. Les forces externes

Les forces externes sont les forces qui agissent sur un objet à la suite de son interaction avec l'environnement qui l'entoure. Nous pouvons classer les forces externes en forces de contact ou en forces sans contact. La plupart des forces auxquelles nous pensons sont des forces de contact. Celles-ci se produisent lorsque des objets se touchent. Les forces sans contact sont des forces qui se produisent même si les objets ne se touchent pas. L'attraction gravitationnelle de la Terre est une force sans contact. Les autres forces sans contact incluent les forces magnétiques et les forces électriques.

Les forces externes sont les forces qui agissent sur un objet à la suite de son interaction avec l'environnement qui l'entoure.

En sport et en exercice, la seule force sans contact avec laquelle nous nous intéressons est la force de gravité. La force de gravité agissant sur un objet est définie comme le poids de l'objet. Rappelez-vous que nous avons défini 1 N de force comme la force qui accélérerait une masse de 1 kg de 1 m/s^2 . Si la seule force agissant sur un objet est la force de gravité de la Terre, la force de gravité accélérera l'objet. C'est le cas lorsque nous lâchons quelque chose (si la force de résistance à l'air peut être ignorée). Les scientifiques ont précisément mesuré cette accélération pour différentes masses situées à divers endroits autour de la Terre. Elle s'avère

être aux environs de $9,81 \text{ m/s}^2$, quelle que soit la taille de l'objet. Cette accélération est appelée accélération gravitationnelle ou accélération due à la pesanteur. Elle est abrégée en g .

Le poids est la force de gravité agissant sur un objet.

Voyons maintenant si nous pouvons déterminer le poids de quelque chose si nous connaissons sa masse. Si une force de 1 N accélère une masse de 1 kg de 1 m/s^2 , quelle est alors la force qui accélérerait une masse de 1 kg de $9,81 \text{ m/s}^2$? Une autre façon de poser cette question est la suivante : combien pèse 1 kg ?

? $N = (1 \text{ kg}) (9,81 \text{ m/s}^2) = \text{poids de 1 kg} = \text{force de gravité agissant sur 1 kg}$

Si nous résolvons cette équation, nous trouvons que 1 kg pèse 9,81 N. Sur la Terre, la masse (mesurée en kilogrammes) et le poids (mesurés en newtons) sont proportionnels l'un à l'autre par un facteur de 9,81. Le poids d'un objet (en newtons) est sa masse (en kilogrammes) fois l'accélération due à la pesanteur ($9,81 \text{ m/s}^2$), ou

$$\mathbf{P = mg}$$

P = poids (mesuré en newtons),

m = masse (mesurée en kilogrammes), et

g = accélération due à la pesanteur = $9,81 \text{ m/s}^2$.

Pour estimer le poids d'une chose, il peut être difficile de multiplier sa masse par $9,81 \text{ m/s}^2$ par calcul mentale. Pour des approximations rapides, arrondissons la valeur de $9,81 \text{ m/s}^2$ à 10 m/s^2 et utilisons-la comme estimation de l'accélération due à la gravité. Cela facilitera les choses et notre approximation ne sera pas trop éloignée car notre estimation de g est erronée à 2%. Si plus de précision est requise, la valeur plus précise de $9,81 \text{ m/s}^2$ doit être utilisée pour g .

Les forces de contact sont des forces qui se produisent entre des objets en contact les uns avec les autres. Les objets en contact peuvent être solides ou fluides. La résistance de l'air et la résistance de l'eau sont des exemples de forces de contact de fluide. Les forces de contact les plus importantes dans le sport se produisent entre des objets solides, tels que l'athlète et un autre objet. Pour qu'un lanceur de poids puisse lancer son poids, l'athlète doit appliquer une force

dessus, et la seule manière pour l'athlète d'appliquer une force sur le poids est de le toucher. Pour sauter en l'air, vous devez être en contact avec le sol et appuyer dessus. La force de réaction du sol se soulève et accélère dans les airs. Pour accélérer vous-même vers l'avant et vers le haut, vous devez être en contact avec le sol et le pousser en arrière et vers le bas. La force de réaction du sol pousse vers l'avant et le haut contre vous et vous accélère vers l'avant et le haut. Les forces de contact peuvent être décomposées en parties ou composants - la composante de la force agissant perpendiculairement aux surfaces des objets en contact et la composante de la force agissant parallèlement aux surfaces en contact. Nous appelons la première composante de la force de contact une **force de contact normale** (ou force de réaction normale), où normale fait référence au fait que la ligne d'action de cette force est perpendiculaire aux surfaces en contact. Au cours d'une marche, lorsque le coureur appuie vers le bas et l'arrière sur le sol, la force de contact normale est la composante de la force qui agit vers le haut sur le coureur et vers le bas sur le sol. La deuxième composante de la force de contact est appelée **frottement**. La ligne d'action du frottement est parallèle aux deux surfaces en contact et s'oppose au mouvement ou au glissement entre les surfaces. Ainsi, lorsque le coureur appuie et en arrière sur le sol pendant un pas de course, la force de frottement est la composante de la force qui agit en avant sur le coureur et en arrière sur le sol (**figure 1**). La force de frottement est la composante de la force de contact responsable des modifications du mouvement horizontal du coureur. Les forces de frottement sont principalement responsables de la locomotion humaine. Il est donc important de comprendre le frottement.

