



**Université Abderrahmane MIRA - BEJAIA**

**Faculté des sciences humaines et sociales**

**Département de science et technique des activités physique et Sportives STAPS**

**En vue de l'obtention du diplôme de mastre en sciences et techniques des activités  
physiques et sportives**

**Filières : entraînement sportif**

**Spécialité : entraînement sportif d'élite**

*Thème*

**ETUDE COMPARATIVE DE LA COORDINATION INTERSEGMENTAIRE ENTRE  
LES SPRINTERS ET DEMI FONDISTES (categorje U18 ) au stade de souk el  
tenine willaya de Bejaia**

**Présentée par :**

**Benarour Abdellatif**

**Boudjaoui djaouad**

**Encadré par :**

**Benosmane Abdelmalek**

**Année universitaire 2020/2021**

## **Dédicaces**

Je dédie ce modeste travail a :

Ceux a qui je ne rendrai jamais assez le bien qu'ils m'ont fait

Et auxquels je dois tous,

Mes parents : Vous etes ma raison d'etre

.

Tous ma famille et a tous mes amis

Toute la famille du Football et ceux qui vivent pour le sport

Tous ceux qui me sont chers

**Abdelatif**

## **Je dédie ce modeste travail**

A l'âme pure de ma mère, que Dieu ait pitié d'elle et la fasse au paradis, si Dieu le veut

A toute ma famille, en particulier , a mon cher père pour leur amour, leur soutien morale et financier, leurs sacrifices illimités et leurs encouragements, qu'ils m'ont offert tout ou long de mes études. Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération, et mes profonds sentiments envers eux.

A mes chères soueur .Nafiaa. Ahlam . keltoum ;a mon frère A.rahim

A ma plus chère Ryma

A mes grands parents, a tous mes oncles et mes tantes , ainssi que toutes mes cousines et mes cousins

A mon binôme A. Ellatif pour son compréhension et son contribution à la réalisation de ce travail.

A tous ceux qui de près ou de loin ont apporté leur contribution à la réalisation de ce travail, j Vous prie de trouver l'expression de ma profonde reconnaiss

**Djaouad**

## *Remerciements*

*Je remercie le bon dieu tout puissant de m'avoir armé de courage  
et de volonté afin de mener ce modeste travail au terme*

*Je tiens à exprimer mes profondes reconnaissances à mon  
directeur de travail : Mr Benosmane Abdelmalek, pour son aide*

*Précieuse, et pour m'avoir encadré et aidé pour la  
réalisation de ce travail avec beaucoup de sympathie et de  
rigueur*

*Les membres de jurés, pour l'intérêt que vous portez à ce*

*Travail en acceptant de le juger*

*Et en fin je tiens à remercier mes amis*

## Sommaire

Introduction :.....	01
---------------------	----

### **PARTIE 1 : ANALYSE BIBLIOGRAPHIE**

#### **1- Chapitre 01 :condition physique (vitesse, endurance, coordination )**

1-1. Définition des qualités physiques :.....	06
1- La vitesse :.....	07
1-1 Définition.....	07
1-2 Modalités de la vitesse.....	07
1-3 Entraînabilité de la vitesse.....	09
1-4 La consommation d'oxygène(vo <sub>2</sub> max).....	09
2- L'endurance :.....	10
2-1 Définition.....	10
2-2 Modalités de l'endurance.....	10
2-3 La vitesse maximale aérobie (VMA).....	11
3- La coordination .....	11
3-1 Définition.//.....	11
3-2 Les modalités de la coordination.....	12
3-3 Les composants de la coordination.....	12
3-4 L'objectivité de la coordination.....	14
3-5 L'importance de la coordination.....	15
3-6 Le role de la coordination.....	16

#### **2- Chapitre 02 : Analyse biomécanique de course (sprinte 100M /DEMI FOND 1500M)**

1-Analyse Biomecanique de la course :.....	17
1-1 Cycle de la course.....	19
1-2 Vitesse de course.....	19
2- Le sprint.....	20
2-1- Analyse biomécanique de la course de vitesse sur 100m.....	20

2-1-1- Les phases d'une course de vitesse.....	21
2-1-2-La phase du départ.....	22
2-1-3-La phase d'accélération.....	22
2-1-4-La phase de vitesse stabilisée.....	23
2-1-5-La phase de décélération.....	23
2-1-6- L'arrivée .....	24
2-2- Lévolution du sprint.....	25
2-3- Le règlement.....	26
2-4- Niveau2 du débrouillé au confirmé.....	26
2-5-Les objectifs.....	27
2-6- Les situation.....	27
3- Les courses de fond et de demi-fond.....	27
3-1- L'évolution du demi-fond.....	28
3-2- Le règlement.....	28
3-3- Les catégories et les distances.....	28
3-4- Les performances.....	29
3-5- Niveau 1: du débutant au débrouillé.....	29
3-5-1- La modélisation des courses.....	30
3-5-2- La situation de course.....	31
3-5-3- Les paramètres d'une situation.....	31
4-Décomposition séquentielle de la foulée :.....	34
4-1- Les paramètres cinétiques de la foulée Temps de course.....	35
4-2- Les paramètres de la foulée de course :.....	35

4-2-1- Le rapport amplitude/fréquence.....	35
4-2-2- Temps de contact et temps de suspensio.....	36
4-2-3- Une analyse descriptive de la foulée .....	36
4-2-4- Une analyse fonctionnelle de la foulée.....	37
4-3- Le renforcement musculaire.....	37
5- Analyse vidéo .....	38
5-1-Définition de la vidéo.....	38
5-2-Système vidéo.....	39
5-3-Procédure d'enregistrement vidéo.....	40
5-4-Numérisation.....	41
5-5-Référence.....	41
<b>3- Chapitre03 : La coordination intersegmentaire</b>	
1-Coordination inter-segmentaire lors de la locomotion.....	43
2- Moyenne de la phase relative.....	45
3- Discussion .....	45
4- Stabilité – flexibilité.....	46
5- La locomotion, entre stabilité et flexibilité.....	46
5.1 Unité fonctionnelle « passagère » - unité fonctionnelle « locomotrice ».....	47
5.2 Unités fonctionnelles ou sous systèmes du corps en mouvement.....	47
5.3 L'unité fonctionnelle « locomotrice » en tant que système auto-organisé.....	48
5.4 Unité fonctionnelle « passagère » - unité fonctionnelle « locomotrice » en tant.....	48
5.5 Principes sous-jacents à la coordination et contraintes topographique et Musculaire.....	49
6- Application aux membres inférieurs.....	50
7- Effets de l'apprentissage sur la coordination interarticulaire des membres inférieurs.....	51

7.1 Le geste sportif en tant que geste appris.....	51
7-2 La course en tant que mouvement spécifique.....	52
7-3 Etude de la locomotion au travers de la coordination interarticulaire.....	53
7-4 Matériel et méthode.....	53
7-4.1 Sujets .....	53
7-4.2 Protocol.....	54
7-4.3 Traitement des données.....	54
7-5 Résultats.....	55
7-5.1 Paramètres de la foulée (Tableau n°1a) .....	55
7-5.2 Durée des différentes phases de la foulée selon le cycle de Philippon simplifié .....	55
7.5.3 Evolution de la coordination inter-articulaire.....	55
7.5.3.a. Coordination entre la cheville et le genou.....	55
7.5.3.b. Coordination entre la cheville et la hanche.....	56
7.5.3.c. Coordination entre le genou et la hanche .....	56
7.5.3.d. Variabilité moyenne inter-essais de la phase relative par phases.....	57
7.5.4 Valeur angulaire moyenne des articulations du membre inférieur .....	57
7.5.5 Amplitude angulaire moyenne des articulations du membre inférieur.....	57
7.5.6 Evolution angulaire des articulations au cours de la foulée .....	58
8. Variables dépendantes.....	58
8.1. Fréquence effective .....	58
8.2. Indices de stabilité de la coordination .....	58
8.2.1. Calculs de phase relative.....	58
8.2.2. Détail du calcul de la phase relative.....	60

8.2.2.1. Méthode de l'estimation par point (phase relative discrète) .....	60
8.2.2.2. Méthode de l'arc tangent (phase relative continue) .....	60
8.2.2.3. Méthode de la transformée de Hilbert (phase relative continue) .....	61
8.2.3. Nombre de transitions de phase et variabilité de la phase relative.....	61
8.2.4. Temps avant transition.....	62
8.3. Indice de précision de la coordination .....	62
9. Traitements statistiques .....	62

## **PARTIE PRATIQUE**

### **DEUXIEME PARTIE : METHODOLOGIE DE LA RECHERCHE**

#### **1- CHPITRE 1 : METHODOLOGIE DE LA RECHERCHE**

1-Echantillon:.....	66
2-Moyens et methodes : .....	66
2-1 Matriel :.....	66
2-2-METHODE :.....	71
<b>3- PROCEDURE EXPERIMENTALE:.....</b>	<b>71</b>

#### **Chapiter 02 :Analyses et interpretations des resultats**

1 – Analyses et interpretation des graphiques : .....	73
1-1 Jeune athlete 1 ( athlete de demi fond 1500M) pied droit.....	73
1-3 La phase relative :.....	74
1-4 interprétation de la phase relative et normalisation du athlète demi fond 1500 M.....	75
2-Jeune athlete 2 ( sprinteur):.....	76
2-1Jeune athlete 2 ( athlete desprinteur) pied droit.....	76
2-2 La phase relative :.....	77

2-3 interprétation de la phase relative et normalisation du athlète sprinteur.....	78
3 -Un analyse graphique (comparation entre la phase relative des sprinteur 100M et des demi fondist 1500 M de la pied droit) .....	79
4-Discussion et conclusion.....	81
Discussion et analyse des résultats.....	81
Conclusion.....	83
Index Bibliographique	
Annexes	

## Liste des figures

<b>Figure 1</b> : famille des qualités physiques (M. Pradet, 1989).....	06
<b>Figure 02</b> : Une camera CANON.....	68
<b>Figure 03</b> : les pied de la camera CANON et leur position.....	68
<b>Figure 04</b> : L’ogiciel Kenovea.....	69
<b>Figure 05</b> : format Excel.....	70
<b>Figure 06</b> : interprétation du profil cinématique du jeune athlète 1 (athlète de demi fond 1500M) pied droit .L’ogiciel Kenovea.....	73
<b>Figure 07</b> : : interprétation de la phase relative continue du jeune athlète 1 (athlète de demi fond 1500M) pied droit .L’ogiciel Kenovea.....	74
<b>Figure 08</b> : interprétation de la phase relative et normalisation du athlète demi fond 1500 M .Pied droit .L’ogiciel Kenovea.....	75
<b>Figure 09</b> : : interprétation de la phase relative continue du jeune athlète 1 (athlète de sprinteur) pied droit .L’ogiciel Kenovea.....	76
<b>Figure 10</b> : : interprétation de la phase relative continue du jeune athlète 1 (athlète de sprinteur) pied droit .L’ogiciel Kenovea.....	77
<b>Figure 11</b> : interprétation de la phase relative et normalisation du athlète sprinteur .Pied droit .L’ogiciel Kenovea.....	78
<b>Figure 12</b> : interséption de la phase relative de la foulé entre les sprinteur et des demi fondist .L’ogiciel Kenovea.....	79

## **Liste de tableau**

<b>Tableau 01 :</b> Caractéristique de l'échantillon.....	66
<b>Tableau 02 :</b> Tableau de l'interprétation des PRC.....	82

## Introduction

---

### Introduction :

Le Sport est un ensemble d'exercices le plus souvent physiques se pratiquant sous forme de jeux individuels ou collectifs pouvant donner lieu à des compétitions. Le mot « sport » est un mot anglais, lui-même issu de l'ancien français « de sport ». Divertissement, plaisir physique ou de l'esprit. Le sport est universel, il a été pratiqué à toutes les époques aux quatre coins du monde sous des formes très diverses.

Le sport joue un rôle important pour le développement, le sport n'est pas seulement un but en soi ,c' est aussi un outil qui aide à améliorer la vie des familles et des communautés entières. Le sport peut ainsi être considéré comme une « école de vie » et un outil efficace pour atteindre divers buts dans les domaines de la santé, de l'éducation, de l'égalité des sexes, de la protection et du développement de l'enfant.

Dans le monde du sport plusieurs personnes se croient que l'activité physique et l'entraînement sportif ne sont pas différents alors que c'est le contraire.

L'entraînement sportif permettant la préparation et le perfectionnement d'un sportif, amateur ou professionnel. Chez l'amateur pratiquant un sport pour se maintenir en forme ou dans le sport scolaire, l'entraînement vise l'entretien et l'amélioration de la performance, mais les objectifs ne sont pas les mêmes que chez l'athlète de haut niveau.

Dans le cadre du sportif de haut niveau, le but de l'entraînement est d'arriver à un pic de forme et de performance, au bon moment, c'est-à-dire le jour de la compétition. Ce qu'explique l'importance de la planification de l'entraînement, basé sur le calendrier du sportif.

Materiez (1983) Il entend par entraînement sportif tout ce qui comprend la préparation physique, technico-tactique, intellectuelle et morale de l'athlète, à l'aide d'exercices physiques.

Que ce soit en football ou dans d'autres sports, lorsque l'on parle de la rapidité d'un athlète. On dirait toujours qu'il s'agit d'une donnée définitivement fixée par l'hérédité, au même titre que la taille ou la couleur des yeux. A partir de là, on fait relativement peu d'effort pour l'améliorer. Heureusement, les choses sont progressivement en train d'évoluer.

De nos jours la performance sportive est telle, qu'il est impossible d'accéder au haut niveau sans avoir recours aux différentes sciences set technologies. En effet, les paramètres lies cette performance sont de plus en plus pointus, L'évaluation du geste sportif est devenu une nécessité, tant pour connaitre les points forts, que les points faibles chez les sportifs, pour

## Introduction

---

comparer ses résultats à ceux des autres sportifs, et pour améliorer leurs niveaux mais aussi de suivre l'évolution à courts, moyen et long termes. Dans l'entraînement, réaliser une évaluation sans but, n'a aucun intérêt. Elle doit s'inscrire dans une logique de méthodologie de l'entraînement qui a pour objectif l'optimisation des performances. La mesure de la performance en natation est une problématique majeure à laquelle bon nombre de chercheurs du domaine sportif et d'entraîneurs sont confrontés. Les évaluations peuvent être réalisées en laboratoire ou sur le terrain. Dans le second cas, la mise en place est plus simple et proche de la réalité mais moins précise qu'en laboratoire. C'est pourquoi, on attend des outils d'évaluations qu'ils soient les plus exactes et proches possible. Pour cela, il faut s'assurer que l'outil de mesure utilisé soit exact. Aussi, il est important pour l'évaluateur d'être le plus objectif possible dans son évaluation. L'utilisation d'outils fiables pourrait être un moyen intéressant d'éviter toute subjectivité liée à l'évaluation. Dans le domaine de la coordination inter segmentaire, il existe peu de moyens permettant d'évaluer cette qualité de façon objective. L'introduction des phases relatives continues comme moyen de cette évaluation a permis aux spécialistes du sport de contourner ce problème à cet effet, nous nous sommes demandé si la coordination segmentaire des différents plongeurs utilisés par nos nageurs présentait des différences majeures ? Ces différences si elles existent sont-elles liées au niveau des athlètes et à leur catégorie d'âge ?

La vitesse est un ensemble de capacités extraordinairement divers et complexe qui se présente dans les différentes disciplines de façon tout à fait différente. Les lutteurs, les boxeurs, les sportifs qui font du karaté, ceux qui font de l'athlétisme et les joueurs sportifs se distinguent certes tous par une capacité de vitesse très développée, mais la forme que prend cette capacité diffère à bien des égards selon la discipline. La vitesse n'est pas seulement la capacité de courir vite, elle joue aussi un rôle important dans les mouvements acycliques (saut, Hanser) et dans d'autres types de mouvements cycliques.

L'endurance C'est la faculté d'exprimer des actions motrices pendant une durée la plus importante possible. Elle n'est pas restreinte uniquement au processus énergétique aérobie, comme on a souvent tendance à l'imaginer. On peut donc parler d'endurance force et d'endurance vitesse. Tous les paramètres susceptibles de participer au développement de cette qualité exprimant une motricité d'intensité élevée ou modérée, qualités d'endurance pendant une durée maximale, seront regroupés en une seule grande famille, de ce fait nous sommes posé les questions suivants:

## **Introduction**

---

**Est -ce qu'il existe une différence dans la coordination inters segmentaire entre le sprinteur et demi-fondiste ?**

### **HYPOTHESE:**

Il existe une différence dans la dans la coordination inters segmentaire entre le sprinteur et demi-fondiste

Les paramètres morphologique et mode de course (la foulé d'athlète) déterminer la différence dans la coordination inters segmentaire entre le sprinteur et demi-fondiste

### **OBJECTIF DE LA RECHERCHE :**

À travers notre étude, nous souhaitons réaliser et atteindre les objectifs suivant:

analyser la déférence de la coordination inter segmentaire entre le sprinteur et demi fondiste

faire sortir les différences entre les différents athlète(les charcuter morphologique : taille et poids)

Le objectif principal de cet étude est l'amélioration de la performance sportive en athlétisme

**PREMIER PARTIE:**  
**ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE**

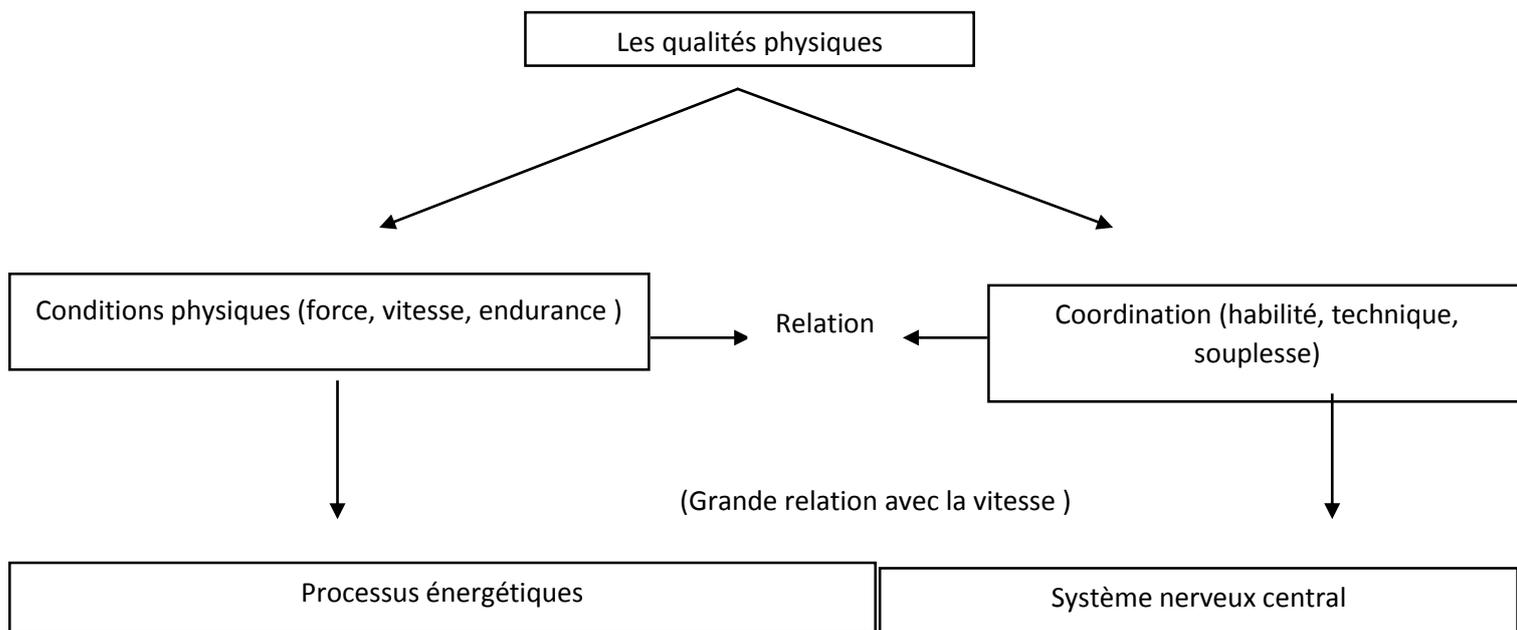
**CHAPTER 01:**  
**CONDITION PHYSIQUE**  
**(VITESSE/ENDURANCE/COORDINATION)**

### 1- Définition des qualités physiques :

Les qualités physiques sont l'expression des facteurs constitutionnels qui supportent la performance physique humaine. Les qualités physiques contribuent à la genèse de la performance sportive. Le dictionnaire des Activités Physiques et Sportives (A.P.S) définit les qualités physiques comme étant des « caractères, propriétés individuelles, sur lesquelles repose la performance physique ». De son côté J.Weineck(1992), dans son ouvrage intitulé la biologie du sport, propose une autre définition des qualités en considérant qu'elles « représentent le matériau de base des coordinations ». Traditionnellement, les qualités physiques sont définies selon cinq termes qui sont : l'endurance, la force, la vitesse, la coordination et la souplesse.

### **2-Les différentes familles des qualités physiques :**

Les principales qualités physiques se divisent en deux groupes généraux : les facteurs dépendant principalement de la condition physique (force, vitesse, endurance), et les facteurs dépendant principalement de la coordination (habileté, souplesse...).



**Figure 1 : famille des qualités physiques (M. Pradet, 1989).**

**1-La vitesse:**

**1-1 Définition :** La vitesse est la capacité humaine qui permet d'effectuer des actions motrices déterminées avec la plus haute intensité dans un intervalle de temps le plus court possible. D'après Frey (1997), la vitesse est la capacité qui permet sur la base de la mobilité des processus du système neuromusculaire et des propriétés qu'ont les muscles à développer de la force, d'accomplir des actions dans un laps de temps minimum dans des conditions données, Partant d'une vision plus complète de la vitesse, Grosse ( 1991 ) dans sa définition de l'endurance fait intervenir non seulement les éléments de la condition physique mais aussi les composantes psychologiques, il définit ainsi la vitesse comme « la capacité, sur la base des processus cognitifs, de la volonté maximale et du fonctionnement du système neuromusculaire, d'atteindre dans certaines conditions la plus grande rapidité de réaction et de mouvement ».

**1-2 Modalités de la vitesse:**

**-La vitesse de réaction :** c'est l'aptitude de se déplacer ou d'agir le plus rapidement possible en réponse à un stimulus (signal) externe (Wei neck , 2005)

**.- La vitesse d'action (mouvement acycliques):** c'est la capacité d'exécuter un mouvement acyclique, dans le temps le plus court possible. Elle implique une action motrice simple ou un mouvement simple dans le temps le plus court possible exemple .

lancer de javelot. Pami de nombre

**La vitesse de déplacement (mouvement cyclique):** c'est la capacité d'exécuter des mouvements cycliques, dans le temps le plus court possible (Wei neck, 2005). (Elle est caractérisée par la répétition rythmique d'une suite d'action dans un temps le plus court et de le terminer sans fatigue). La vitesse est l'une des principales formes de sollicitation motrice, elle est définie par aptitude d'un sujet d'accomplir des actions motrices dans un laps de temps dans des conditions données, d'où il existe plusieurs modalités. Autres formes simples de la vitesse:

**La vitesse de réaction :** c'est la capacité de réagir à un stimulus dans le plus bref délai. On distingue selon (Wei neck 2005): La vitesse de réaction simple: c'est une réponse immédiate à un signal dans une situation prévue. Exemple : coup pistole de départe. La vitesse de réaction complexe : elle est exigée dans les sports caractérisés

par des variations fréquentes et soudaines des situations rencontrées au cours des actions (jeux sportifs).

- **La fréquence gestuelle:** c'est la capacité d'augmenter le nombre d'appuis pendant chaque unité de temps. Autres formes complexes de la vitesse : On distingue, en matière de vitesse complexe, les catégories suivantes:

**La force vitesse :**c'est la capacité de repousser des résistances avec une vitesse maximale, ou dans un temps donné (Wei neck 2005).

**Vitesse endurance :** c'est la capacité de résister à la perte de vitesse due à la fatigue pour des vitesses de contraction maximales dans l'exécution des mouvements acycliques avec des résistances renforcées.

**Vitesse endurance maximale:** c'est la capacité de résister à la perte de vitesse due à la fatigue pour des vitesses de contraction maximales dans l'exécution de mouvement cyclique Les jeunes enfants ont encore une motricité « lente ».Cependant au début de la période scolaire la vitesse générale s'améliore et vers 10 ans, celle atteint dans son apogée une première étape. Par la suite c'est la vitesse de réaction qui s'améliore. Entre 07 et 09 ans, on peut observer également une forte amélioration de la vitesse d'action (Köhler, 1977). Alors que dans les années précédentes les mouvements acycliques ont été perfectionnés sous différentes formes, maintenant, il s'agit d'améliorer la fréquence de mouvement. Vers la fin

de la période de l'enfance c'est-à-dire vers 11-14 ans. on peut observer à nouveau une amélioration de la vitesse et une intégration des facteurs qui la déterminent. Durant l'âge scolaire toutes les formes d'exercices peuvent être proposées aux enfants. A ce stade on peut observer que les foulées de course sont encore courtes. Les divers exercices portant sur la vitesse de réaction peuvent être incorporées à la psychomotricité de base, sous forme de jeux. Il est déconseillé tout au moins pour ce qui ne sont pas Suffisamment entraînés d'accorder périodes de récupérations incomplètes, comme on les trouve dans l'entraînement en endurance-vitesse par exemple (Hahn, 1991)

### 1-3 Entraînable de la vitesse:

La vitesse en tant que facteur de la condition physique et de la coordination telle que nous analyserons ici essentiellement est généralement considérée comme une qualité dépendant de positions constitutionnelles, moins entraînable que par ex. la force ou l'endurance. Un adulte

non entraîné peut espérer améliorer son meilleur temps sur 100 m de 15 à 20 % tout au plus au terme d'un entraînement approprié (Hollmann et Hettinger 1980) cité par J. WEINECK (1997). C'est que la répartition des fibres musculaires et le schéma d'innervation sont fixés génétiquement. L'entraînement peut à la rigueur modifier le volume (augmentation de section) des fibres ou leur capacité de coordination, mais pas leur répartition en pourcentage, ainsi que le montrent les recherches les plus récentes, les propriétés de vitesse « pure », « élémentaire s'entraînent particulièrement bien au premier âge scolaire et dans la première phase pubertaire (Bauersfeld et Vol 1992, Tabachnik 1992, Lehmann 1993 et 1993; Vofl 1991 et 1993) cité par J. WEINECK (1997). Les paramètres dépendant de la force peuvent au contraire s'entraîner de façon optimale à un âge plus avancé. La vitesse est le facteur physique de la performance qui connaît le plus tôt la baisse la plus marquée

#### **1-4 La consommation d'oxygène (VO<sub>2</sub>max):**

L'efficacité du système aérobie dépend de la capacité de l'organisme à consommer un maximum d'oxygène. La VO<sub>2</sub> max mesure le plus grand volume d'oxygène qu'un individu peut consommer par unité de temps durant un travail physique intense et long au niveau de la mer<sup>25</sup>. Elle est exprimée en fonction de la masse corporelle (millilitres par kilogramme fois n minutes) et peut être mesurée avec précision en laboratoire par l'analyse des échanges gazeux au cours de l'effort. Elle reflète la forme physique de l'athlète et est également significative de ses performances potentielles dans les efforts en aéro-bie. La grande enfance et l'adolescence<sup>26</sup> semblent être propices au développement de la VO<sub>2</sub>max, car la croissance peut potentialiser son développement, à condition de proposer des formes d'entraînement adaptées. Lors d'efforts prolongés et intenses, un certain laps de temps s'écoule avant d'atteindre la consommation maximale d'oxygène (3 à 4 minutes pour le sédentaire, moins de 2 minutes pour l'athlète) qui correspond au délai d'adaptation cardio-respiratoire et tissulaire à l'effort (l'ensemble des conditions de transport et d'utilisation de l'oxygène). Les enfants s'adaptent plus rapidement que les adultes à ce type d'effort, leur VO<sub>2</sub>max se stabilise donc plus tôt<sup>27</sup>. Les facteurs limitant la consommation d'oxygène sont liés -au débit sanguin maximal de l'individu; -à la quantité maximale d'oxygène que le muscle peut utiliser, mesurée par la différence de concentration d'oxygène entre le sang artériel (aller) et le sang veineux (retour), donc au pourcentage de fibres musculaires oxydatives<sup>28</sup> qu'il contient

## 2.L'endurance:

### **2-1 Définition:**

Dans une définition spécifique à la pratique sportive, Weineck (1997) considère l'endurance en général comme étant la capacité psychophysiologie du sportif de résister à la fatigue. De son côté Frey (1977) considère l'endurance psychique comme étant la capacité de l'athlète à prolonger le plus longtemps possible un effort qui contraint à l'arrêt de l'exercice. A partir des définitions précédentes on peut considérer l'endurance psychique est la capacité de tout organisme ou d'une de ses parties de résister à la fatigue. Certain auteurs tels que Claude Bayer et Georges Lambert (1987) la définissent comme la qualité physiologique qui permet à l'organisme d'effectuer un effort pendant un temps très long.

### **2-2 Modalité de l'endurance:**

Plusieurs modalités de l'endurance ont été proposées par différents auteurs, selon Weineck (1990), l'endurance peut être classée selon plusieurs aspects. Sous l'aspect de la musculature mise en jeu : On parle ici de l'endurance générale, où l'athlète met à contribution plus de (1/7-1/6) de l'ensemble de la masse musculaire. Mais aussi de l'endurance musculaire locale qui implique une participation inférieure à (1/7-- 1/6) de la masse musculaire totale. Selon la spécificité de la discipline sportive pratiquée : dans cette forme de classification l'endurance générale est un type d'endurance qui ne tient pas compte du sport pratiqué (endurance de base). Alors qu'au contraire l'endurance spécifique se veut limitée à la forme spécifique d'une activité sportive bien déterminée. Selon le métabolisme énergétique: on distingue deux formes principales l'endurance anaérobie qui est conditionnée par un effort insuffisant d'oxygène aux muscles, et l'endurance aérobie où on constate que l'oxygène disponible suffit à la combustion des substrats énergétiques nécessaires à la contraction musculaire. Selon la durée de l'effort physique: on trouve en premier lieu l'endurance de courte durée (E C D) qui regroupe les efforts maximaux compris entre 45 secondes et 2 minutes et dont les besoins énergétiques sont couverts par le processus anaérobie. Ensuite l'endurance de longue durée (E L D). Un entraînement sportif orienté vers l'endurance amène à un plus haut niveau de performance à long terme. Selon Weineck(1997), l'objectif du sport des adolescents devrait être en priorité le développement de l'endurance générale et non l'endurance spéciale et cela par le biais des jeux. Il est très important aussi de souligner que

l'entraînement de l'endurance chez les adolescents doit absolument tenir compte de la faiblesse de leur capacité anaérobie, de ce fait le choix des méthodes et des contenus d'entraînement ainsi que le dosage des charges doivent être adaptés à leur état de développement physiologique."

### **2-3 La vitesse maximale aérobie(vma) :**

La VO<sub>2</sub>max aérobie est une valeur représentative et prédictive de la performance du coureur en demi-fond, mais elle reste peu accessible à l'entraîneur ou à l'enseignant. La notion de vitesse stabilisée lorsque l'athlète se trouve à VO<sub>2</sub>max est plus aisée à déterminer et plus exploitable. En effet, la vitesse maximale aérobie (VMA) est la plus petite vitesse sollicitant la consommation maximale d'oxygène<sup>30</sup>. Elle s'exprime en kilomètres par heure<sup>31</sup>. Il est possible d'extrapoler la consommation maximale d'oxygène en partant de la vitesse maximale aérobie et en appliquant l'équation de Mercier et Léger<sup>32</sup>:  $VMA \text{ (km/h)} = VO_2 \text{ (ml/kg/min)} / 3,5$  Par exemple, un coureur atteignant 18 kilomètres/heure en vitesse maximale aérobie lors d'un test devrait présenter une VO<sub>2</sub>max de 63 ml/kg/min. La connaissance de la VMA est essentielle pour la conception et la mise en œuvre de la préparation à la course longue. En effet elle permet de cibler l'impact énergétique, de déterminer les allures individuelles de course et d'adapter la puissance des exercices à chacun.

## **3- La coordination:**

### **3-1 Définition**

: Un grand nombre des qualités motrices constitue le concept coordination. La coordination se fait par l'action simultanée du système nerveux central et des muscles squelettiques, afin d'exécuter un mouvement volontaire de telle sorte qu'il y ait un enchaînement harmonieux entre les différentes composantes de ce mouvement. D'après Hirt, (1981), La capacité de coordination est déterminée avant tout, par les processus de contrôle et de régulation du mouvement. De son côté Fauche et Lofi, (1984) considèrent que le terme de coordination est souvent confondu avec les expressions telle qu'habilité, agilité et même adresse puisque ce sont des concepts très proches. Bersten (1970), le meilleur témoin de la coordination est le degré d'adaptation des mouvements à la situation

### 3-2 Les modalités de la coordination:

**La capacité de coordination générale:** C'est le résultat d'un apprentissage moteur polyvalent, c'est-à-dire que l'on retrouve dans différentes disciplines sportives et dans divers domaines de vie et du sport permettant d'accomplir des tâches motrices de manière inventive. (Haarre et all, cité par Raeder( 1970) in Weineck 2005)

**-La capacité de coordination spécifique :** Développée dans le cadre de la discipline sportive considérée et permettant de varier les combinaisons gestuelles des techniques propres à cette pratique. (Osolin 1952 cité par Weineck 2005). La coordination dans sa diversité joue un rôle très important durant l'éducation physique de l'enfant pré-pubère : Elle est la base des facultés d'apprentissage sensori-moteur. Elle permet de répéter des mouvements identiques avec une moindre dépense de force et d'énergie. U Elle assure la poursuite de l'amélioration de la performance dans les années d'entraînement suivantes. Elle permet de mieux assimiler des techniques d'autres disciplines sportives. La capacité de coordination est souvent considérée comme synonyme d'adresse, elle s'exprime par très bonne maîtrise de l'action motrice et une capacité accrue d'apprentissage

oteur, cette capacité à son tour s'appuie sur plusieurs paramètres qui sont. les différents facteurs physiques de la performance, le répertoire moteur, et enfin la capacité d'analyse de la personne

### 3-3 Composantes de la coordination:

Pour déterminer l'importance relative à l'adresse dans le cadre de l'entraînement de l'enfant pré-pubère, il semble important d'identifier chacun de ces composantes

**-La capacité de combinaison:** être capable de corréler les différentes parties du corps (ex: mouvement des extrémités du tronc et de la tête).