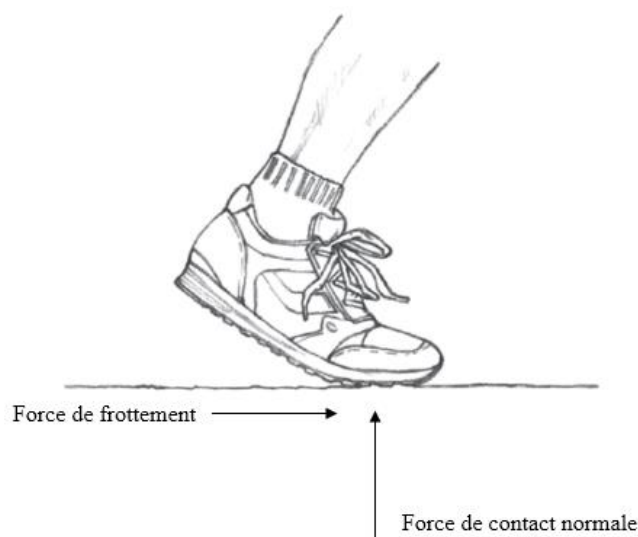


Figure 26 Force de contact normale et force de frottement agissant sur le pied du coureur lors de la poussée (McGinnis, 2013).

4. Le frottement

La force de frottement que nous venons de décrire est le frottement « sec », également appelé frottement de Coulomb. Un autre type de frottement est le frottement de fluide, qui se développe entre deux couches de fluide et se produit lorsque des surfaces sèches sont lubrifiées.

Le comportement du frottement fluide est compliqué ; et comme le frottement des fluides est moins fréquent dans le sport, nous limiterons notre discussion au frottement à sec. Le frottement à sec agit entre les surfaces non lubrifiées d'objets solides ou de corps rigides en contact et agit parallèlement aux surfaces de contact. Le frottement résulte des interactions entre les molécules des surfaces en contact. Lorsque le frottement sec agit entre deux surfaces qui ne se déplacent pas l'un par rapport à l'autre, on parle de **frottement statique**. Le frottement statique est également appelé **frottement limite** lorsque nous décrivons la quantité maximale de frottement qui se développe juste avant que deux surfaces ne commencent à glisser. Lorsque le frottement sec agit entre deux surfaces qui se déplacent l'une par rapport à l'autre, on parle de **frottement dynamique**. Les autres termes pour frottement dynamique sont frottement de glissement et frottement cinétique.

4.1.Frottement et force de contact normale

Exemple 1

Placez un livre sur une surface horizontale plane telle qu'un bureau ou une table. Poussez maintenant latéralement contre le livre et sentez la force que vous pouvez exercer avant que le livre ne commence à bouger. Quelle force résiste à la force que vous exercez sur le livre et empêche le livre de glisser ? La force de résistance est le frottement statique, qui est exercé sur le livre par la table ou le bureau. Si le livre ne glisse pas, la force de frottement statique agissant sur le livre a la même taille que la force que vous exercez sur le livre, mais dans la direction opposée. Ainsi, les effets de ces forces sont annulés et la force nette agissant sur le livre est nulle. Placez un autre livre par-dessus le livre d'origine et appuyez à nouveau (**figure 29**).

Pouvez-vous pousser avec une plus grande force avant que les livres commencent à bouger ? Ajoutez un autre livre et appuyez à nouveau. Pouvez-vous pousser avec une force encore plus grande maintenant ? Au fur et à mesure que vous ajoutez des livres à la pile, la force que vous exercez avant que les livres glissent augmente (taille), de même que la force de frottement statique.



Figure 27: L'ajout de livres à la pile augmente le frottement statique entre le livre du bas et la table (McGinnis, 2013).

Comment l'ajout de livres à la pile a-t-il entraîné une augmentation de la force de frottement statique ? Nous avons augmenté l'inertie de la pile en augmentant sa masse. Cela ne devrait cependant pas affecter la force de frottement statique, car il n'existe aucune raison apparente que l'augmentation de la masse puisse affecter les interactions entre les molécules des surfaces en contact. Ce sont ces interactions qui sont responsables des frottements. Nous avons également augmenté le poids de la pile en y ajoutant des livres. Cela pourrait-il affecter la force de frottement statique ? Augmenter le poids augmenterait la force de contact normale entre les deux surfaces. Cela augmenterait les interactions des molécules des surfaces en contact, car elles seraient plus rapprochées les unes des autres. Ce n'est donc pas le poids des livres qui a entraîné l'augmentation de la force de frottement statique, mais l'augmentation de la force de contact normale. Si nous mesurions cette force de contact normale et la force de frottement, nous constaterions que la force de frottement est proportionnelle à la force de contact normale. À mesure que l'un augmente, l'autre augmente proportionnellement. Ceci est vrai pour les frottements statiques et dynamiques.

Dans cet exemple, la force de frottement était horizontale et la force de contact normale était une force verticale influencée par le poids des cahiers. La force de frottement est-elle seulement une force horizontale ? La force de contact normale est-elle toujours verticale et liée au poids de l'objet sur lequel agit le frottement ?

Exemple 2

Essayez maintenant de tenir le livre contre une surface verticale, comme par exemple un mur (**figure 3**). Pouvez-vous faire cela si vous poussez contre le livre uniquement avec une force horizontale ? À quel point devez-vous appuyer contre le livre pour l'empêcher de glisser le long du mur ? Quelle force s'oppose au poids du livre et empêche le livre de tomber ? La force de votre main qui appuie sur le livre agit horizontalement ; elle ne peut donc pas s'opposer à la force de gravité verticale qui tire vers le bas du livre. La force agissant vers le haut sur le livre est le frottement entre le livre et le mur (et éventuellement entre le livre et votre main). La force que vous exercez contre le livre a une incidence sur les frottements, car le livre glisse et tombe si vous ne poussez pas assez fort. Nous voyons à nouveau que la force de frottement est affectée par la force de contact normale, c'est-à-dire la force de contact agissant perpendiculairement à la force de frottement et aux surfaces de contact

La force de frottement est proportionnelle à la force de contact normale et agit perpendiculairement à celle-ci.

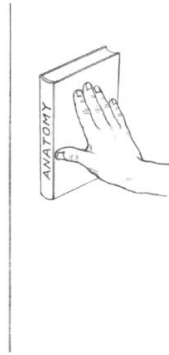


Figure 28 : La force de frottement entre le livre et le mur et entre le livre et votre main suffit à maintenir le livre en place (McGinnis, 2013).

4.2.Frottement et surface de contact

Exemple 3

Quoi d'autre affecte le frottement ? Qu'en est-il de la surface ? Essayons une autre expérience pour voir si l'augmentation ou la diminution de la surface de contact affecte la force de friction. La surface de contact affecte-t-elle le frottement ? Prenez un livre relié et déposez-le sur une table ou un bureau. (Il est important que vous utilisiez un livre relié.) Poussez le livre d'un côté à l'autre de la table pour avoir une idée de l'ampleur des forces de frottement dynamiques et statiques. Essayez d'exercer que des forces horizontales sur le livre. Maintenant, essayez la même chose avec le livre à sa fin (**figure 30**). Utilisez un élastique pour tenir le livre fermé, mais ne laissez pas l'élastique toucher la table pendant que vous glissez le livre. Existe-t-il des différences notables entre les forces de friction que vous ressentez avec le livre dans ses différentes orientations ? Essayez-le avec un autre livre relié.

Avec les différentes orientations, les surfaces en contact entre le livre et la table variaient considérablement, mais les frottements ne changeaient pas de façon notable. En fait, le frottement sec, statique et dynamique, n'est pas affecté par la taille de la surface de contact.

Le frottement sec n'est pas affecté par la superficie de la surface en contact.

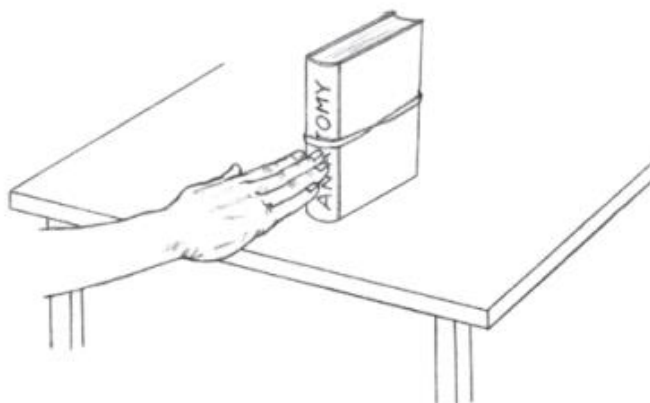


Figure 29 : Un livre à son extrémité a une plus petite zone de contact avec la table. Cette zone de contact réduite affecte-t-elle la force de friction entre le livre et la table ? (McGinnis, 2013)

4.3. Frottement et matériaux en contact

Le frottement est affecté par la taille de la force de contact normale, mais il n'est pas affecté par la zone en contact. Qu'en est-il de la nature des matériaux en contact ? La force de frottement exercée sur les chaussures à semelle de caoutchouc est-elle différente de celle appliquée sur les chaussures à semelle de cuir ? Voyons quel est l'effet de la nature des matériaux en contact sur la force de frottement entre eux.

Observons la différence entre les frottements d'un livre sur la table et d'une chaussure sur la table. Placez le livre sur la table et mettez une chaussure de sport dessus. Poussez le livre d'avant en arrière sur la table pour avoir une idée de l'ampleur des forces de frottement dynamiques et statiques. Maintenant, placez la chaussure sur la table, semelle en bas et placez le livre dessus. Poussez la chaussure d'avant en arrière sur la table pour avoir une idée de l'ampleur des forces de frottement dynamiques et statiques. Qui a produit des forces de frottement plus importantes avec la table, le livre ou la chaussure ? Qu'est-ce qui a changé entre les deux conditions ? Dans les deux conditions, le poids et la masse des objets déplacés (la chaussure et le livre) sont restés les mêmes. La surface de contact a changé, mais nous avons déterminé que cela n'affectait pas le frottement. La variable qui doit être responsable des modifications de la force de frottement observée est la différence de type de matériau en contact avec la table. Il existait un plus grand frottement entre la table et la semelle, plus molle et plus rugueuse, de la chaussure qu'entre la table et la couverture du livre, plus lisse et plus dure.

Une dernière observation à propos des frottements doit être faite. Lorsque vous avez déplacé le livre d'un bout à l'autre de la table lors des auto-expériences, était-il plus facile de le démarrer ou de le maintenir en mouvement ? En d'autres termes, le frottement statique était-il plus grand ou plus petit que le frottement dynamique ? Il était plus facile de garder le livre en mouvement que de le faire commencer. Le frottement statique est donc plus important que le frottement dynamique.

4.4. Calcul du frottement

Le frottement est le produit du coefficient de frottement, μ par la force normale, N .

$$f = \mu N$$

La force normale est la force de réaction de la résultante (somme des forces) perpendiculaires à la surface de contact. Dans le cas le plus simple, c'est le poids de la personne qui se tient debout ou de l'objet qui repose sur le sol. Par exemple, quelle force doit-on vaincre pour pousser un chariot de 1000 N ? Les roues du chariot sont en caoutchouc et la surface est en bois. Du tableau 1 nous obtenons le coefficient de frottement pour une surface caoutchouc/bois de 0,75. Donc,

$$f = \mu N$$

$$= 0,75 \times 1000$$

$$= 750 \text{ N}$$

Qu'arrive-t-il si nous roulons sur de la tuile ?

$$f = \mu N$$

$$= 0,2 \times 1000$$

$$= 200 \text{ N}$$

La force de frottement est réduite à 200 N.

MOUVEMENTS SEGMENTAIRES ET ARTICULAIRES

Objectifs d'apprentissage

1. Nommer et reconnaître les différentes classes de mouvement.
2. Définir et appliquer les notions de déplacement, de vitesse et d'accélération linéaire et angulaire
3. Différencier entre mouvement segmentaire et mouvement articulaire

Introduction

L'inefficacité de l'œil à 1) quantifier les mouvements complexes impliquant plusieurs segments corporels ; 2) mesurer les mouvements rapides comme les départs en course, les coups au tennis ; 3) déterminer les efforts musculaires, contribue au développement de la biomécanique. La mesure doit avoir pour objectif l'intervention de l'entraîneur. Par exemple, elle doit pouvoir refléter l'effet d'un renforcement musculaire sur la performance de l'athlète. De plus, le choix dans les paramètres biomécaniques utilisés pour décrire le mouvement doit être pertinent. Le défi du biomécanicien est d'utiliser ses notions théoriques afin de guider l'intervention pour que celle-ci se traduise par une amélioration de la performance de l'athlète.