**-La capacité d'analyse :** atteindre un haut degré d'harmonisation entre les différentes phases d'un mouvement, ce qui permet la précision et l'économie dans l'exécution du geste.

**-La capacité d'équilibre:** maintenir ou rétablir le corps en équilibre malgré le déplacement, se cultive très tôt, doit être travaillée, sinon: provoque frein à la performance et risque de blessures.

**-La capacité d'orientation:** déterminer et modifier la position du corps dans l'espace et dans le temps, en fonction du terrain -La rythmicité : capacité de saisir et de reproduire un rythme, c'est une capacité qu'on trouve dans toutes les activités individuelles ou collectives.

**A -La capacité de réaction:** réagir au bon moment à un signal donné. Exemple: le départ en sprint. En plus des composantes de la coordination, on distingue les trois capacités générales de base a- La capacité de contrôle : fondée sur les informations venant de l'appareil kinesthésique (capacités et qualités proprioceptives), l'orientation, l'équilibre.

**b- La capacité d'apprentissage moteur :** apprendre un mouvement, enregistrer l'acquis et s'y référer en fonction de la situation. C'est la réception de l'information et son stockage.

**c-La capacité d'adaptation et de réadaptation motrice:** dépend des deux capacités précédentes, elle ne s'exécute pleinement que si un bagage suffisant d'expériences motrices est disponible.

Parmi de nombreux auteurs qui ont travaillé sur les qualités physiques, on retrouve M. Pradet(1989) qui précise que ces dernières entretiennent« des relations de dépendance et d'indépendance » les unes par rapport aux autres. Il propose un regroupement par « famille » permettant une approche plus pratique. Trois secteurs sont ainsi distingués Un secteur de puissance: C'est la faculté d'exprimer des actions motrices avec une intensité maximale. C'est une faculté fortement influencée par les qualités de force et de Vitesse. En d'autres termes, elle se caractérise par une grande force et une grande vitesse.

### 3-4 OBJECTIF DE LA CAPACITE DE COORDINATION

Hawkins (2004) a relaté que durant le match de football les joueurs effectuaient plus de 450 changements de direction de plus de 90°, des sauts, des tacles, des passes longues et courtes, des courses arrière, des frappes, des têtes. Tous ces éléments qui s'enchaînent de manière aléatoire durant le match nécessitent une coordination de qualité car il faut les effectuer en présence de joueurs adverses et par rapport à ses partenaires. La coordination est essentielle chez le footballeur. La coordination se développe durant la période pré-pubertaire et la puberté. (Dellal, 2008)

**1-Sur le plan individuel :**

La coordination de l'individu est une composante indispensable à la performance de tous les sports. La coordination est d'ordre technique et son rendement est lié directement à la différente notion d'ordre psychomoteur ex: la perception, feed-back, l'expertise, le traitement de l'information. (Dellal, 2008)

**a. Apprentissage et performance:** Sur le plan de l'apprentissage la coordination concerne essentiellement les jeunes footballeurs.Elle constituéla base des facultésd'apprentissage moteur et d'optimisationde la performance.La coordinationest présentée dans chacun des gestesdu sportif mai ce sont des fruits d'un apprentissagemoteur quel que soit le courant méthodologique. (Dellal, 2008)

**b. Habileté et adresse:** La coordination coïncide avec la notion d'adresse.Est un élément essentiel à des réalisations techniques des plus simplesaux plus complexes. Si un joueur novice na pas un minimum de coordination il va trouver les difficults lorsqu'il effectue des taches simples. La coordination va permettre d'apprendre d'optimiser et d'expertiser des gestes techniques isolés afin d'effectuer ces habilités dans le contexte spécifique au footballeur lors de d'un exercice. (Dellal, 2008)

**c. Economie d'énergie:** Avoir une bonne coordination gestuelle permet une économie d'énergie. Le joueur doit effectuerun mouvementle plus fluide et le plus efficace possible tout en ayant un relâchement musculaire. Ces éléments permettront de réduire le cout énergétique. Le sportif et les éducateurs doivent être perfectionnistes, se remettre en cause systématiquement car l'économie d'énergie permettra d'être plus performant. (Dellal, 2008)

**d. Adaptation à l'environnement direct:** La coordination est l'élément essentiel pour réguler la capacité d'adaptation omniprésente dans le milieu du football du fait de la multiplicité des changements de direction et des diverses informations à percevoir, à traiter et à analyser.Le joueur doit s'adapter à la trajectoire du ballon, la vitesse de la balle, les mouvements des partenaires. (Dellal, 2008)

**e. Vitesse d'exécutionet vitesse gestuelle** Elle est la condition préalable de la maîtrise de la situation motrice nécessitantune action ciblée et rapideen relation direct avec les notions de vitesse d'exécution et de précision. Les sportifs ont souvent du mal à agir avec une grande précision.D'où l'expression courante « il faut agir sans précipitation ». D'ailleurs, une des

principales différences entre le très haut niveau et de haut niveau concernent cette notion de vitesse d'exécution. De même, dans le système pyramidal des différents niveaux de compétition, plus le niveau est élevé, plus cette vitesse gestuelle est importante. « Agir vite » dépend également de la capacité d'anticipation. (Dellal. 2008)

## **-2 Sur le plan collectif:**

La coordination individuelle représentée à travers l'exécution de différentes tâches dans diverses modalités permet une coordination collective. Une fois le joueur a acquis une coordination des différentes habiletés techniques va pouvoir travailler progressivement sa coordination sur le plan collectif. Il y'a une liaison entre la coordination individuelle et la coordination collective. (Dellal. 2008)

**a. Coordination interindividuelle, collective et rendement de l'équipe:** Cette coordination montre la manière dont le joueur intègre les déplacements et le positionnement de ses partenaires afin de prendre une décision efficace, et cette décision est au choix un déplacement, une passe, un centre. Chaque joueur devra prendre en considération ces éléments afin d'optimiser la performance de l'équipe, il devra être capable d'agir rapidement. (Dellal. 2008)

**b. Coordination interindividuelle, collective par rapport aux adversaires :** Cette coordination explique la manière dont le joueur intègre les déplacements individuels des adversaires, le positionnement collectif de ses adversaires et leur différente manière d'évoluer afin de choisir une décision efficace commune. (Dellal. 2008)

## **3-5. IMPORTANCE DE LA COORDINATION MOTRICE DANS L'ENTRAÎNEMENT TECHNIQUE:**

Les sportifs mieux entraînés du point de vue de la coordination motrice apprennent plus rapidement l'exécution technique exacte que le sportif ayant un répertoire moteur étendu. Mais un niveau de coordination motrice assez peu développe. Pour développer le répertoire moteur il faut commencer à un âge assez précoce chez l'enfant. Étant donné la variété des capacités de coordination, l'apprentissage de la coordination n'est possible que par l'intermédiaire d'un apprentissage diversifié, divers, varié, inhabituel selon la formule de Hitz (1985). D'après les nombreuses recherches montrant que le taux d'abandon est extrêmement élevé, et ce taux peut aller jusqu'à 80% chez les sportifs qui ont été spécialisés trop tôt. C'est grâce à la spécialisation précoce qui permet d'obtenir un succès de courte durée, elle empêche un perfectionnement régulier et systématique de la performance. Il est obligatoire pour l'entraîneur

d'avoir une vision à long terme de la formation des jeunes footballeurs, et non pas de rechercher le succès immédiat mais éphémère. Selon Weineck (1997), une discipline ne peut à elle seule développer également toutes les capacités de coordination. Cela doit inciter l'éducateur à utiliser ponctuellement des activités autres, proposer des exercices variés. L'entraînement des enfants doit s'attacher à une forme polyvalente, un pluralisme nécessaire pour compléter leur formation de base et faire en sorte que le répertoire des coordinations soit le plus étendue possible. Et cela c'est une garantie pour la suite du développement

### **3-6 ROLE DE LA COORDINATION:**

Pour qu'un sportif maîtrise ces actions motrices, il faut avoir une bonne coordination motrice pour maîtriser avec précision et économie dans des situations déterminées, prévues (stéréotypes) ou imprévues (adaptation). Elle permet aussi d'apprendre relativement plus rapidement les gestes sportifs (Frey 1977) La qualité des fonctions de \_coordinations influencera la rapidité et la qualité de l'apprentissage des techniques sportives. Pour permettre de mieux utiliser son répertoire de mouvements afin de créer de nouvelles variantes d'exécution d'une situation inattendue. Ce qui peut paraître à certains une perte de temps est non seulement un gain de temps pour les acquisitions futures mais surtout un pari gagnant pour l'avenir du joueur. Apprendre plus vite et mieux, réagir efficacement aux situations nouvelles, n'est-ce que tout entraîneur souhaite de ses joueurs.

**CHAPTER 02: ANALYSE BIOMECANIQUE DE COURSE (sprinte 100M /DEMI  
FOND 1500M)**

La biomécanique est l'étude des forces et de leurs effets sur le vivant. Elle se subdivise en l'étude de la cinématique et de la cinétique. La biomécanique et la mécanique permettent d'étudier le mouvement du corps humain. Ce chapitre s'intéresse à la cinématique du mouvement linéaire (ou translation: quand tous les points de l'objet se déplacent dans la même direction, à la même vitesse et sans rotation). La Figure A2.I reprend les définitions de la biomécanique et de la cinématique. Le mouvement du corps humain peut être linéaire ou angulaire. La plupart des mouvements en biomécanique sont une combinaison de translations et de rotations qui produisent un mouvement général. Un 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). Le mouvement angulaire (abordé dans le chapitre suivant) se fait autour d'un axe (imaginaire ou réel), avec toutes les parties du corps se déplaçant selon le même angle dans le même temps. La biomécanique est la science qui étudie les effets des forces sur les êtres vivants. Cette étude peut être décomposée en 2 parties :

la cinématique qui s'intéresse à décrire le mouvement (déplacement, vitesse, accélération)

la cinétique qui s'intéresse à décrire les forces qui créent ou qui résultent du mouvement des corps.

Les courses athlétiques sont traitées sous angle technologique, aussi bien dans le contexte didactique de EPS que dans celui de l'entraînement à l'association sportive (AS). En effet, l'EPS ne se réduit pas à un simple cadre d'initiation aux sports, elle peut aussi permettre de tendre vers le niveau expert, en particulier à l'AS. À l'instar du club d'athlétisme, l'AS a pour objectif d'améliorer les ressources des élèves: elle les prépare à la compétition et leur permet d'améliorer leurs performances. Les situations d'apprentissage qu'on y propose doivent donc être d'une grande plasticité d'autant plus que l'éducateur est confronté à des niveaux et à des profils multiples. La technologie d'une APS est à l'enseignant ce que le nord magnétique est aux marins: elle aide à traverser les courants didactiques, institutionnels ou non. Les connaissances technologiques sont autant de balises et de points d'ancrage évitant de perdre la boussole didactique. Afin de rendre la pratique des courses athlétiques accessible à tous, des aménagements sont nécessaires, mais il ne faut pas pour autant dénaturer l'essence de la discipline. Pour construire les situations proposées dans ce livre, qui visent l'acquisition de savoir-faire athlétiques à quatre niveaux de pratique, nous nous sommes donc appuyés sur les

connaissances technologiques actuelles. Notre démarche, qui prend en compte les problèmes caractérisant le comportement de l'athlète, est d'accompagner celui-ci dans un continuum qui lui est propre.

Au commencement était la course...

Dans la Grèce antique, les premières disciplines athlétiques sont essentiellement des épreuves de course. A la fin du xxe siècle, parallèlement à la rénovation des jeux Olympiques, les premiers clubs d'athlétisme amateur sont fondés, et la course à pied est objet premier des compétitions. Le Club des coureurs, créé par deux jeunes athlètes (un Anglais et un Français) en 1875 organise des courses: puis, en 1876, le Cercle de Madrid, fondé par Comte Jacques de Pourtalès, s'y met à son tour. Mais ces clubs n'ont qu'une courte vie. En revanche, le Racing Club de France (1882) et le Stade français (1884) dépassent les difficultés de leurs débuts pour créer l'Union des Sociétés françaises de course à pied en 1887, qui devient en 1889 l'Union des sociétés françaises des sports athlétiques, préfigurant la Fédération française d'athlétisme (1920). Les courses ont toujours été à la base du programme athlétique, précédant l'apparition des concours de sauts et de lancers. Ainsi, les premiers championnats de France d'athlétisme sont créés en 1888, avec pour seules épreuves les courses de 100 mètres, de 400 mètres, de 800 mètres, de 1500 mètres et de 110 mètres haies. Cela n'a rien de surprenant si l'on considère la course à pied comme une technique de locomotion à la fois première et fondamentale. Extrapolation de la marche, dès lors que l'homme se déplace dans l'urgence, la course à pied est la motricité usuelle sur laquelle s'évaluent les filières d'effort et se mesurent les ressources bioénergétiques d'un sujet. C'est d'ailleurs sur des modèles analogues qu'on explore ces ressources pour d'autres techniques de déplacement dans des milieux différents nage, ski de fond, patinage, cyclisme, canoë-kayak en ligne. Les premières distances du programme athlétique s'établirent sur le principe d'une confrontation dans divers registres d'effort, révélant chez les athlètes des aptitudes différentes: sprinter, résister ou durer. Du 100 mètres, épreuve reine, au marathon, distance mythique, les courses sont le domaine de la confrontation directe: un départ commun, une même distance et le verdict du chronomètre pour tous. Le résultat des courses est visuel et instantané. Chacune est un drame dont l'issue est incertaine, offrant au spectateur d'assister à son écriture. Cette nature influence même la télévision, car le réalisateur donne la primeur du direct à la course, préférant restituer les concours de sauts et de lancers en léger différé. Le règlement de l'athlétisme lui-même fait peser cette réalité sur les concours. Il octroie aux courses la priorité quant à la participation d'un athlète à plusieurs épreuves celui-ci doit se présenter au départ de la course et quitter son concours (de saut ou

lancer) en aménageant son ordre de passage dans le cadre de l'essai en cours. a- lé-la Le programme des courses athlétiques est stabilisé pour les hommes depuis les Jeux de Londres en 1928. La Grande-Bretagne, initiatrice de l'athlétisme moderne, a imposé des distances dérivées du mile anglais (1 609,34 mètres) que l'Europe continentale s'est conten- tée d'ajuster au système métrique, notamment sous l'im- pulsion de Pierre de Coubertin, qui imposa le mètre face Ux nt m- th-des par au yard (0,914 mètre) dans le programme des Jeux1, C'est ais ing ainsi que la piste de 400 mètres est l'héritière du quart de mile (402,34 mètres). D'aucuns pensent que si les adeptes du système métrique avaient été à l'origine de l'athlétisme moderne, ils auraient pris le kilomètre comme distance étalon, les pistes eussent mesuré 500 mètres, avec une épreuve sur cette distance que l'homme peut couvrir en près d'une minute. Outre des conséquences en apparence plus cartésiennes, les stades eussent été plus grands et les aires de lancer long moins à l'étroit. Mais cela eût été une autre histoire..

### **1-ANALYSE Biomécanique de la course :**

#### **1-1 Cycle de la course :**

Le cycle de la course comporte une phase d'appui (quand le pied est e. Sur le sol) et une phase oscillante (quand le pied est en laur). La course se carace. érise par des périodes de simple appui (un seul pied en contact avec le sol) séparant des des périodes d'envol (les deux pieds ne touchant pas le sol); elle ne comprend pas de période de double appui (les deux pied en contact avec le sol). La phase d'appui représente en moyenne 40 % de la durée totale du cycle et la phase oscillante 60 %. Ces rapports dépendent de la vitesse: la phase d'appui ne représente plus que 20 % de la durée totale du cycle quand la vitesse est maximale. L'enjambée est généralement appelée foulée quand on s'intéresse à la description de la course 2.