1. Mouvements linéaires et angulaires

Les mouvements linéaires et angulaires s'expriment en distance ou en déplacement. Le temps pris pour parcourir cette distance reflète la vitesse ; les variations de vitesse par rapport au temps représentent l'accélération. Ces trois notions de **déplacement**, de **vitesse** et d'**accélération** sont utilisées pour décrire la **cinématique du corps en mouvement**.

1.1. Mouvement linéaire

Le **déplacement linéaire** est celui fait en ligne droite entre deux points. Il est mesuré en mètres et est représenté par la lettre d.

1.1.1. La vitesse

Représente la rapidité de notre mouvement ou de notre déplacement qu'il soit linéaire ou angulaire. En d'autres mots, la vitesse exprime notre déplacement ou changement de position en fonction du temps. La vitesse linéaire est la variation, Δ (delta), de la distance divisée par le temps écoulé, Δt pour la franchir. La vitesse linéaire, v s'exprime en mètre par seconde (m/s).

$$v = \Delta d / \Delta t$$

Ou encore

$$v = (d_2 - d_1) / (t_2 - t_1)$$

Où d_1 et d_2 sont les distances mesurées de l'origine aux temps t_1 et t_2 . Il est important de noter que d_1 et t_1 sont souvent égaux à zéro car d_1 est le point de départ (origine) pris au temps zéro.

1.1.2. L'accélération

Elle est définie comme une variation de vitesse, Δv par rapport au temps écoulé. L'**accélération linéaire** est représentée par la lettre « **a** » et est exprimée en m/s^2

$$a = \Delta v / \Delta t$$

ou

$$a = (v_2 - v_1) / (t_2 - t_1)$$

Où v_1 et v_2 sont les vitesses aux temps t_1 et t_2 .

1.2. Mouvement angulaire

Lors d'une parade, lorsque la fanfare fait un virage de 90° pour prendre une autre direction, celui ou celle qui est à l'intérieur tourne presque sur place alors que le dernier en bout de ligne parcourt une bien plus grande distance. Par contre, les deux ont couvert le même angle de rotation et les mêmes vitesses et accélérations angulaires, car ils ont le même mouvement de rotation. C'est-à-dire, tout au long du virage, le rang reste droit.

Comme pour les déplacements linéaires, on peut aussi calculer la vitesse angulaire et l'accélération angulaire à partir de l'angle de rotation (ou déplacement angulaire) et le temps. Le déplacement angulaire est mesuré en degrés ($^\circ$) ou en radians (rad) et est représenté par la lettre grecque θ (thêta). Le radian est une unité de mesure correspondant à $57,3^\circ$.

La vitesse angulaire et l'accélération angulaire sont définies de la même manière que la vitesse et l'accélération linéaires.

1.2.1. La vitesse angulaire

La vitesse angulaire, ω , (oméga) est exprimée ainsi :

$$\omega = \Delta \theta / \Delta t$$

Ou

$$\omega = (\theta_2 - \theta_1) / (t_2 - t_1)$$

Où ω est en degrés par seconde ($^\circ/s$) ou en radians par seconde (rad/s).

1.2.2. L'accélération angulaire

L'accélération angulaire, α (alpha) est :

$$\alpha = \Delta \omega / \Delta t$$

ou

$$\alpha = (\omega_2 - \omega_1) / (t_2 - t_1)$$

α est exprimée en degrés par seconde carrée ($^{\circ}/s^2$) ou en radian par seconde carrée (rad/s^2).

De façon générale, la vitesse et l'accélération, linéaires ou angulaires s'écrivent comme suit :

$$v_i = (d_i - d_{i-1}) / (t_i - t_{i-1})$$

$$\omega_i = (\theta_i - \theta_{i-1}) / (t_i - t_{i-1})$$

$$a_i = (v_i - v_{i-1}) / (t_i - t_{i-1})$$

$$\alpha_i = (\omega_i - \omega_{i-1}) / (t_i - t_{i-1})$$

où i représente l'instant d'intérêt et $i - 1$ correspond à l'instant précédant. Ainsi, la vitesse d'une balle de base-ball filmée à 100 images par seconde et calculée à la 63^e image se détermine à partir des valeurs de déplacement obtenues des images 63 et 62, correspondant aux instants i et $i - 1$ respectivement.

2. Vitesse et accélération moyennes et instantanées

Le calcul des vitesses et des accélérations se fait entre deux instants. A titre d'exemple, un athlète qui franchit une distance de 100m en 10 secondes le fait à une vitesse de 10m/s. Cette vitesse ne reflète pas la vitesse de notre athlète au départ, ni sa vitesse en fin de course. Elle est plutôt sa **vitesse moyenne**. Pour obtenir une idée plus exacte de la vitesse du coureur, il faudrait la calculer à plusieurs instants consécutifs. On obtiendrait alors plusieurs valeurs allant d'une vitesse qui augmente rapidement en début de course pour ensuite se stabiliser puis augmenter dans le sprint final. Ces **vitesses instantanées** représentent fidèlement la stratégie du coureur.

3. Relations entre le déplacement, la vitesse et l'accélération

Il existe deux conditions particulières au mouvement linéaire. Il peut être à **déplacement uniforme** ou à **déplacement uniformément accéléré**.

Lors d'un **déplacement uniforme** la distance franchie par unité de temps est constante, donc la vitesse est aussi constante. Ce qui veut dire qu'il n'y a aucune accélération. Un mouvement à déplacement uniforme typique est celui d'un avion en vitesse de croisière.

Par contre, il arrive que l'on se déplace de plus en plus vite. Il en est de même pour tout objet qui tombe, attiré par la gravité. Le déplacement augmente de manière exponentielle alors que la vitesse augmente linéairement. L'accélération est alors constante donc l'objet est uniformément accéléré.

On note une relation temporelle qui existe entre le déplacement, la vitesse et l'accélération (linéaire ou angulaire). Ainsi en divisant le déplacement par un intervalle de temps on obtient

la vitesse et en divisant celle-ci encore par le temps on arrive à l'accélération. Cette approche n'est autre qu'une méthode numérique de différenciation ou de dérivation.

Le cheminement inverse est également possible. En multipliant l'accélération par le temps, on obtient la vitesse, et la vitesse par le temps donne le déplacement. Ces multiplications reviennent à calculer l'aire sous la courbe et cette approche est connue sous le nom d'intégration numérique. Donc on dérive quand on passe du déplacement à l'accélération et on intègre dans l'opération opposée.

4. Relation entre mouvement linéaire et mouvement angulaire

Le lien ou le paramètre physique qui lie les mouvements linéaire et angulaire est **le rayon** ou **la distance entre le point de rotation et le point d'intérêt**.

Si on attache une balle à l'une des extrémités d'une ficelle et qu'avec l'autre on la fait tourner, la balle aura une trajectoire circulaire. Dès que l'on lâche la ficelle, la balle prend une direction tangentielle ou perpendiculaire au rayon de la ficelle. Ces mouvements sont associés au rayon.

Le déplacement linéaire de la balle sera d'autant plus grand qu'elle sera éloignée du point de rotation. Comme pour la fanfare qui effectue un virage, le musicien le plus éloigné du point de rotation devra se déplacer plus rapidement que celui qui se situe près du point de rotation afin que le rang de musiciens reste bien droit.

Pour un déplacement angulaire θ , le déplacement linéaire « d » au point situé à une distance « r » du point de rotation est :

$$d = r \theta$$

Il est important de souligner que l'angle est exprimé en radians. La relation entre la vitesse et l'accélération linéaire et angulaire est similaire à l'équation précédente

$$v = r \omega$$

$$a = r \alpha$$

5. Mouvement segmentaire

Pour effectuer une analyse complète du corps humain, on doit décrire les mouvements de rotation et de translation de chacun des segments corporels.

Les mouvements de translation ne posent pas de problème en soi. On calcule les déplacements, les vitesses et les accélérations linéaire au centre de masse segmentaire. Les mouvements de rotation sont un peu plus complexes à analyser, car souvent ils sont utilisés pour décrire les mouvements des segments individuels sans considération pour les segments adjacents ou pour estimer le mouvement à une articulation ou entre deux segments adjacents.

Pour calculer les forces et la contribution musculaire aux articulations, on doit connaître la position et le changement de position de chaque segment en fonction du temps ou le mouvement segmentaire. A la figure 32, le membre inférieur est représenté.

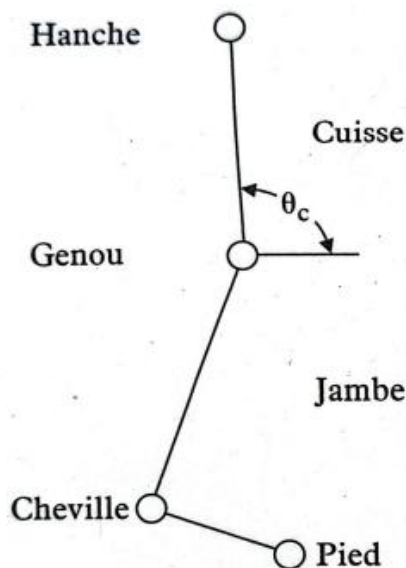


Figure 30 : Représentation schématique du membre inférieur. L'angle segmentaire est mesuré à partir de l'horizontale vers le segment en question (Winter, 1990 in Allard et al., 2011).

On mesure ou on calcule l'angle θ_c , entre l'inclinaison du segment et l'horizontale (**angle absolu**). Ensuite on recommence pour les images subséquentes comme à la figure 33. Les changements dans l'angle donnent la vitesse angulaire de la cuisse, alors que les changements dans la vitesse indiquent l'accélération angulaire. Cela doit être effectué pour chaque segment et répété à chaque image analysée. Pour l'analyse de la marche seulement, on considère habituellement trois segments (cuisse, jambe, pied) sur 60 à 70 images. En tout, on calcule 180 angles segmentaires (3 segments x 60 images).

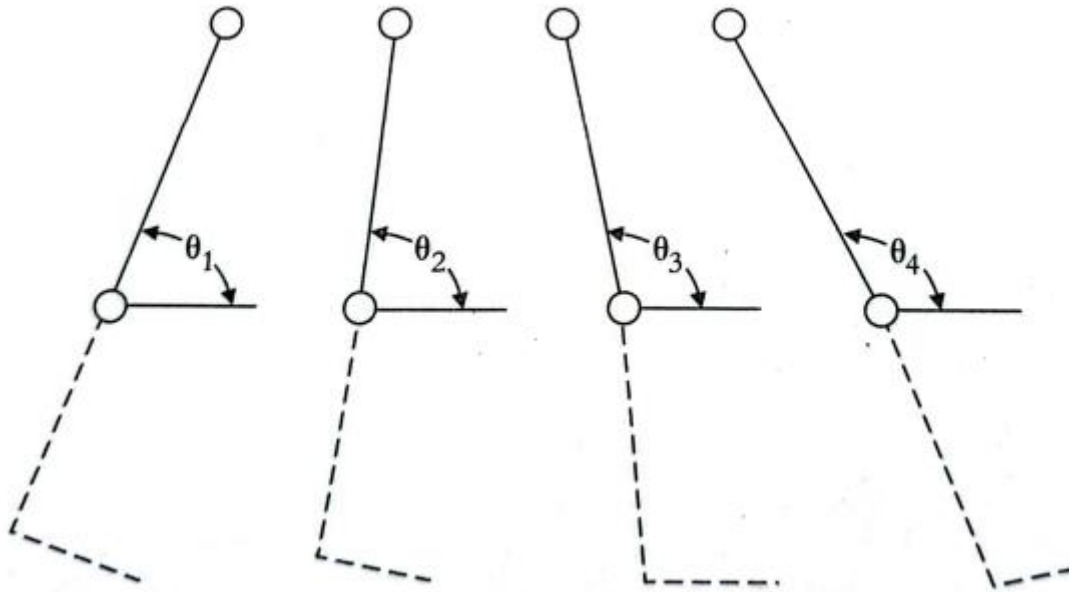


Figure 31 : Angle segmentaire à la cuisse pour différentes positions dans le temps.