#### **1-2 Vitesse de course :**

La vitesse de course peut être augmentée en allongeant la foulée et/ou en au cadence. Jusqu'à une vitesse de 7 m/s, l'augmentation de la vitesse est principalement due à l'allongement de la foulée, après quoi elle dépend princip lement de l'augmentation de la cadence. L'allongement de la foulée se produit c mentant premier car il existe une cadence optimale pour laquelle le coût énergetugueunité de distance est minimal. Ce coût augmente de façon importantcnd la cadence augmente. Contrairementà ce qu'on pourrait penser, la longueur de la touee moins de la taille du sujet que de sa force et de sa flexibilité. Les des La course peut être décrite selon

les mêmes phases que celles de la n tableaux Suivants donne les amplitudes des mouvements articulaires différentes phases de la course. Notez que ces amplitudes peuvent varier avec la vitesse: elles sont généralement plus importantes quand la vitesse varie avec la vitesse.

## **2- Le sprint :**

Effort sans retenue, intense mais trop court pour provoquer une fatigue énergétique, le sprint court sacralise la lutte d'homme à homme, en particulier dans l'épreuve du 100 mètres. En quadrupédie derrière la ligne de départ l'arrivée en point de mire, chacun veut jaillir le premier pour désorganiser la course de l'autre. En effet, la lutte contre le chronomètre souligne l'importance de la réponse au signal sonore, tant les dixièmes ou les centièmes de seconde sont difficiles à gagner sur cette courte distance, qui n'a que la foulée comme noyau technique gestuel. Les spécificités du sprint en virage du 200 ou du 400 mètres sont souvent évoquées mais rarement élucidées. Nous verrons plus loin combien les contraintes biomécaniques d'une course en courbe ont des vertus didactiques et une puissance formatrice parfois méconnues des éducateurs. Enfin, nous évoquerons les particularités du sprint dit long ou prolongé (400 mètres), qui exige un violent effort sur le plan bioénergétique, compte tenu des perturbations liées à la production de lactates<sup>2</sup>. Au point qu'il faut en protéger les jeunes athlètes la glycolyse anaérobie est un système immature chez les enfants et les adolescents et s'assurer d'une bonne préparation chez les novices. Pour toutes ces raisons, on peut considérer que le coureur de 400 mètres est un sprinter complet du point de vue bioénergétique.

### **2-1- Analyse biomécanique du départ de course vitesse sur 100m**

La performance en course de vitesse sur 100 m Selon le Petit Robert le mot « performance » signifie un résultat chiffré obtenu dans une compétition (par un athlète, un groupe d'athlètes). Cette performance constitue l'objectif de tout athlète ou entraîneur. En athlétisme, lors des épreuves de course ou de marche, la performance est quantifiée par la mesure du temps qui s'écoule entre le signal de départ et l'arrivée de l'athlète. La meilleure performance est donc celle où l'athlète réalise l'épreuve dans le délai le plus court. L'évolution de la performance des premiers Jeux Olympiques Modernes (Athènes 1896) à nos jours montre une nette amélioration. Le record du monde au 100 m course de vitesse a évolué de 12 s à 9,69 s (record réalisé par le Jamaïcain Usain Bolt lors des JO9 de Pékin 2008). L'évolution des records (figure1) est en partie la conséquence de l'amélioration de la précision et de la justesse des moyens de mesures. Jusqu'en 1964 (JO de Tokyo), le chronométrage était « manuel ». Pour qu'une performance soit officiellement homologuée, trois chronométrateurs étaient requis. À partir de cette date,

l'IAAF adopte le chronométrage automatique qui remplace le chronométrage manuel lors des rencontres internationales.

### **2-1-1- Les phases d'une course de vitesse**

Si la course de vitesse est, du départ à l'arrivée, un continuum ; il est pratique d'identifier différentes phases, ne serait-ce que pour évaluer les phases pour lesquelles la variabilité de la performance peut encore permettre la réalisation d'un nouvel exploit. Les différentes phases de la course ont déjà été identifiées. On les retrouve pour une part dans le règlement de course, et pour l'autre part, dans les études cinématiques menées lors de compétitions internationales. Le règlement de la course de vitesse sur 100 m figure dans la Section III du Chapitre 5 du règlement des compétitions instaurée par l'IAAF. Ce règlement présente la codification technique des compétitions en dix sections. Elles concernent les courses, les concours, les épreuves combinées, les épreuves en salles... L'épreuve de la course de vitesse sur 100 m fait partie de la section des courses qui comprend onze règles (de la règle 160 à la règle 170). La course de vitesse sur 100 m se dispute en couloir droit, corde à gauche sur une piste standard de 400 m. Chaque athlète doit garder, du départ à l'arrivée, le couloir qui lui est attribué faute d'être disqualifié. Chaque couloir mesure  $1,22 \pm 0,01$  m de largeur et il est marqué par des lignes d'une largeur de 0,05 m. La piste doit pouvoir compter huit couloirs. Il est possible de distinguer parmi les onze règles du règlement, trois groupes qui identifient trois phases de l'épreuve de vitesse sur 100 m, à savoir : le départ, la course et l'arrivée. Au cours des Championnats du Monde de Rome (1987) [Mora 88] et de Tokyo en (1991) [Ae 92], la vitesse de course sur 100 m a été mesurée par intervalle de 10 m. Lors des Championnats du Monde d'Athènes (1997) [Müll 97], c'est la vitesse instantanée du coureur qui a été mesurée en exploitant l'effet Doppler d'un faisceau laser. Ces investigations mesurent le déplacement des athlètes suivant le seul axe antéropostérieur. Elles montrent trois phases caractéristiques de la course de vitesse : une première phase d'accélération initiale jusqu'à 30-50 m, une deuxième phase de course de vitesse maximale (maintenue approximativement constante dans la mesure du possible) et une dernière phase de décélération (plus ou moins importante) dans les 20 derniers mètres.

### **2-1-2-La phase du départ**

Au cours des premiers JO Modernes (Athènes 1896), chaque athlète adopte empiriquement une posture de départ afin de pouvoir démarrer sa course le plus rapidement possible. À la recherche

de la position optimale, certains optent pour une position de face ou de profil, debout avec le buste légèrement incliné ou les bras écartés avec les genoux fléchis, d'autres se mettent en position accroupie avec les deux mains sur le sol comme le fait Thomas Burke, le vainqueur de l'épreuve du 100 m. La position « Prêt » est la position initiale de départ, au cours de laquelle l'athlète est « au repos » en quadrupédie dans les blocs de départ jusqu'à l'instant du signal de départ ( $t_s$ ) ; Le temps de réaction inclut le temps mis par le signal de départ ( $t_s$  fig9) pour parvenir à l'organe sensoriel de l'athlète, et le temps de latence que met l'athlète pour répondre à ce signal. Ce temps de réaction diffère d'une étude à une autre : il est d'environ 120 ms pour Mero (1992) et plus récemment Davila (2006) l'estime à 140 ms. Les données actuelles ne permettent pas de fixer avec précision le temps minimum qui définit un faux départ [Mero 92 ; Davi 06] ; L'impulsion  $t_0$  s'étend de l'instant de début de son action ( $t_a$  figure9) dans les blocs jusqu'à l'instant de son éjection . Au cours de cette étape qui dure 0,31 – 0,37 s pour les élites [Harl 97], la vitesse du centre de gravité du coureur croît jusqu'à 3.9 m/s à l'éjection [Baum 76 ; Copp 89 ; Mero 83 ; Mero 88 ; Mero 90 ; Mero 92 ] ; L'éjection correspond à l'instant où le pied avant de l'athlète quitte le bloc de départ (te figure9). À partir de cet instant, l'athlète est en phase aérienne jusqu'à la pose suivante de son pied arrière au sol pour débiter la course. Pour les élites, la durée moyenne de cette première phase aérienne varie de 60 à 70 ms [Harl 97] ; la variation de la position du centre de gravité est de l'ordre de 0,3 m [Natt 06].

### **2-1-3-La phase d'accélération**

La phase d'accélération débute dès que l'athlète pose son pied (pied arrière) au sol juste après son éjection des starting blocs. À partir de cet instant, il doit accélérer son centre de gravité le plus rapidement possible. Il réalise ainsi un gain de vitesse d'environ 8 m/s sur les 30 à 50 premiers mètres [Mero 92]. Au cours de cette phase d'accélération, l'amplitude et la fréquence des foulées augmentent progressivement alors que le temps de contact des pieds avec le sol diminue. Une foulée est la succession d'un appui et d'une phase aérienne (contrairement au pas de marche qui se caractérise par des phases de simple et double appui sans phase aérienne). Deux foulées successives constituent un cycle de course. Figure 10 Vue sagittale de la course à pied : cycle et foulée de course Au cours des dix premiers mètres, la fréquence moyenne et l'amplitude moyenne représentent respectivement 80% et 50% de leurs valeurs maximales atteintes au cours de la course [Natt 06]. Il est usuel, en première approximation d'associer la vitesse du coureur aux valeurs de la fréquence et de l'amplitude de la foulée. Ainsi, sur le terrain, la vitesse de course  $V$  est estimée par le produit de l'amplitude  $Amp$  et la fréquence  $Freq$  de la foulée  $V = A F_{mp} \times$  . La fréquence est l'inverse de la somme du temps de contact

te de l'appui et de l'envol  $t_v$  d'où  $t_F = t_c + t_v$ . La littérature technique considère que : pour acquérir la plus grande vitesse, l'athlète doit trouver la plus grande amplitude de foulée compatible avec la fréquence la plus élevée pour atteindre un optimum qui définit sa vitesse stabilisée.

#### **2-1-4-La phase de vitesse stabilisée**

La phase de vitesse stabilisée correspond à la vitesse maximale de course pendant laquelle l'amplitude et la fréquence des foulées atteignent leurs valeurs optimales ; les coureurs confirmés peuvent atteindre une vitesse maximale de l'ordre de 10 à 12 m/s. L'amplitude de la foulée est alors d'environ 2 à 2,6 m pour une fréquence de 5 Hz. Le temps de contact représente 40% et la phase aérienne représente 60% de la durée totale de la foulée [Alla 00 ; Coh 02 ; Dick 89]. Tout au long de cette phase, le coureur essaie de conserver une allure régulière de course jusqu'à la ligne d'arrivée. D'un point de vue descriptif, l'étude de ce mouvement cyclique différencie deux techniques de course : la technique du cycle avant et celle du cycle arrière. Les caractéristiques de ces deux techniques peuvent être définies en suivant la position instantanée d'un point situé au niveau du pied de l'athlète (par rapport à un repère associé à son bassin) lors d'un cycle de course. Cette démarche permet de reconstruire un diagramme appelée poulaine dont la forme caractérise la technique adoptée.

#### **2-1-5-La phase de décélération**

Cette phase observée chez certains coureurs, n'a pas, à notre connaissance, fait l'objet d'études particulières. Elle ne sera pas prise en compte dans cette étude. Ce choix sera justifié ultérieurement (§-V.2.1).

#### **2-1-6- L'arrivée**

L'arrivée de la course est désignée par une ligne blanche de 0,05 m tracée sur la piste et perpendiculaire aux couloirs. Les concurrents sont classés dans l'ordre dans lequel une partie quelconque du corps de l'athlète (c'est-à-dire le torse mais pas la tête, le cou, les bras, les

jambes, les mains ou les pieds) atteint le plan perpendiculaire au bord le plus proche de la ligne d'arrivée

.2-A propos de la mesure officielle de la performance lors de l'épreuve du 100 m Le départ est décomposé en trois étapes obligatoires énoncées dans la règle 162 de l'IAAF et ordonnées par le Starter11, comme suit :

À vos marques : l'athlète doit s'approcher de la ligne de départ en gardant une position complètement à l'intérieur du couloir qui lui a été attribuée et derrière la ligne de départ. Les deux mains et au moins un genou doivent être en contact avec le sol et les deux pieds en contact avec les blocs de départ ; Prêt : l'athlète doit prendre immédiatement sa position de départ tout en gardant le contact de ses mains avec le sol et de ses pieds avec les plaques des blocs ; Coup de pistolet ou signal d'un autre appareil approuvé : l'athlète est autorisé à partir. F Les différentes phases du départ (Vue de profil) Après avoir pris sa position complète et finale de départ, un athlète n'est autorisé à commencer son mouvement de départ qu'après le coup de feu ou le signal d'un appareil de départ homologué. Si de l'avis du Starter ou des Starters de Rappel, un athlète ne respecte pas cette obligation, il sera averti et son départ sera considéré « Faux ». Cette règle a été appliquée pour la première fois aux JO de Paris en 1924 afin de pénaliser les athlètes qui anticipent le coup de pistolet de départ. La réglementation actuelle des faux départs considère que cette infraction est commise lorsque :

un athlète n'observe pas l'obligation du commandement « À vos marques » ou « Prêts », selon le cas, dans un délai raisonnable ; un athlète après le commandement « À vos marques », dérange les autres participants à la course en faisant du bruit ou de toute autre manière ;Lorsqu'un appareil de détection de faux départs approuvé... détecte un faux départ(c'est-à-dire lorsque le temps de réaction est inférieur à 100/1000ème de seconde)... Jusqu'à 2003, la réglementation de l'IAAF autorisait un seul faux départ par athlète. Depuis cette date, un seul faux départ par course est autorisé. Au deuxième faux départ, peu importe l'athlète qui le commet, il sera éliminé. Cette règle est actuellement contestée. À partir des JO de Stockholm (1912), la vitesse du vent est prise en compte pour l'homologation des records. Elle est mesurée à l'aide d'un anémomètre placé le long de la piste (à 50 m de l'arrivée) pendant dix secondes à partir de l'instant du signal de départ. Pour homologuer un record, la vitesse du vent ne doit pas dépasser 2 m/s.

## 2-2- Lévolution du sprint :

### Le 100 mètres et le 200 mètres

Le 200 mètres a en quelque sorte précédé l'apparition du 100 mètres puisque dans la Grèce antique la distance était le stadion (environ 192 mètres). Des textes et représentations montrent que, à cette époque en Grèce, les femmes pratiquent les mêmes sports que les hommes. En Crète, entre 2500 et 1500 avant notre ère, les femmes font de la course à pied en sus des danses rituelles. Elles conduisent des attelages de course à plusieurs chevaux et s'adonnent à la boxe et à la tauromachie. A Sparte et à Lesbos, les femmes ajoutent à la danse le lancer de disque et de javelot, la lutte et la course à pied. Afin «d'engendrer des enfants vigoureux.], les femmes libres devaient, comme les garçons, lutter entre elles aux épreuves de vitesse et de force». Compte tenu des mythes à l'origine des Jeux antiques, célébrant la fécondité de la nature et les liens de l'homme avec les éléments terrestres, les femmes ne pouvaient être totalement étrangères à l'événement, mais elles n'étaient pas autorisées à participer aux jeux masculins. Elles avaient donc dans plusieurs cités leurs propres jeux athlétiques. Ainsi, sur le site d'Olympie, les Héraïa, en l'honneur d'Héra (la femme de Zeus), se déroulaient en septembre de la même année que les jeux masculins. Il n'y avait qu'une seule épreuve en athlétisme, la course du stadion, qui nous enseigne les principes de déclinaison des épreuves athlétiques: trois catégories pouvaient concourir, les fillettes, les adolescentes et les jeunes femmes (curieusement, il n'est pas fait mention d'un système équivalent pour les hommes); la distance était d'environ 160 mètres, soit plus de 80% de la distance couverte par les hommes. Le principe de réduction des distances reste un moyen d'adaptation des épreuves pour les catégories de jeunes.

### Le 400 mètres

Proche du diaulos des Grecs anciens (double stadion, soit 384,54 mètres), le 400 mètres est la transposition métrique du quart de mile anglais (402,25 mètres). Alors qu'avec le système métrique on tend à imposer des pistes de 500 mètres (des records sont homologués sur cette distance jusqu'en 1960), le 400 mètres devient finalement la distance de référence pour la circonférence des pistes officielles.

## 2-3- Le règlement :

### Les catégories et les distances

En athlétisme, le sprint est l'épreuve symbolique de la lutte d'homme à homme. Elle suppose un engagement total, reléguant la tactique au second plan, au contraire des épreuves de demi-fond. Par son caractère absolu dans l'effort, le sprint fascine car la vitesse est souvent placée au plus haut rang des qualités physiques. La Course de 100 mètres plat est donc l'épreuve reine de l'athlétisme. Il est convenu de distinguer le sprint court, sur 100 mètres, du sprint long, sur 400 mètres. Les exigences bioénergétiques de ces courses en font deux épreuves bien différentes, aussi bien en termes d'effort que d'entraînement. Sous l'angle physiologique, le 200 mètres prolonge l'effort du 100 mètres. La participation des sprinters sur ces deux distances lors des rendez-vous internationaux le confirme, tant chez les hommes que chez les femmes. En fonction des catégories, les distances de course varient. Par ailleurs, il faut distinguer les performances obtenues en salle (saison hivernale) de celles obtenues en plein air (saison estivale).