Comme tous les calculs reposent sur les données de déplacement, les vitesses angulaires sont calculées avant de passer aux accélérations. Les équations relatives au calcul des vitesses et accélérations angulaires présentées ci-dessus seront utilisées.

Le tableau 1 donne les déplacements angulaires de la jambe aux images 112 à 115 pour des intervalles de temps de 0,01 s. Ces images sont obtenues à partir de caméras vidéo et où la première image correspond au début du mouvement étudié. Ainsi, les images 112, 113, etc. gèlent le mouvement de la jambe à plus d'une seconde après l'initiation du geste.

Tableau 7: Données de déplacements angulaires, de la jambe pour un Δt de 0,01 s.

Images	112	113	114	115
θ	78,8	78,6	78,7	79,0

6. Mouvement articulaire

Le mouvement articulaire est tout simplement le mouvement de rotation entre deux segments corporels adjacents par rapport à l'articulation commune. Il s'agit de décrire l'angle et ses variations en fonction du temps.

A la figure 3 les angles segmentaires du tronc, θ_{tr} , de la cuisse, θ_c , de la jambe, θ_j et du pied, θ_p , sont donnés pour une image. On remarque que les angles segmentaires sont mesurés TOUJOURS DE LA MÊME FAÇON. L'horizontale est placée à l'extrémité du segment et

l'angle est mesuré de l'horizontale vers le segment. C'est pourquoi l'angle de la cuisse est près de 120°.

L'angle articulaire à la hanche, θ_h , est calculé entre une droite prolongée du tronc et la droite formant la cuisse de manière à

$$\theta_h = \theta_{\text{cuisse}} - \theta_{\text{tronc}}$$

Un angle de zéro degré correspond à la position neutre. Un angle positif représente une flexion comme l'indique la figure 3. Une valeur négative est une extension, c'est-à-dire que la cuisse est derrière la hanche.

Le mouvement au genou, θ_g , est exprimé par l'angle contenu entre une droite prolongée de la cuisse et la droite formant la jambe de manière à

$$\theta_g = \theta_{\text{cuisse}} - \theta_{\text{jambe}}$$

En position neutre, la cuisse et la jambe forment une droite et θ_g est nul. Comme pour la hanche une valeur positive indique une flexion tel qu'illustré la figure 3. Par contre, une valeur négative représente une hyperextension (figure 34).

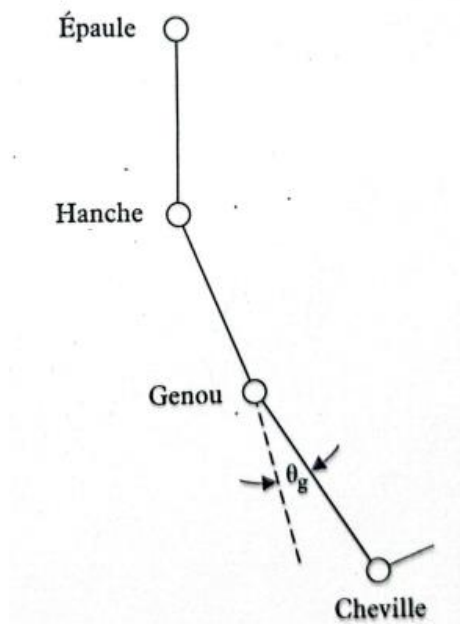


Figure 32 : Hyperextension du genou.

Par exemple, $\theta_c = 120^\circ$, $\theta_j = 130^\circ$ donc $\theta_g = 120^\circ - 130^\circ = -10^\circ$
(Allard et Blanchi, 2000).

L'angle du pied pose une difficulté qui est surmontée en respectant la façon de calculer les angles segmentaires. En position neutre (figure 35 a), l'angle du pied est de 180°, en flexion plantaire, l'angle par rapport à l'horizontale est inférieur à 180° (figure 35 b) et en flexion dorsale, cet angle est supérieur à 180° (figure 35 c). Bien que le mouvement à la cheville soit

décrit de la même manière, on soustrait cependant 90° pour obtenir la position neutre du pied qui n'est pas en flexion plantaire prononcée.

$$\theta_{\text{cheville}} = \theta_{\text{pied}} - \theta_{\text{jambe}} - 90^\circ$$

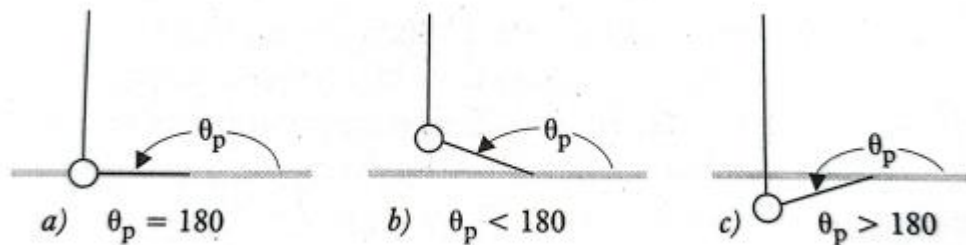


Figure 33 : Mesure de l'angle segmentaire du pied en position a) neutre, b) flexion plantaire et c) flexion dorsale (Allard et Blanchi, 2000)

7. Principes associés aux mouvements segmentaires

Deux principes sont intimement liés aux mouvements segmentaires. Il s'agit de l'ordre d'intervention segmentaire et de la sommation des vitesses linéaires et articulaires.

Principe 1 : Ordre d'intervention segmentaire : Dans l'exécution d'un geste complexe, on recrute d'abord les segments les plus lourds ou les plus près du corps.

Principe 2 : Sommation des vitesses linéaires des articulations : La vitesse linéaire d'un engin est égale à la somme de toutes les vitesses linéaires.

ENERGIE, TRAVAIL ET PUISSANCE

Objectifs d'apprentissage

1. Définir le travail mécanique
2. Faire la différence entre travail positif et travail négatif
3. Définir l'énergie et ses différentes modalités
4. Définir la puissance
5. Expliquer la relation entre énergie et travail mécanique

1. Travail

Dans le langage courant, le terme de **travail** fait référence à une tâche nécessitant un effort. En biomécanique, le travail d'une force correspond à l'énergie fournie par cette force lorsque son point d'application se déplace. Le travail est égal au produit de la force F par le déplacement (d) de son point d'application dans la direction de cette force :

Travail mécanique = Force x Déplacement

$$W = F \times d$$

Le travail est exprimé en **Joules (J)**. Ce n'est pas une quantité directement observable, seuls ses effets sont apparents :

- Déplacement ou déformation d'un objet (**Figure 36**)
- Production de chaleur

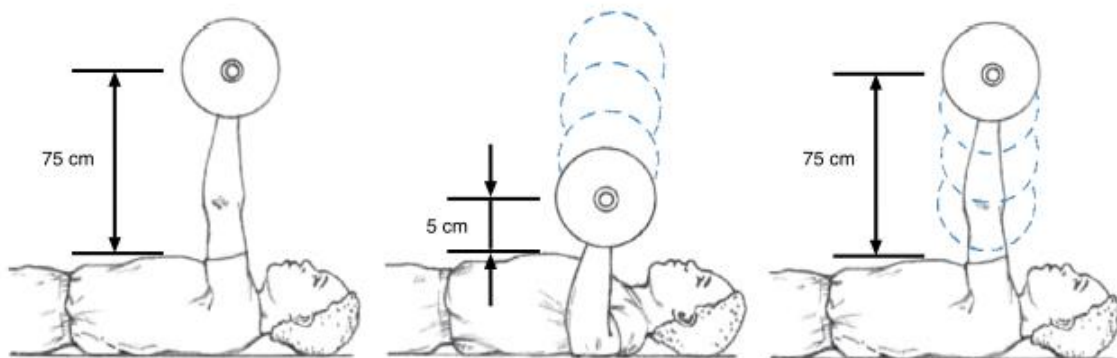


Figure 34 : Exemple de travail (déplacement)
(Hamill et Knutzen, 2006)

1.1. Travail positif et travail négatif

La force n'exerce un travail que lorsque son point d'application se déplace ; le travail est nul si le point d'application reste immobile.

Ex : le travail reste nul si un haltérophile essaye de soulever un haltère mais n'y parvient pas, et ce quel que soit l'effort déployé. Les muscles se sont contractés et ont dépensé de l'énergie mais l'haltère ne s'est pas déplacé : aucun travail n'a été produit.

Le travail peut être positif ou négatif, selon que le déplacement s'effectue dans le sens de la force ou dans le sens opposé.

Dans l'exemple du développé-couché, le travail est positif durant l'ascension de l'haltère (le déplacement et la force sont dirigés vers le haut). Ce travail positif a pour effet de vaincre la force gravitationnelle qui s'exerce sur l'haltère.

Le travail est par contre négatif durant la descente de l'haltère (la force est toujours dirigée vers le haut mais le déplacement s'effectue vers le bas). Le signe négatif signifie que le travail est maintenant produit par l'haltère et s'exerce sur l'haltérophile. Ce travail négatif sera dissipé sous forme de production de chaleur dans les muscles.

2. Puissance

La **Puissance** (P) permet de décrire le travail en fonction du temps. Soulever rapidement un haltère est différent de le soulever lentement, bien que le résultat final soit le même. La monter d'une côte par un cycliste fournit un autre exemple : l'effort à fournir est d'autant plus important lorsque le cycliste monte rapidement la côte. Dans ces deux exemples, le travail à fournir reste le même : c'est la puissance qui varie. Plus un mouvement s'effectue rapidement, plus la puissance à générer est importante. La puissance est la quantité de travail (W) fournie sur un intervalle de temps t :

$$\text{Puissance} = \text{travail} / \text{temps}$$

$$\mathbf{P = W / t}$$

La puissance est exprimée en Watts (W, à ne pas confondre avec le symbole du travail).

Nous avons vu que $W = F \times d$, ce qui nous permet d'écrire :

$$\mathbf{P = F \times d / t}$$

$$\text{Or } \mathbf{d / t = v} \text{ donc}$$

$$\mathbf{P = F \times v}$$

Cette équation est particulièrement utile car de nombreuses méthodes permettent de mesurer la force et la vitesse linéaire de manière simultanée.

3. Énergie

L'énergie est la capacité d'un système à produire un travail. Elle s'exprime en **Joules**, comme le travail. Contrairement au travail, l'énergie peut être emmagasinée.

Il existe différentes formes d'énergie, dont l'énergie chimique dépensée lors de la contraction musculaire. En biomécanique, on s'intéressera particulièrement à deux formes d'énergie mécanique : l'**énergie potentielle de pesanteur** et l'**énergie potentielle élastique**.

Le terme « **potentielle** » fait référence au fait que cette énergie est emmagasinée et peut ensuite être transformée en énergie **cinétique** (énergie associée au mouvement).