### **Le départ**

Deux critères distinguent les courses de sprint: les starting-blocks sont obligatoires en compétition officielle et chaque coureur doit rester dans son couloir du départ à l'arrivée (sauf pour le 400 mètres en salle).

### **Les starting-blocks**

Les blocs de départ sont employés dans toutes les courses jusqu'au 400 mètres inclus, ainsi que dans le premier parcours des relais 4 x 200 mètres et 4 x 400 mètres<sup>11</sup> Ils sont interdits dans les autres courses. Une fois les blocs placés sur la piste, aucune partie les constituant ne doit empiéter sur la ligne de départ ni chevaucher un autre couloir.

## **2-4- Niveau 2 du débrouillé au confirmé :**

### **Les caractéristiques du débrouillé**

Le coureur débrouillé synchronise mieux ses bras et ses jambes, ce qui annonce des actions de bras plus dynamiques, qui participent réellement à la propulsion. Mais, dès qu'il lutte contre des concurrents, le sprinter a toujours tendance à se crispier au niveau des épaules. Les gammes et éducatifs de course pratiqués durant l'échauffement aident le coureur à acquérir une géométrie de course verticale. Cependant, lorsque le cycle de jambes n'est pas à dominante talons-fesses, les genoux ne sont pas tirés suffisamment loin devant pour que le pied réalise une corne avant de façon à griffer le sol. Bien que le sprinter débrouillé redresse le buste, il n'a pas toujours les ressources musculaires suffisantes pour assurer la force pliométrique nécessaire aux impulsions des foulées de sprint. L'enchaînement des appuis est encore incertain dans la mise

en action. Si le coureur veut s'engager davantage vers l'avant, il risque de s'affaisser sur un ou deux appuis. Néanmoins, la plupart du temps, le sprinter débrouillé se relève trop tôt dans la phase de recherche de vitesse. Pour dépasser ce niveau, il faut aborder le départ en quadrupédie avec ses contraintes biomécaniques sur les ressources musculaires.

### **2-5- Les objectifs**

Mettre en œuvre les principes d'efficacité du départ et de la mise en action, notamment en acceptant d'engager les épaules vers l'avant de façon à propulser son centre de gravité lors de la phase d'acquisition de la vitesse. Apprendre à dépasser la dynamique du sprint spontané en explorant les possibilités d'amplitude et de fréquence de la foulée.

### **2-6- Les situations :**

#### **La situation de référence**

#### **Gammes et éducatifs de course**

Au niveau débrouillé, on commence à articuler deux à deux les exercices de foulée, afin de structurer le sprinter dans ses constantes de placement. D'un éducatif à l'autre, on garde la même géométrie de course.

### **3- Les courses de fond et de demi-fond :**

Au fil du temps, chaque distance du demi-fond au fond s'est singularisée par sa «batterie chronométrique», entraînant l'exploration des ressources bioénergétiques dans tous les registres du système aérobie: jusque dans les années 1960, descendre sous les 4 minutes sur 1 mile attisait le feu des méthodologies d'entraînement; plus récemment, les 13 minutes au 5000 mètres ou les 8 minutes au 3000 mètres steeple furent d'autres barrières, tout aussi virtuelles, qui ont fini par tomber. A travers les exploits des athlètes de la terre entière, c'est une guerre des méthodes qui a toujours sévi... et qui suit encore son cours.

#### **3-1- L'évolution du demi-fond**

Au-delà du 400 mètres on passe aux distances du demi-fond. On distingue: -les courses de demi-fond court, à savoir le 800 mètres, le 1500 mètres et le mile anglais (1609,32 mètres), encore disputé en raison de sa prestigieuse histoire; -les courses de demi-fond long qui

comprennent le 5000 mètres, le 10000 mètres et le 3000 mètres steeple. L'évolution des performances n'a cessé de tirer vers le haut les limites de cette classification. En effet, jusque dans les années 1950, on situait les courses de fond à partir du 5000 mètres, or, aujourd'hui on tend à définir le 800 mètres comme une épreuve de vitesse prolongée. Cependant, l'actuelle parité des programmes masculin et féminin permet de relativiser ces considérations. Le panel des distances de course a pour origine les sub- divisions du mile. Mais l'adoption du système métrique aux jeux Olympiques n'a pas empêché la coexistence des distances anglaises sur les tablettes des records. Dans le programme olympique, le mile cède la place au 1500 mètres dès 1896. Les courses de 2 miles (3218,80 mètres), de 3 miles (4828,03 mètres) et de 6 miles (9656,06 mètres) deviennent respectivement le 3000 mètres, le 5000 mètres et le 10000 mètres. A ces distances s'ajoutent le 1000 mètres et le 2000 mètres, instaurés par les Français. Autant d'épreuves disputées hors championnats, dans les meetings, et faisant l'objet de tentatives de records.

### **3-2- Le règlement**

Nous présentons ici le règlement des courses de demi-fond sur piste en accordant la priorité aux éléments qui influent directement sur la pratique et qui doivent être pris en compte dans la formation des coureurs.

### **3-3- Les catégories et les distances**

Les épreuves de demi-fond sur piste sont déclinées selon les catégories d'âge de façon à être accessibles aux jeunes. Il existe trois types d'épreuves: -les épreuves courtes, notamment le 1000 mètres pour les benjamins et les minimes, qui devient le 800 mètres ou le 1500 mètres à partir de la catégorie cadets; -les épreuves longues, comme le 2000 mètres et le 3000 mètres, proposées aux minimes, qui sont remplacées par le 5000 mètres et le 10000 mètres à partir de la catégorie junior; -les épreuves de durée qui imposent de réaliser une performance en parcourant la plus grande distance possible sur un temps donné (de 20 minutes à 1 heure suivant la catégorie). Les épreuves de cross-country se réalisent sur des parcours en nature en période hivernale; les distances pratiquées sont elles aussi réglementées en fonction des catégories d'âges.

### **3-4- Les performances**

Dans les épreuves de demi-fond sur piste, les concurrents doivent s'imposer sur la distance parcourue dans un affrontement direct. La course en peloton avec ses aspects tactiques et la

lutte d'homme à homme font tout l'attrait de ces compétitions. Bien que la nature des courses privilégie la place et le classement, l'athlétisme moderne accorde une importance considérable à la performance.

### **Le départ**

Dans toutes les épreuves sur piste de plus de 800 mètres, le départ s'effectue en ligne sans tenir compte des couloirs<sup>21</sup> les athlètes (au maximum douze par série) salignent, selon un ordre pré-établi, le long de la ligne de départ incurvée correspondant à la distance à parcourir qui se situe en entrée de virage. Le 800 mètres, lui, est couru en couloirs du départ jusqu'à la ligne de rabattement située après le premier virage. Elle a la même forme incurvée que la ligne de départ et chacune de ses extrémités est matérialisée par un fanion ou une trace hors de la piste<sup>22</sup>. Dans les courses de plus de 400 mètres, les ordres sont: «A vos marques!», puis, lorsque tous les concurrents sont immobiles, le starter tire un coup de pistolet ou déclenche l'appareil de départ. Les concurrents ne doivent pas toucher le sol avec leurs mains lors du départ: ils partent debout, à la différence des courses de vitesse.

### **La course**

Dans les courses de demi-fond, les concurrents ne peuvent bénéficier d'une aide extérieure. Des personnes ne prenant pas part à l'épreuve peuvent participer à la course et mener l'allure au bénéfice d'un ou plusieurs coureurs. De même, un coureur ayant un tour de retard et s'apprêtant à être doublé ne peut devenir le « lièvre » des concurrents en tête de l'épreuve. Les temps intermédiaires ou les temps d'arrivée officiels des gagnants peuvent être annoncés et/ou affichés. Ils ne peuvent être communiqués aux concurrents par une personne située à l'intérieur de la piste (coureur avant abandonne, autre compétiteur, entraîneur officiel...) sans accord préalable du juge-arbitre. Tout coureur qui bouscule un concurrent, lui coupe la route

## **3-5- Niveau 1: du débutant au débrouillé**

### **Les caractéristiques du débutant en compétition (UNSS ou club)**

Le coureur de la catégorie minime ou cadet qui débute le demi-fond à l'entraînement et en compétition<sup>57</sup> s'entraîne deux à trois fois par semaine. A l'entraînement, il est spontané et dynamique, mais ne connaît pas les allures, il a une technique de course parfois aléatoire par manque de coordination et de force (maintien), et ne sait pas gérer sa pratique (échauffement, récupération). Il a du mal à tenir une séance complète, notamment dans le secteur de la VMA ou dans le travail spécifique, par manque d'expérience dans le secteur aérobie. En compétition,

il éprouve des difficultés à courir en pelo-ton, à reproduire et à intégrer une allure spécifique, ce qui se traduit le plus souvent par un départ rapide suivi d'un ralentissement pour finir plus vite, s'il le peut encore. Ainsi, sur 800 et 1000 mètres, le différentiel de temps entre les deux moitiés de la course est important; sur 1500 mètres et 3000 mètres, le premier tiers de la course est rapide, puis l'allure chute fortement avant d'augmenter de nouveau en fin de parcours.

MAAA Les objectifs Améliorer les capacités fonctionnelles sur le plan aéro-bie, en privilégiant le couple puissance aérobie/VMA.

### **3-5-1- La modélisation des courses :**

Sur le plan bioénergétique, le programme des courses athlétiques offre le panel d'efforts continus le plus étendu. Des distances les plus courtes, proposées en salle, aux courses sur route, les efforts athlétiques traversent toutes les filières bioénergétiques en paliers successifs. La gamme d'efforts s'étend de la puissance anaérobie alactique du sprint en salle (50 et 60 mètres) à la capacité aérobie du marathon, voire de la course des 100 kilo-mètres, hors du programme olympique. Puisqu'il s'agit d'efforts continus, à chaque distance correspond un temps d'effort situant le niveau de performance de chacun. Sur le plan biomécanique, les exigences d'efficacité de la foulée semblent décroître avec l'allongement de la distance. Autrement dit, plus l'effort est court, plus la technique de course doit être aboutie. Cet ajustement n'est que relatif et n'occulte en rien les principes d'efficacité du coureur de fond capable d'aller plus loin et plus vite dans sa filière aérobie, grâce au rendement supérieur de sa foulée. Les courses obstacles, quant à elles, exacerbent les principes d'efficacité de la foulée requis sur une distance identique mais plate, par des exigences techniques et des contraintes biomécaniques liées à l'obstacle. Du sprint court aux 100 et 110 mètres haies, du sprint long au 400 mètres haies, et du demi-fond au 3000 mètres steeple, tel un pic sismique, la courbe linéaire de la motricité de course sur le plat doit répondre aux habiletés techniques liées aux franchissements d'obstacles. Quant aux courses de relais, elles ajoutent une dimension motrice particulière, puisqu'avec elles l'athlétisme renonce à son statut de sport individuel: aménagée et emboîtée, la performance des relayeurs rend compte d'une sociomotricité.

### **3-5-2- La situation de course :**

#### **Des ressources transversales**

En EPS, la question de la richesse éducative d'une activité physique et sportive, voire de son intérêt culturel, est implicitement posée lors du choix du programme. Il revient à l'éducateur d'apporter la dimension de son choix à l'APS (ludique, compétitive, esthétique, sociale,

énergétique...), pour l'essentiel, la pratique des courses est fondée sur la motricité dans l'effort. D'une part, elle peut générer des transformations de comportement spécifiques (départ en sprint, franchissement de haies, technique de passage en relais, tactique de course), d'autre part, elle est à l'origine de nombreux savoir-faire transférables dans d'autres APS: explosivité du démarrage, enchaînement de bonds dans la course, rythme inter-obstacles, gestion des allures de course et des intensités d'effort, conduite des efforts en équilibre respiratoire. Autant d'actions et de sous-tâches athlétiques que bien des sports collectifs et certains sports de raquettes intègrent dans leurs principes d'efficacité.

### **3-5-3- Les paramètres d'une situation**

L'athlétisme offre des situations d'apprentissage et d'entraînement d'une grande plasticité, ouvertes aux aménagements et sollicitant des ressources différenciées. A l'instar des variables didactiques en sports collectifs, le caractère modulable d'une situation de course ne se limite pas au noyau dur des paramètres bioénergétiques. Pour mieux calibrer un effort de course et son potentiel interactif, on peut combiner les éléments biomécaniques, bio-informationnels et psychomoteurs.

#### **Les paramètres bioénergétiques :**

Les paramètres bioénergétiques influencent directement la conduite et/ou la répétition de l'effort. En dehors du cadre d'une épreuve de course en compétition où l'effort est produit isolément, l'entraînement suppose que l'effort est compris dans une suite (précédé ou suivi d'un autre). Ainsi, chaque effort relève de paramètres interdépendants et le temps de récupération entre deux efforts ou entre deux séries d'efforts est essentiel pour qualifier l'objectif et l'impact bioénergétique de la séance de course.

#### **Les paramètres biomécaniques :**

En athlétisme, les paramètres biomécaniques concernent le lestage et le délestage, lesquels impliquent une force musculaire plus ou moins grande et facilitent plus ou moins l'organisation du coureur dans son effort. Premier élément de lestage, la course en côte augmente l'effort de poussée et le pourcentage de pente joue comme un coefficient du niveau d'effort. A l'inverse, la course en descente est un support de survitesse et de vélocité de la foulée, ce qui réclame en amont un bon niveau de préparation physique et de technique. D'autres aménagements et d'autres matériels concourent à traiter cette dimension biomécanique: -disposer des parcours de lattes ou de cônes au sol, telle une échelle de pas, soit pour imposer à l'athlète une certaine

amplitude, soit pour solliciter la fréquence de ses foulées selon l'écart choisi; -faire courir l'athlète avec un gilet lesté, notamment au démarrage; il alternera sprint lesté et sprint délesté afin de profiter du contraste de charge; faire courir l'athlète par vent défavorable, mais surtout favorable, pour lui offrir une opportunité de survitesse sur le plat; freiner l'athlète à l'aide d'un harnais ou d'un parachute: cela vise à améliorer les poussées au démarrage ou la solidité des appuis en course lancée; -tirer l'athlète avec un élastique (le « speedy »), pour atteindre sa vitesse maximale sur une plus courte distance (il est alors en survitesse). En sprint, les spécificités de la course en ligne droite et de la course en virage s'opposent, les contraintes biomécaniques de cette dernière pénalisant les plus rapides et les grands gabarits. Du couloir 1 au couloir 8, la Contrainte va décroissant. Et les contraintes techniques des positions de départ sont les suivantes: plus le sprinter se rapproche du sol, plus il augmente le nombre d'appuis dans la position de départ, plus les contraintes biomécaniques sont importantes (debout jambes légèrement fléchies et décalées, jambes fléchies épaules vers avant, en trépied, à quatre pattes). En revanche, les contraintes biomécaniques servent le projet de mise en action car elles utilisent le poids de corps comme force de déséquilibre vers l'avant. En course de haies, la hauteur des obstacles et leurs intervalles déterminent le niveau de contrainte: plus les haies sont hautes et les intervalles courts, plus l'organisation des foulées d'approche et du franchissement est difficile. Ainsi, sur le plan biomécanique, le 110 mètres haies est plus contraignant que le 400 mètres haies, nonobstant la spécificité du franchissement des haies en virage dans cette épreuve.

### **Les paramètres bio-informationnels :**

Les paramètres bio-informationnels d'une situation sont les signaux et indicateurs à prendre en compte et les informations à traiter. Tantôt ces éléments aident l'athlète à soutenir l'effort (ils le guident dans son allure), tantôt ils le contraignent (il lui faut répondre aux signaux par des démarrages séquences ou des relances d'allure). Certains paramètres bio-informationnels peuvent interagir avec d'autres facteurs:

- des zones d'allures variables, croissantes ou alternativement intenses et modérées;
- un balisage de la course avec des lattes incitant à travailler plutôt en fréquence ou plutôt en amplitude;
- un repérage au sol pour calibrer la mise en action du hurdler;

- un rythme et une forme pour le franchissement des obstacles, en deux, quatre ou six appuis (et plus sur les haies basses), en demi-franchissement<sup>9</sup> avec la jambe d'attaque ou la jambe d'impulsion, etc.

- l'attention portée à la cadence des appuis au sol, la tonalité de l'impact d'une impulsion, la durée des temps de suspension (haies). Concernant ces paramètres, lors du feedback, l'enseignant privilégiera l'auto-évaluation du coureur: annonce des temps de passage et du temps à l'arrivée; bip ou coup de sifflet scandant l'allure prédéfinie; critère de réussite au regard d'un programme de répartition des foulées pour les hurdlers, etc.