L'**énergie potentielle de pesanteur** est l'énergie que possède un corps du fait de sa position dans un champs de pesanteur. L'énergie potentielle de pesanteur d'un objet situé à une hauteur h (distance au sol) est la suivante :

$$E_{GPE} = m \times g \times h$$

Ex : Un haltère est soulevé à 0,4 m par à sa position initiale. A cette hauteur, l'haltère voit son énergie augmenter de 235,4 J par rapport à sa position de départ. Cette variation d'énergie est égale au travail fourni pour amener l'haltère à cette position. L'énergie nécessaire pour ce travail provient des stocks d'énergie chimique du corps humain, transformée par les muscles en énergie cinétique. C'est un exemple des transformations successives de l'énergie : l'énergie chimique est transformée en énergie cinétique qui est à son tour transformée en énergie potentielle de pesanteur.

L'**énergie potentielle élastique** est l'énergie que possède un corps du fait de sa déformation. Elle dépend de la déformation (distance d'allongement ou de raccourcissement) et de la constante de rigidité k du corps solide déformé :

$$E_{SE} = \frac{1}{2} k \times d^2$$

La rigidité d'un corps solide est sa capacité à résister à une déformation. Elle dépend de la forme et de de la composition du corps. Un corps est dit souple quand une force relativement faible suffit à le déformer. Un corps est dit rigide quand la force nécessaire à le déformer est relativement importante. L'équation de l'énergie potentielle élastique est non-linéaire : la distance est au carré. Cela signifie qu'il faut fournir une énergie/travail de plus en plus importante au fur et à mesure que la déformation augmente.

Le ressort est un parfait exemple de ce phénomène : l'extension d'un ressort nécessite peu d'énergie au début, mais cette énergie augmente rapidement avec l'extension et vers la fin de l'extension, d'importante quantités d'énergie ne produiront qu'un allongement minimal du ressort.

L'**énergie cinétique** est l'énergie associée au mouvement d'un corps. Elle existe sous deux formes l'**énergie cinétique linéaire** et l'**énergie cinétique angulaire**.

L'**énergie cinétique linéaire** (E_{CL}) d'un corps dépend de sa vitesse linéaire (v) et de sa masse.

$$E_{CL} = \frac{1}{2} m v^2$$

Cette énergie est celle que possède un corps du fait de son mouvement linéaire. Elle représente le travail à fournir pour déplacer un corps de masse m à une vitesse linéaire v .

Ex : Au départ d'un sprint, les muscles des jambes transforment l'énergie chimique en énergie cinétique pour augmenter la vitesse linéaire du coureur. L'énergie fournie reste la même à chaque foulée mais la variation de vitesse diminue au fur et à mesure que la vitesse augmente. Ceci est dû au terme non-linéaire v^2 de l'équation. Plus la vitesse augmente, plus il devient difficile de l'augmenter encore. Il faut quatre fois plus d'énergie pour augmenter la vitesse du coureur de 2,3 à 4,6 m/s que pour l'augmenter de 0 à 2,3 m/s, bien que la variation de vitesse soit la même dans les deux cas.

L'énergie cinétique linéaire d'un corps doit être dissipée pour que ce corps s'arrête (énergie cinétique linéaire nulle).

- Dans la course, le déplacement est freiné par l'extension des jambes.
- La réception d'un saut consiste à répartir l'énergie cinétique en fléchissant les différents segments du corps.
- Lors de la réception d'une balle, l'énergie cinétique de la balle est répartie dans le bras.

Tous ces mouvements visent à dissiper l'énergie cinétique linéaire de manière contrôlée.

L'augmentation et la diminution de l'énergie cinétique linéaire nécessitent toutes deux une dépense d'énergie chimique. Il en résulte que les sports impliquant d'importantes variations d'énergie cinétique (football, tennis, ...etc.) font dépenser une grande quantité d'énergie chimique.

Rappelons enfin que l'énergie cinétique linéaire est proportionnelle à la masse : plus une personne est lourde, plus il lui est difficile d'initier ou d'arrêter son mouvement linéaire.

L'énergie cinétique angulaire (E_{CA}) d'un corps dépend de sa vitesse angulaire (ω) et de son moment d'inertie (I) :

$$E_{CA} = \frac{1}{2} I \omega^2$$

Cette énergie est l'énergie que possède un corps du fait de sa rotation. De l'énergie chimique musculaire est dépensée lors de l'augmentation de la vitesse angulaire d'un segment, mais également lors de son ralentissement ou d'un changement de direction. Les sports impliquant de nombreuses rotations de segments du corps (sprint par exemple) font donc dépenser une grande quantité d'énergie chimique.

4. Travail et énergie

Le travail et l'énergie partagent la même unité (le Joule) et sont étroitement liés. L'énergie peut être emmagasinée mais pas le travail. Le travail correspond à la variation d'une forme d'énergie (c'est-à-dire à la quantité d'énergie transformée en une autre forme d'énergie).

$$\text{Travail} = \Delta E = E_{\text{finale}} - E_{\text{initiale}}$$

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- Allard, P & Blanchi, J.-P. (2000). *Analyse du mouvement humain par la biomécanique*: Vigot, Décarie.
- Allard, P., Dalleau, G., Begon, M., & Blanchi, J.-P. (2011). *Analyse du mouvement humain par la biomécanique*: Fides éducation.
- Bartlett, R. (2007). *Introduction to sports biomechanics: Analysing human movement patterns*: Routledge.
- Blanchi, J.-P. (2000). *Biomécanique du mouvement et APS*: Vigot.
- Blazeovich, A., & Blazeovich, A. J. (2017). *Sports biomechanics: the basics: optimising human performance*: Bloomsbury Publishing.
- Bouisset, S. (2002). *Biomécanique et physiologie du mouvement*: Elsevier Masson.
- Grimshaw, P., Burden, A., & Crétual, A. (2016). *Biomécanique du sport et de l'exercice*: De Boeck Supérieur.
- Hall, S. J., & Lysell, D. (1995). *Basic biomechanics* (Vol. 2): Mosby St. Louis.
- Hamill, J., & Knutzen, K. M. (2006). *Biomechanical basis of human movement*: Lippincott Williams & Wilkins.
- McGinnis, P. M. (2013). *Biomechanics of sport and exercise*: Human Kinetics.