### **Le paramètre psychomoteur :**

Le paramètre psychomoteur joue sur la motricité que le coureur transforme sans aménagement matériel, par la seule assimilation d'une consigne ou l'interprétation d'une intention. Par exemple: augmenter la cadence des foulées, relâcher ses épaules pour être plus disponible en course, mobiliser davantage ses segments libres (soulever les épaules à l'impulsion, tirer haut et loin le genou libre), se pencher dans la mise en action, se grandir en course, basculer ses épaules au-dessus de l'obstacle, composer une séquence de pas de course variés sur une ligne droite, etc. La dimension psychomotrice d'une situation

### **Les caractéristiques des phénomènes bioénergétiques :**

#### **Des processus chimiques de production d'énergie au rendement mécanique**

En amont des phénomènes mécaniques de la course de pied se déroulent des processus chimiques au cœur de l'appareil neuromusculaire. Or, la physiologie de la contraction musculaire, nécessaire à la réalisation d'un exercice ou d'un travail physique, est à la fois d'une grande complexité et d'un faible rendement mécanique. En effet, pour mouvoir et agencer les leviers osseux lors d'une activité physique, l'organisme se montre plutôt gourmand en énergie: en course à pied, à peine 30 % de l'énergie dépensée est utilisée mécaniquement pour se déplacer, les 70 % restants sont évacués sous forme de chaleur par la sueur et la respiration. Au commencement du processus, lors d'une activité volontaire, la commande motrice envoie un influx nerveux, phénomène électrique qui parcourt les nerfs moteurs (motoneurones Alpha). Arrivé à la jonction neuro-musculaire (ou plaque motrice), cet influx provoque la libération d'acétylcholine (médiateur chimique des nerfs, stocké dans leurs extrémités) qui déclenche les phénomènes chimiques nécessaires à la production d'énergie. A ce stade, le rôle du système nerveux est terminé et les processus chimiques se déroulent de

façon autonome au niveau de chaque fibre musculaire pour obtenir sa contraction et ses effets mécaniques sur le squelette humain. La seule énergie utilisable par le muscle pour se contracter provient de la désagregation de l'adénosine triphosphate (ATP)<sup>10</sup>, emmagasinée dans les cellules musculaires. La contraction des muscles dits squelettiques (ils assurent le travail mécanique) est le résultat d'un raccourcissement par glissement des nombreuses myofibrilles constituant les courcissement, reproduit de multiples fois, engendrent des fibres musculaires. Cette contraction du muscle, à hauteur de l'engagement commandé par l'axe nerveux. Ce processus élémentaire nécessite à chaque fois l'énergie libérée par la désagrégation des molécules d'ATP.

#### **4-Décomposition séquentielle de la foulée :**

##### **4-1- Les paramètres cinétiques de la foulée Temps de course**

le pied est successivement en avant, en dessous et finalement en arrière du bassin pour le propulser vers la foulée suivante. L'appui se scinde donc en deux périodes: -la réception, qui va de l'entrée en contact avec le sol jusqu'au passage du bassin à la verticale de l'appui. C'est la phase de freinage de la foulée, puisque le coureur doit amortir la chute de son centre de gravité en fin de suspension, puis soutenir cette charge jusqu'à la période suivante -la poussée, qui va du moment où le bassin est à la verticale de l'appui à la perte de contact du pied avec le sol. C'est la phase propulsive par excellence puisque le bassin est catapulté vers l'avant sur une trajectoire en suspension. La suspension relie le quitté d'un pied au posé de l'autre pied par une trajectoire dont la portée correspond à la longueur de la foulée (amplitude)<sup>65</sup>, L'oscillation de la jambe libre, quant à elle, couvre deux foulées du quitté au posé du pied (quand le pied quitte le sol, il faut deux foulées, et non une, pour qu'il le retrouve). Cela corrobore le fait qu'un cycle entier de course comprend deux foulées. On distingue deux périodes: -l'oscillation de retour, depuis le quitté d'un pied jusqu'au posé de l'autre. C'est le trajet que la jambe parcourt en arrière du bassin, avec une flexion marquée du genou par laquelle le pied monte jusqu'à la fesse. Cette action diminue le moment d'inertie du membre inférieur accélérant ainsi son oscillation vers l'avant. La fin de cette période est délimitée par le passage de la hanche à la verticale du pied d'appui, ou par le croisement des genoux sous le bassin. Ces repères permettent de comparer et d'évaluer plus finement les différentes techniques de course; -l'oscillation de préparation à l'appui va du moment où le genou libre est à la verticale du pied jusqu'au posé suivant. C'est la partie antérieure du trajet de la jambe libre. Chez le sprinter, la cuisse s'élève presque à l'hor-

zontale pour pointer le genou vers l'avant, lequel s'étend alors pour allonger le membre inférieur avant le contact au sol.

#### **4-2- Les paramètres de la foulée de course :**

##### **4-2-1- Le rapport amplitude/fréquence**

L'amplitude et la fréquence sont les paramètres cinétiques de la foulée. En effet, la vitesse de déplacement du coureur est égale au produit de deux valeurs, celle de la longueur de ses foulées (l'amplitude, mesurée en mètres) et celle du nombre de foulées par unité de temps (la fréquence par seconde mesurée en hertz). Si ton connaît le nombre de foulées effectuées sur une distance dans un temps donné, on peut calculer les valeurs moyennes d'amplitude et de fréquence des foulées, en plus de la vitesse moyenne. Ainsi, une sprinteuse qui court le 100 mètres en 12 secondes et en 52 foulées a une vitesse moyenne (distance/temps) de 8,33 mètres par seconde ( $100/12$ ), son amplitude moyenne (distance/foulées) est de 1,92 mètre ( $100/52$ ) et sa fréquence moyenne (foulées/temps) est de 4,33 foulées par seconde ( $52/12$ ). L'amélioration de la vitesse de course passe donc par l'augmentation de l'amplitude ou de la fréquence. Dans la pratique, c'est en optimisant le rapport amplitude/fréquence que l'athlète améliore sa vitesse de course puisque, dans un premier temps, le gain en amplitude diminue la fréquence des foulées. L'entraînement (renforcement musculaire, technique de course) vise à produire une plus grande amplitude tout en conservant ou en améliorant la fréquence initiale. Le rapport amplitude/fréquence est propre à chaque athlète, il mêle ressources musculaires, caractéristiques morphologiques et technique de course en un cocktail unique. De plus, il varie selon le contexte bioénergétique de l'épreuve, puisque le coureur s'organise au regard de la distance et/ou du temps d'effort à couvrir. Il n'utilise donc pas le même rapport amplitude/fréquence, ni la même foulée pour deux allures de course distinctes.

##### **4-2-3- Temps de contact et temps de suspension**

En course à pied, plus la vitesse de déplacement est importante, plus le temps de contact des appuis au sol est bref. Un sprinter junior expert (10"52 aux 100 mètres) peut atteindre une vitesse lancée de 10,90 mètres par seconde (39,24 kilomètres/heure) avec un temps de contact

de 9 centièmes de seconde, alors qu'un joggeur à une allure de 3 mètres par seconde (10,8 kilomètre-heure) reste au sol 27 centièmes de seconde par appui, trois fois plus longtemps. Dans cet exemple, l'amplitude, la fréquence des foulées et le temps de suspension entre deux appuis ne sont pas comparables car la vitesse rend ces facteurs interdépendants. C'est surtout la durée relative de la phase de suspension qui s'accroît avec la vitesse du coureur.

#### **4-2-4- Une analyse descriptive de la foulée**

Une appréhension mécanique externe de la course à pied fait correspondre des actions musculaires à chacune des phases ou périodes de l'appui: une action d'amortissement dès l'entrée en contact avec le sol, qui voit le pied s'aplatir et le genou se fléchir; une action de soutien, censée éviter une descente plus importante du bassin au cours de son passage à la verticale de l'appui; enfin, une action de poussée lorsque le bassin balaie la fin du secteur d'impulsion et que le membre inférieur en appui semble se déployer consécutivement à la contraction des muscles extenseurs. Cette façon d'analyser la foulée est contemporaine des pistes d'athlétisme en cendrée (années 1960), relativement meubles, qui n'offraient pas les qualités élastiques des pistes synthétiques actuelles. Ces observations rendent alors davantage compte de la foulée du coureur de demi-fond que de celle du sprinter. Certains prônent néanmoins à l'époque « qu'un bon sprinter ne court pas sur les pointes de pied, mais en posant ses pieds à plat pour les dérouler au Cours de la foulée», et poussent leur raisonnement à l'extrême en écrivant que pour courir vite (devant accélérer le déplacement du bassin plus longtemps), il faut courir le plus bas possible et monter les genoux le plus haut possible »<sup>72</sup>. Les images tournées et visionnées au ralenti, grâce aux premières caméras à haute vitesse, fascinent, favorisant une interprétation au premier degré des phénomènes observés. Ainsi, l'écrasement du pied lorsque le bassin est à la verticale de l'appui est interprété comme un soutien post-amortissement. De même, on croit alors que les muscles extenseurs subissent une contraction concentrique volontaire en fin d'appui.

#### **4-2-5 Une analyse fonctionnelle de la foulée**

Plus moderne, l'approche fonctionnelle de la foulée prend en compte l'enchaînement complet des contractions musculaires avant, pendant et après l'appui. Elle intègre la notion de travail en pliométrie de la chaîne des extenseurs pour produire une impulsion à chaque appui. Avant

appui, la chaîne des muscles extenseurs du membre inférieur est mise en tension par une contraction concentrique. Une fois le pied au sol, cette mise en tension permet l'étirement des éléments contractiles et conjonctifs lors de la résistance excentrique à l'écrasement, moment où le poids du corps passe à la verticale de l'appui. La restitution d'énergie de la chaîne d'extension pour catapulter le bassin est de nature élastique et réflexe (on parle de réflexe myotatique (contraction en réponse à l'étirement)). Le coureur doit donc avoir une très bonne coordination intra-musculaire et intermusculaire de cette chaîne pour optimiser le rendement des muscles, ainsi qu'une organisation segmentaire qui anticipe la pose du pied. Les structures de l'appareil locomoteur sont tendues comme une lame de ressort avant le contact au sol, elles sont prêtes à renvoyer le coureur comme une balle de ping-pong, en produisant le maximum de puissance d'impulsion de façon à ce que le temps de contact soit le plus bref possible. Ce phénomène croît proportionnellement avec la vitesse de l'athlète. Au contraire du skieur de fond en style classique qui pousse d'un ski sur l'autre, le coureur à pied rebondit d'un appui sur l'autre. L'analyse fonctionnelle fait évoluer la représentation de la foulée d'un schéma mécanique à un- sions successives. Dans le cycle de mise en tension/étirement/renvoi de la pliométrie, il faut considérer le travail musculaire de la chaîne d'impulsion comme un système.

#### **4-3- Le renforcement musculaire :**

En athlétisme, le renforcement musculaire est au cœur de la préparation physique. Cependant, des épreuves de sprint aux courses de demi-fond en passant par les courses de haies, les plus exigeantes en la matière, les contraintes biomécaniques sur la dimension structurelle de l'athlète ne sont pas égales. Pour répondre à ces contraintes, la logique préventive accompagne l'objectif de développement de la force musculaire, dont la pliométrie (force élastique des appuis) est la dimension finale.

Les groupes et chaînes musculaires impliqués dans la course à pied Lorsqu'on rebondit sur le sol, pour se déplacer le plus horizontalement possible, il faut renforcer en priorité la chaîne des muscles extenseurs (dits antigravitaires). Les muscles de la sangle abdominale, eux, impliqués dans le gainage de la liaison tronc/bassin, assurent la transmission des forces d'impulsion. Enfin, les membres supérieurs permettent au coureur de se propulser et de s'équilibrer.

## 5- Analyse vidéo :

### 5-1- Définition de la vidéo :

L'analyse vidéo peut être quantitative et/ou qualitative, selon l'objectif de l'étude. L'analyse qualitative consiste en l'observation de l'enregistrement vidéo pour déterminer quel geste technique peut être amélioré (prévention du risque de blessure ou amélioration des performances). Il s'agit d'une analyse subjective qui ne nécessite pas un positionnement particulier de la caméra ou un équipement complexe. L'analyse quantitative consiste à déterminer les variables cinématiques du mouvement à partir de l'enregistrement vidéo: positions, vitesses et accélérations linéaires des extrémités des segments du corps et positions, vitesses et accélérations angulaires des segments du corps (voir Chapitre A). Comme dans l'analyse qualitative, ces informations seront étudiées en vue d'améliorer un geste technique pour prévenir le risque de blessure ou améliorer les performances. Les analyses quantitative et qualitative sont souvent combinées : de nombreux programmes informatiques permettent d'afficher plusieurs vidéos sur le même écran pour pouvoir les comparer et avoir une vision globale du mouvement. Les variables cinématiques obtenues par analyse quantitative peuvent également être utilisées pour calculer la position du centre de gravité du corps (voir Chapitre C4), l'énergie et le travail des segments du corps (voir Chapitre D) et les forces et les moments de force s'exerçant sur les articulations. L'analyse quantitative nécessite un positionnement particulier de la (ou des) caméra. L'enregistrement vidéo est ensuite numérisé pour déterminer les coordonnées horizontales et verticales des repères anatomiques (généralement les extrémités des segments du corps). Ces coordonnées numériques seront d'abord lissées pour corriger les erreurs de recueil de données, puis remises à l'échelle (2D) ou reconstruites (3D) pour obtenir les positions réelles des segments. Les coordonnées sont souvent combinées avec le temps pour déterminer les vitesses et les accélérations. L'analyse quantitative peut être bidimensionnelle (pour les mouvements dans un plan, tels la course ou le cyclisme) ou tridimensionnelle (pour les mouvements dans plusieurs plans comme le lancer de poids).

### 5-2-Systèmes vidéo :

formats et réglage des caméras Le système vidéo PAL (Phase Alternating Line) est utilisé en Europe. Chaque image vidéo comporte 625 lignes horizontales, ce qui correspond à la résolution verticale du système, mais seules 576 lignes sont utilisables pour l'enregistrement. Au cours de l'enregistrement d'une image, la caméra enregistre d'abord les lignes impaires (1, 3, 5) de haut en bas et de gauche à droite, puis les lignes paires (2, 4, 6) 0,02 seconde plus tard. Chaque ensemble de lignes (paires ou impaires) constitue un champ vidéo et deux champs vidéo (séparés de 0,02 s) constituent une image. Durant la lecture de la vidéo, les champs vidéo sont projetés à une fréquence de 50 Hz (C'est-à-dire 50 champs vidéo par seconde); chaque champ vidéo est projeté pendant 0,02 s, ce qui correspond à la résolution temporelle du système. Le système NTSC (National Television System Committee), utilisé aux Etats-Unis, a une plus faible résolution verticale (525 lignes) mais un plus grand nombre de champs par seconde (60 Hz). Certaines caméras à haute vitesse peuvent enregistrer plus de 1000 images par seconde. Ces caméras sont particulièrement utiles pour enregistrer les détails des mouvements rapides. La résolution horizontale, indépendante du système vidéo, correspond au nombre de points (ou pixels) de chaque ligne horizontale. Le format VHS a une résolution de 240 pixels, ce qui est insuffisant pour l'analyse quantitative du mouvement ; les formats SVHS (résolution de 400 pixels) et DV (Digital Vidéo, résolution de 500 pixels) offrent des résolutions suffisantes pour l'analyse quantitative. L'obturateur électronique rapide d'une caméra est un dispositif permettant d'éviter les images floues lors de l'enregistrement d'un corps en mouvement. L'obturateur s'ouvre tous les  $1/120$ ,  $1/250$ ,  $1/500$  ou  $1/1000$  de seconde, de manière à laisser passer la lumière pendant une courte durée (0,008, 0,004, 0,002 ou 0,001 seconde respectivement). Un mouvement rapide, tel le swing d'un club de golf, nécessite un réglage de l'obturateur sur  $1/1000^*$  s, alors que pour un mouvement plus lent, telle la marche, un réglage sur  $1/250^*$  s est suffisant. L'image est d'autant plus sombre que la vitesse de l'obturateur est rapide car moins de lumière pénètre dans la caméra. Ce n'est généralement pas un problème en extérieur, mais en intérieur, il faudra des sources lumineuses puissantes (spots) pour compenser la vitesse rapide de l'obturateur et obtenir une image suffisamment claire. ne faut pas confondre la vitesse de l'obturateur avec la résolution temporelle. L'analyse quantitative nécessite également une mise au point manuelle. La plupart des caméras sont réglées par défaut sur une mise au point automatique, dans laquelle l'objectif se met au point sur l'objet le plus proche qui n'est pas l'objet étudié. La mise au point manuelle s'effectue de la façon suivante : positionnement de la caméra, zoom sur le sujet d'étude jusqu'à ce qu'il remplit l'image, rotation de la bague de mise au point jusqu'à ce que le

sujet soit net et zoom arrière jusqu'à la taille d'image souhaitée. Ainsi, le sujet restera net tant qu'il se déplacera dans le même plan de mouvement. Les réglages de l'obturateur et de la mise au point sont les plus importants mais d'autres facteurs, tel le niveau de blanc ou l'utilisation de filtres, interviennent dans la qualité de l'image .

### **5-3- Procédures d'enregistrement vidéo**

Les formats vidéo et les réglages de caméra sont les mêmes en analyse 2D qu'en 3D. En analyse 2D, une seule caméra suffit pour enregistrer le mouvement. À condition que le plan de mouvement coïncide avec le plan caméra (c'est-à-dire à  $90^\circ$  de l'axe optique de la caméra). En analyse 3D, deux caméras ou plus permettent d'enregistrer un mouvement se produisant dans plusieurs plans. Analyse 2D La caméra doit être placée aussi loin que possible du plan de mouvement pour réduire les erreurs de perspective. Le zoom permettra ensuite d'obtenir la taille d'image souhaitée. Celle-ci ne doit être ni trop grande pour ne pas rater une partie du mouvement, ni trop petite pour numériser correctement le sujet d'étude. Les erreurs de perspective surviennent quand des objets ou des parties de l'objet sont trop proches de l'objectif: les objets proches de l'objectif apparaissent plus gros que les objets éloignés. Pour mettre ce phénomène en évidence, fermez votre œil non-dominant, inclinez votre main en dirigeant le pouce vers vous et regardez-la avec votre œil dominant: en approchant votre main de votre œil, le pouce apparaît progressivement plus long que l'auriculaire alors que tous deux ont à peu près la même longueur. Les erreurs de perspective tendent à raccourcir les segments du corps quand ils se déplacent en dehors du plan de mouvement, ce qui se produit inévitablement en motricité humaine (les mouvements ne sont jamais strictement monoplanaires). Les erreurs de perspective ont également tendance à modifier les angles entre les segments les angles apparaissent plus obtus quand ils se situent en dehors du plan de mouvement. Ces erreurs de perspective peuvent altérer la précision de l'analyse 2D. L'axe optique (ligne imaginaire passant par le milieu de l'objectif) doit être orienté à  $90^\circ$  du plan de mouvement étudié. Si le plan de mouvement est vertical (course par exemple), la caméra peut être orientée à l'aide d'un niveau à bulle d'air placé sur la caméra parallèlement puis perpendiculairement à l'axe optique. Ceci n'est possible que si le dessus de la caméra est horizontal et régulier. Dans le cas contraire, on peut mesurer la hauteur de la caméra et placer un repère à la même hauteur dans le plan de mouvement. On zoome ensuite sur le repère en orientant la caméra de manière à ce qu'il soit au centre de l'image: l'axe optique est alors parallèle au sol. On peut également utiliser un triangle 3-4-5 pour s'assurer que l'axe optique est perpendiculaire au plan de mouvement dans le plan horizontal. Des repères d'échelles

horizontaux (règle d'1 m) et verticaux(fil à plomb) doivent être placés dans le plan de mouvement et apparaître sur la vcd

#### **5-4-Numérisation :**

A. Dans le système PAL, les images enregistrées et stockées sur ordinateur se composent chacune de 768 pixels horizontaux multipliés par 576 pixels vert. La numérisation consiste à placer une grille imaginaire sur ces images. La grille comporte autant de cases que le nombre de pixels de l'image et à chaque case associées des coordonnées x et y. La première case en bas à gauche a pour coordonnées 0,0 . On déplace alors le curseur de la souris pour cliquer sur les repères anatomiques du corps (généralement les extrémités des segments), ce qui enregistre leurs coordonnées numériques x et y. On numérise généralement 18 repères anatomiques dans le cas d'une étude cinématique du corps entier. Les repères sont reliés entre eux pour obtenir une représentation du corps en fil de fer. Le nombre de coordonnées x et y que comporte la grille correspond à la résolution du système de numérisation, c'est-à-dire la plus petite variation de position que le système puisse détecter. Les systèmes de numérisation avec une résolution de 768x576 fournissent des coordonnées moins précises que les systèmes utilisés en cinéma. Les programmes informatiques modernes utilisent une grille plus fine pour améliorer la résolution: plusieurs cases sont associées à chaque pixel de l'image, ce qui améliore la précision des coordonnées numériques des repères anatomiques

#### **5-5-Référence**

Abdel-Aziz Y.I. et Karara H.M. (1971). Direct Linear Transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close range photogrammetry. In: ASP Symposium on Close Range Photogrammetry American Society Photogrammetry,

## **CHAPITER03 :LA COORDINATION INTERSEGMENTAIRE**

### *Introduction*

La locomotion humaine se caractérise par deux comportements bien distincts, la marche et la course. Comme la plupart des habiletés motrices, ils résultent de la mobilisation organisée des segments corporels. Cette organisation locomotrice a pour but de maintenir l'équilibre et de produire suffisamment de forces pour se déplacer. Si le très grand nombre de degrés de liberté impliqués au niveau du système neuro-musculo-squelettique contribue à la complexité de la tâche en offrant de nombreuses possibilités de réalisation, il offre aussi de nombreuses possibilités d'adaptation aux changements.

### **1-Coordination inter-segmentaire lors de la locomotion**

Comme nous l'avons plusieurs fois rappelé et utilisé, la phase relative ( $\Phi$ ), mesure de la coordination entre les segments en mouvement, est une variable collective fiable pouvant révéler et distinguer les différents patrons de coordination. Classiquement, deux patrons stables de coordination apparaissent spontanément : anti-phase caractérisé par une phase relative de  $180^\circ$  et en-phase caractérisé par une phase relative de  $0^\circ$ . Utilisée pour mesurer la coordination entre des segments au sein d'un même membre, considéré comme un sous-système de l'ensemble du système neuro-musculo-squelettique, elle est aussi une mesure valide de la coordination entre deux sous-ensembles corporels (comme les ceintures pelvienne et scapulaire), résumant de façon macroscopique le comportement collectif de leurs composantes respectives. Cette coordination entre les ceintures pelvienne et scapulaire peut être le reflet de la coordination entre les unités « locomotrice » et « passagère » décrite par Perry et Burnfield (2010).<sup>2</sup> Le rôle des bras lors de la locomotion humaine

La coordination entre les ceintures lors de la locomotion relève aussi du mouvement spécifique des bras et des jambes. Le balancement alterné en anti-phase du membre supérieur et du membre inférieur d'un même côté a été l'objet de nombreuses études (Wagenaar & van Emmerik, 2000; Webb, Tuttle, & Baksh, 1994). Deux forces motrices interagissent pour mobiliser les bras : la gravité et les muscles de l'épaule et du coude. Fernandez-Ballesteros et coll. (1965), dans une étude considérée maintenant comme classique, ont montré une activité des muscles fléchisseurs, extenseurs et abducteurs de l'épaule lors de la marche. Afin de vérifier si cette activation musculaire était initiée pour mobiliser le bras ou consécutive au mouvement pendulaire du bras, ils ont effectué une mesure alors que le bras était immobilisé le long du tronc. Ils ont ainsi relevé une activité électrique dans les muscles Latissimus Dorsi, Teres Major et dans la partie postérieure du muscle Deltoïde correspondant, dans sa forme d'activation, au pattern d'activation de la marche normale. Cette activité était en lien avec le cycle de marche observé (Figure n°46) et semble militer pour une mobilisation

active des bras lors de la marche. Figure n°46 : Pattern d'activité électrique des muscles de l'épaule et du bras lors de la marche avec les bras bloqués contre le tronc (gauche) et lors de la marche normale (droite) (Fernandez-Ballesteros et coll., 1965) Plus récemment, des travaux ont abordé le mouvement des bras à la marche comme étant le résultat de forces dynamiques passives agissant sur le balancement des bras. S'interrogeant sur l'importance du rôle des bras dans la locomotion bipédique et sur le coût énergétique de leur balancement, ces auteurs ont utilisé un modèle passif (Figure n°47) pour montrer que ce balancement ne nécessitait pas d'effort et était consécutif à l'activité des membres inférieurs (Collins, Adamczyk, & Kuo, 2009). La présence d'une faible activité musculaire, lors d'enregistrement EMG des muscles de l'épaule, ne s'expliquerait que pour initier le balancement et l'entretenir (Pontzer, Holloway, Raichlen, & Lieberman, 2009). Elle participerait aussi au contrôle de ce mouvement pendulaire (Gutnik, Mackie, Hudson, & Standen, 2005). Si on ne peut nier le lien cinétique entre l'activité des membres inférieurs et l'oscillation des membres supérieurs, l'utilisation du modèle de Collins reste dans le plan Sagittal et fait abstraction des interactions possibles entre les ceintures. D'autre part, cette conception oppose un sous-système « actif », les membres inférieurs, à un sous-système passif, le haut du corps, dont le bras. Sans présager de la cause de son balancement, le contre-balancement du bras contribue à annuler le moment de rotation induit par le mouvement des membres inférieurs autour de l'axe vertical du corps lors de la marche (Herr & Popovic, 2008; Li, W.Wang, Crompton, & Gunther, 2001) et de la course (Hinrichs, 1987). Les effets inertiels du balancement des bras sur les mouvements du corps contribuent en fait à stabiliser le patron de marche (Pontzer, et al., 2009). Umberger (2008) décrit avec précision les effets de ce balancement sur la cinématique, la cinétique et l'énergétique de la marche : si les variables cinématiques et cinétiques dans le plan sagittal semblent être identiques avec ou sans balancement des bras, il existe de grandes différences dans le plan horizontal. Quoiqu'il en soit, cet auteur déclare que le coût métabolique de la marche, prédit à partir de données purement biomécaniques, excède ce qui est effectivement enregistré lors de la marche normale et abonde ainsi dans la cause inertielle du mouvement des bras à la marche. Cependant, au-delà des causes sous-jacentes au balancement des bras lors de la marche, la phase relative entre la ceinture pelvienne et la ceinture scapulaire constitue un indicateur fiable et pertinent de leur coordination.

## 2- Moyenne de la phase relative

la moyenne et l'écart type de  $\Phi$  ainsi que la moyenne de l'écart type pour chaque sujet. Une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs (2 Bras  $\times$  2 Vitesse) a donné des résultats correspondants à ceux trouvés par la distribution fréquentielle : ils ont montré un effet Bras significatif ( $F(1,7) = 535.95$ ;  $p < 0.05$ ) et une interaction ( $F(1,7) = 9.60$ ;  $p < 0.05$ ). Néanmoins, l'effet Vitesse n'est pas confirmé ( $F(1,7) = 0.487$ ;  $p > 0.51$ ). Un traitement ANOVA séparé entre les groupes unimodaux et bimodaux confirme les résultats ci-dessus avec un effet Bras et sans effet Vitesse. L'absence d'effet significatif de la Vitesse peut être dû au fait que la moyenne de la valeur de  $\Phi$  amoindrit les différences entre les conditions contrairement à la valeur du mode ou de la médiane dans la distribution fréquentielle ( ). De façon notable, la phase relative produite par un seul individu est assez variable comme l'indique la moyenne élevée de l'écart type reportée dans la dernière colonne du quelle que soit la condition. Quoiqu'il en soit, bien que la course n'induit pas de décalage significatif de la phase relative moyenne vers les valeurs typiques proches de  $0^\circ$  et de  $180^\circ$ , le plus important est la confirmation que la mobilisation des bras induit un changement significatif de la moyenne de la phase relative d'un patron en anti-phase vers un patron en en-phase.

## 3- Discussion

La coordination typique en anti-phase entre les ceintures pelvienne et scapulaire lors de la locomotion se réalise par des rotations dans des directions opposées de ces ceintures. Chez l'enfant, ce patron émerge après quelques semaines d'expérience de la marche dans sa forme « mature » et devient plus flexible et dynamiquement efficient (Freedland & Bertenthal, 1994). Ce patron est réalisé plus spontanément alors que le patron en-phase, traduisant des rotations des ceintures dans la même direction, se produit dans de rares occasions : vitesse de marche très lente, pathologies ou situations particulières (Huang, et al., 2010; Van Emmerick, et al., 1999; Wagenaar & Beek, 1992; Wu, et al., 2004). L'objectif de notre travail était de déterminer la persistance des patrons de coordination entre les ceintures pelvienne et scapulaire et leur évolution lorsque des contraintes fortes étaient apportées, contraintes liées au balancement ou non des bras et au mode de locomotion, marche ou course, induisant des vitesses fort différentes. Globalement, ces résultats soutiennent le fait que la phase relative entre les mouvements des ceintures pelvienne et scapulaire dans le plan transversal est une variable collective pertinente pour décrire les allures locomotrices et mettre en évidence les effets des contraintes agissant sur elles. Ainsi, la locomotion peut être conceptualisée en termes de coordination entre des composants oscillatoires comme c'est déjà le cas pour la plupart des

mouvements périodiques qu'ils soient biologiques ou non. Si l'on s'intéresse au balancement des bras, l'absence de participation des bras à la locomotion entraîne un usage systématique d'un patron de coordination en-phase pour les deux vitesses (marche et course) alors que le patron habituel est le patron en anti-phase. Si l'on s'intéresse aux effets de la vitesse, le passage de la marche à la course rend les deux patrons davantage canoniques, c'est-à-dire qu'il réduit la différence (respectivement de  $30^\circ$  et de  $60^\circ$ ) avec la valeur théorique de stabilité de ces patrons (respectivement  $0^\circ$  ou  $180^\circ$ ) pour chaque condition Bras. De plus, lors de la course, la distribution fréquentielle de la phase relative devient davantage symétrique autour de la valeur modale. Ainsi, l'effet Bras semble déterminer la typologie du patron de coordination adopté (en-phase vs. anti-phase) alors que l'effet Vitesse agit sur la valeur moyenne et sur la symétrie de la variation autour de cette valeur. Dans la situation présentant le plus de contraintes, c'est-à-dire la course sans balancement des bras qui combine ainsi les deux effets de façon globalement additionnée, le mode et la variabilité de la phase relative reflètent l'adoption d'un patron en-phase qui est plus restreint ou plus fort que dans les autres conditions. Selon une vue Bernsteinienne de la coordination (cf. Introduction), ces résultats peuvent évoquer un gel des degrés de liberté, une réponse appropriée aux difficultés rencontrées dans la gestion de tous les aspects du mouvement en cours dans une condition rigoureuse et inhabituelle.

#### **4- Stabilité – flexibilité**

La réalisation d'une tâche motrice fait appel à la coordination de différents effecteurs. Cependant, un même geste n'est pas réalisé dans les mêmes circonstances, ce qui demande une adaptabilité importante et peut nécessiter de faire appel à des solutions motrices différentes. Si la variabilité d'une variable peut être perçue comme du bruit, appliquée à la coordination motrice, elle devient signe d'adaptabilité. Le patron de coordination réalisé s'adapte en permanence. La variabilité peut être perçue comme l'expression de l'adaptabilité de la dynamique sous jacente pour maintenir un même patron. Mise en évidence en particulier par l'utilisation de la théorie des patrons dynamiques dans le domaine de la pathologie (Wagenaar & van Emmerick, 1994, 1996), la variabilité suggère alors une meilleure adaptabilité aux circonstances de la tâche.

#### **5- La locomotion, entre stabilité et flexibilité.**

Comme évoqué au début de ce chapitre introductif, la locomotion est une caractéristique importante de l'Homme et touche à sa relation avec son environnement. Elle implique l'ensemble des segments corporels. Le très grand nombre de degrés de liberté impliqués dans

la réalisation de la locomotion, et du mouvement en général, pose un problème réel de gestion et de contrôle. Bernstein suggère l'existence d'unités fonctionnelles qui facilitent ce contrôle (Bernstein, 1937/1967) et qui se coordonnent selon des principes évoqués par von Holst (1973). Issue des théories et concepts de la synergétique, l'approche dynamique des patrons de coordination permet d'aborder de façon originale l'étude et l'analyse du mouvement. Deux aspects principaux de cette approche retiennent particulièrement notre attention. Tout d'abord, le corps humain peut être considéré comme un système ouvert, composé d'éléments interagissant, soumis à des contraintes externes ; dans ces conditions, rien ne s'oppose à l'émergence du comportement moteur (Haken, 1977; Kelso, 1995; Kugler, et al., 1980). D'autre part, abordant ce comportement à un niveau de moindre complexité par rapport au niveau des effecteurs, l'approche dynamique des patrons de coordination permet de quantifier la coordination au travers d'une variable d'ordre résumant ce comportement.

### **5.1 Unité fonctionnelle « passagère » - unité fonctionnelle « locomotrice »**

Perry et Burnfield (2010), décrivant le patron de marche, rappellent que le corps humain peut être divisé en deux unités fonctionnelles. Alors que chacune d'elles contribue conjointement à la locomotion, leur rôle respectif est bien distinct. L'unité fonctionnelle « passagère », composée de l'ensemble Tête, Tronc, Bras, représente environ 70% de la masse corporelle située à la partie supérieure du corps (Winter, 2005). L'étude de l'activité musculaire de cette unité met en évidence son rôle essentiel dans le maintien des alignements vertébraux et dans l'absorption des modifications posturales liées au mouvement (Perry & Burnfield, 2010). L'unité fonctionnelle « locomotrice », pour sa part, est composée des membres inférieurs et du bassin et contribue de façon directe au déplacement par sa liaison avec le support.

### **5.2 Unités fonctionnelles ou sous systèmes du corps en mouvement**

Reprenant les concepts proposés par l'approche dynamique des patrons de coordination, on peut assimiler les unités fonctionnelles décrites plus haut comme des systèmes. En leur sein, les différentes composantes interagissent, couplent leurs actions, s'auto-organisent et produisent ainsi un comportement moteur coordonné sous l'effet de contraintes environnementales. Il est alors possible d'étudier chacun de ces systèmes comme un système auto-organisé soumis à des contraintes et dont le comportement, à un niveau macroscopique, peut être résumé à l'aide d'une variable d'ordre, comme il est possible d'étudier comment ces deux systèmes se coordonnent pour donner un comportement stable comme la marche ou la course.

### 5.3 L'unité fonctionnelle « locomotrice » en tant que système auto-organisé

Appréhendée en tant que système auto-organisé, l'unité fonctionnelle « locomotrice » organise ses différentes composantes de telle sorte qu'elles produisent le mouvement par couplage entre ces différents éléments. Comme nous l'avons vu précédemment, on connaît leurs modes d'interaction à différents niveaux, articulaire, musculaire, etc. Dans une perspective d'auto-organisation, ce système est soumis à des contraintes environnementales, en particulier la pesanteur, que ce soit par la masse corporelle située au-dessus ou la réaction du sol consécutive aux forces exercées. Il est aussi soumis à des contraintes liées aux structures elles-mêmes et qui affectent directement l'interaction entre les composantes du système. Enfin, il est soumis à des contraintes liées à la tâche proprement dite : rester debout et progresser. En effet, maintenir une posture érigée, lutter contre les effets de la gravité et progresser spatialement par transmission de forces au sol/venant du sol nécessitent une rigidité du membre inférieur mise en avant en termes biomécaniques (Butler, Crowell III, & McClay Davis, 2003; Davis & DeLuca, 1996; Edwards, 2007). Nous postulons que le comportement coordinatif émergent est ainsi contraint par ce contexte et se caractérise par une stabilité importante, c'est-à-dire une faible amplitude de variation dans la valeur du paramètre d'ordre. Dans une première partie de ce travail, nous appréhenderons l'unité fonctionnelle « locomotrice » en tant que système auto-organisé soumis à ces différentes contraintes et nous envisagerons la coordination interarticulaire émergente de l'interaction entre les différentes articulations. Après avoir évoqué un travail antérieur sur l'effet d'une orthèse plantaire sur le patron d'activation musculaire et sur la coordination entre la cheville et le genou, nous aborderons les conséquences de l'expertise dans une tâche locomotrice (course par des athlètes et par des non athlètes) sur la coordination entre les articulations des membres inférieurs et les conséquences d'antécédents traumatiques de la cheville sur la coordination entre la cheville et le genou lors d'un saut unipodal.

### 5.4 Unité fonctionnelle « passagère » - unité fonctionnelle « locomotrice » en tant

que sous systèmes interagissant Kelso rappelle que « le couplage dans les systèmes biologiques doit refléter les contraintes fonctionnelles et pas simplement mécaniques, si le comportement doit être adaptable et réussi » (Kelso, 1995, p. 70, notre traduction). L'adaptabilité, ici de la locomotion, se distingue de l'invariance du mouvement. Bernstein (1967, p. 48), devant la variabilité de mouvement du membre supérieur d'un forgeron tapant avec son marteau, l'analyse comme étant dû à l'adaptabilité du mouvement (Figure n°30). Cependant, si la variabilité est caractéristique de l'adaptabilité, l'inverse est aussi vrai. Peu de variabilité implique une adaptabilité moindre (Newell & Slifkin, 1998). Les situations usuelles apportent

des changements nombreux à l'environnement dans lequel on évolue. Le maintien d'un même patron malgré ces changements plaide pour une flexibilité dans la coordination des différents éléments concernés, dans leur organisation. Or, dans le contexte de la locomotion, comme nous le verrons dans la première partie expérimentale, la variabilité au sein de l'unité fonctionnelle « locomotrice » en tant que système auto-organisé, est faible. Les modifications observées, même si elles sont significatives, n'indiquent pas de transitions brutales de patrons de coordination mais davantage des décalages de valeurs des attracteurs. Aussi, nous envisagerons la coordination entre l'unité fonctionnelle « locomotrice » et l'unité fonctionnelle « passagère » comme étant la variable d'adaptation entre le corps, l'environnement et la tâche. A cet effet, dans la seconde partie de ce travail, nous étudierons cette relation entre l'unité fonctionnelle « passagère » et l'unité fonctionnelle « locomotrice » ou, en termes dynamiques, entre deux sous-systèmes du système neuro-musculo-squelettique. La flexibilité de coordination observée entre ces deux sous-systèmes apparaît alors comme étant le signe d'une adaptabilité aux contraintes environnementales alors que le comportement du sous-système « locomoteur » seul demeure d'une grande stabilité.

### **5.5 Principes sous-jacents à la coordination et contraintes topographique et**

#### **Musculaire**

Afin de mener à bien la tâche locomotrice, l'individu doit en premier lieu lutter contre la gravité avant d'envisager de se déplacer. Les groupes musculaires agonistes et antagonistes agissent en ce sens autour des différentes articulations des membres inférieurs. Les descriptions habituelles de la marche et de la course décrivent des mouvements relatifs des bras et de jambes en opposition de phase (Ayyappa, 1997; Elftman, 1939, 1951) soutenues par des descriptions physiologiques faisant état de liaisons, en particulier neurologiques (Baldissera, Cavallari, & Leocani, 1998; Dietz, 2002; Dietz, Fouad, & Bastiaanse, 2001). De même, des principes sous-jacents aux coordinations inter-segmentaires ont été mis en évidence, en particulier la tendance à solliciter des groupes musculaires homologues lors de coordination entre deux segments d'une même ceinture (homologie musculaire) ou de coordonner plus facilement des segments se déplaçant dans la même direction (isodirectionnalité), notamment les segments de deux ceintures différentes (Park, Collins, & Turvey, 2001; Swinnen, Jardin, Meulenbroek, Dounskaia, & Hofkens-Van Den Brandt, 1997). Nos travaux, que nous présenterons dans la seconde partie de ce document, ont mis en évidence une grande flexibilité de la coordination entre les ceintures scapulaires et pelviennes par des modifications de contraintes. Dans une troisième partie, nous aborderons la coordination entre les segments corporels et son évolution

en fonction de la position initiale des segments. Ces changements topographiques ont pour but de solliciter différemment les composantes du système étudié. En effet, alors que les travaux ayant conduit à la formalisation des principes sous-jacents aux coordinations intersegmentaires ont sollicité prioritairement un groupe musculaire relativement à son antagoniste, nous avons comparé cette situation à une situation où la position des segments sollicite de façon équivalente les groupes musculaires agonistes et antagonistes. La sensibilité aux contraintes externes étant différente en fonction de l'exposition topographique offerte, nous mettrons en évidence une grande flexibilité de coordination entre les segments corporels et l'effet de la position initiale d'un segment corporel par rapport à un autre dans l'établissement d'une coordination.

### **6- Application aux membres inférieurs**

Rappelant que le patron de coordination émergent dépend des contraintes auxquelles le système est soumis, qu'elles soient externes (comme la surface de marche par exemple) ou internes (comme une pathologie neuromusculaire par exemple), Haddad et coll. (2006) se sont intéressés à la coordination interarticulaire au sein du membre inférieur lors de la marche. Utilisant des charges pour modifier l'inertie de différents segments des membres inférieurs, ces auteurs ont montré une tendance à l'invariance de la phase relative, permettant de mesurer la coordination interarticulaire. Si ces résultats confirment des travaux précédents (Whitall & Caldwell, 1992), ils s'opposent aux travaux de Byrne et coll. (2002). En étudiant les effets de l'âge et d'une perturbation d'inertie de la marche par ajout d'une masse, ces derniers montrent une différence significative de la valeur absolue de la phase relative continue entre la jambe et la cuisse ainsi qu'une variabilité augmentée liée à l'âge. Si les différences exprimées par ces différents travaux semblent significatives, elles n'en expriment pas moins des similitudes. En effet, alors que le patron de coordination reste identique dans toutes les situations - il n'existe pas de transition entre l'en-phase et l'anti-phase par exemple -, la différence significative de la valeur absolue de l'attracteur indique des modifications de surface du patron existant avec décalage de la valeur de l'attracteur. Ce phénomène peut être considéré comme le signe de la dynamique sous-jacente s'adaptant aux contraintes subies.

## **7- Effets de l'apprentissage sur la coordination interarticulaire des membres inférieurs durant la course**

La première étape de notre étude sur la coordination entre les segments des membres inférieurs s'est faite au travers d'une étude sur les effets de l'expertise sur le patron de course.

### **7.1 Le geste sportif en tant que geste appris**

La pratique sportive fait appel à des mouvements spécifiques qui répondent à plusieurs buts et s'acquièrent suite à l'apprentissage et l'expérience. En premier lieu, ils permettent (ou approchent) la bonne réalisation de l'objectif fixé en termes de précision, de vitesse et/ou de force. Ils doivent aussi être réalisés dans un contexte énergétique favorable, c'est-à-dire en permettant la réussite de la tâche avec coût énergétique minimal (Brisswalter & Hausswirth, 2003), en particulier dans le cas de mouvements cycliques comme la course (Kiröläinen, Belli, & Komi, 2001). Enfin, ils doivent respecter au mieux les contraintes musculoarticulaires du corps en mouvement, telles que définies par la biomécanique, au risque de provoquer des pathologies consécutives à leur mauvaise réalisation (Hamill, et al., 1999). Dans de nombreuses situations sportives, les mouvements demandés requièrent des coordinations non présentes dans le répertoire. Ils nécessitent un apprentissage, c'est-à-dire, en termes dynamiques, l'acquisition d'un nouveau patron de coordination (Zanone, 1999; Zanone & Kelso, 1992). Comme nous l'avons développé précédemment, Bernstein suggère que cette acquisition se fait en deux temps. Après une première phase de blocage, s'établit un relâchement progressif des degrés de liberté (Bernstein, 1937/1967). Cette acquisition donne lieu à une synergie qui traduit une nouvelle organisation entre les composantes et qui se stabilise avec la pratique. Un certain nombre de travaux ont illustré cette conception de l'apprentissage de nouveaux modes de coordination. Vereijken et collaborateurs (Vereijken, Whiting, & Beek, 1992) ont ainsi abordé la coordination entre l'ensemble des segments corporels dans une tâche s'apparentant au ski (Figure n°34). Sur un simulateur, il s'agissait d'effectuer des mouvements d'oscillation de grande amplitude et à une fréquence élevée. Les résultats montrent un relâchement progressif des degrés de liberté articulaires au cours de l'apprentissage. L'évolution de la coordination passe d'une situation « rigide » dans laquelle le couplage entre les différents segments corporels est fort à une situation plus « relâchée » où les segments agissent de façon plus ample et « indépendante », c'est-à-dire avec des décalages temporels plus importants. Figure n°34 : Expérience de Vereijken et coll. (1992) Temprado et collaborateurs (Temprado, Della-Grasta, Farrell, & Laurent, 1997) ont abordé la même question dans le cadre intra-segmentaire lors du service en volley-ball (Figure

n°35) en étudiant un groupe de débutants et un groupe d'experts. Si ces deux groupes se distinguent par des performances différentes, ils se distinguent aussi par le mode différent de coordination interarticulaire du membre supérieur utilisé. En effet, le patron de coordination des débutants est caractérisé par un couplage rigide entre les différentes articulations (épaule, coude, poignet) avec une relation « en phase », c'est-à-dire évoluant de façon spatio-temporelle dans le même sens. En revanche, le patron de coordination des experts se caractérise par une relation en « anti-phase » entre l'épaule et le poignet, significatif d'un relâchement dans le couplage entre ces articulations.

### **7-2 La course en tant que mouvement spécifique**

Contrairement au ski ou au service en volley-ball, la course peut être considérée comme l'expression d'une coordination spontanée, dans la mesure où elle ne nécessite aucun apprentissage particulier chez l'adulte (McCollum, Holroyd, & Castelfranco, 1995; Vaal, Van Soest, & Hopkins, 1995). Toutefois, cette coordination est mise à contribution dans de nombreuses tâches sportives, que ce soit de façon spécifique, comme en athlétisme, ou non spécifique, en complément d'une autre tâche comme dans un sport de balle (Aubert & Choffin, 2007; Bosch & Klomp, 2005). Comme nous l'avons évoqué plus haut pour deux tâches sportives, un patron de coordination particulier distingue l'expert du débutant. Hreljac et collaborateurs (2000), ont suggéré que les coureurs experts avaient un risque moindre de blessure par un mode de course atténuant les conséquences des impacts au sol. En effet, parmi les paramètres qui distinguent la marche de la course, on peut retenir la force d'impact au sol qui est majorée avec la vitesse de déplacement (Munro, Miller, & Fuglevand, 1987; Novacheck, 1998). L'intensité de cette force est une des causes majeures de pathologies chroniques en particulier par défaut de pré-positionnement adapté du membre inférieur ou de résistance musculaire active à l'impact (Hreljac, 2004). Ainsi, nous avons abordé la course au travers de deux aspects peu étudiés. D'une part, nous l'avons abordée au travers de la synergie interarticulaire nécessaire à sa bonne réalisation (De Leo, Dierks, Ferber, & Davis, 2004). Dans une étude précédente, l'analyse de la cinématique de la course et de la marche chez des coureurs expérimentés avait montré une invariance de la durée relative des phases du cycle de Philippon, ainsi que des relations entre les segments d'un même membre (Shapiro, et al., 1981). D'autre part, puisque la course peut être aussi le fruit d'un apprentissage, nous nous sommes intéressés aux effets de la pratique spécifique sur les patrons locomoteurs.

### **7-3 Etude de la locomotion au travers de la coordination interarticulaire**

L'application à la locomotion des outils de la Théorie des Patrons Dynamiques (Kelso, 1995) offre des moyens intéressants d'appréhender la complexité du comportement moteur coordonné au travers de variables simples, détachées de tout lien spécifique avec les composantes anthropométriques ou biomécaniques notamment (Kelso & Jeka, 1992; Scholz & Kelso, 1989; Schöner & Kelso, 1988). Comme nous l'avons déjà développé, ces principes assimilent l'appareil locomoteur à un système d'oscillateurs couplés, dont la dynamique sous-tend la coordination qui existe entre les segments mobilisés. Une appréciation de cette coordination est la synchronisation entre les oscillateurs qui peut être mesurée par la phase relative entre les segments en mouvement. La variabilité de la phase relative traduit la stabilité du patron (Van Emmerik, Wagenaar, & Van Wegen, 1998). Elle renseigne sur la capacité du système neuromusculaire à maintenir un état stable de coordination, c'est-à-dire un même patron de coordination (Kelso, 1995). En particulier, la variabilité augmente de façon significative à l'approche de la vitesse de transition entre la marche et la course avant de revenir à des valeurs de variabilité moindre lorsque le nouveau patron de coordination est instauré (Diedrich et al., 1995). Dans les mouvements cycliques, cette stabilité se manifeste plus clairement autour de points d'ancrage, c'est-à-dire de moments particuliers du cycle lors desquels la synchronisation est plus marquée (Byblow, Carson, & Goodman, 1994). L'objet de cette étude a été d'envisager l'hypothèse de Bernstein dans le cadre de la course, alors qu'elle a été pratiquée de manière spécifique ou non lors de la pratique de sports différents. Utilisant les outils offerts par la Théorie des Patrons Dynamiques, notamment la mesure de la phase relative continue, nous avons comparé les patrons de coordination, tout particulièrement en termes de synchronisation dans la course d'athlètes et de non athlètes. Ces résultats ont été mis en regard d'une analyse des données cinématiques obtenues.

### **7-4 Matériel et méthode**

#### **7-4.1 Sujets**

Douze sujets, étudiants en éducation physique, ont accepté de participer à l'expérimentation ( $22.6 \pm 2.2$  ans,  $181.3 \pm 4.7$  cm,  $75.8 \pm 9.9$  kg). Ils étaient tous sportifs, pratiquants assidus d'une discipline sportive (plus de trois entraînements par semaine). Cinq d'entre eux pratiquaient l'athlétisme (course de demi-fond) depuis plusieurs années (groupe expert). Les sept autres pratiquaient un sport collectif impliquant des courses (groupe non-expert). Les sujets

ont été informés des buts de l'expérience et ont donné leur accord écrit à participer à cette étude, acceptée par le comité d'éthique de l'université.

#### 7-4.2 Protocole

Les sujets ont commencé par s'échauffer et à s'adapter à la course sur tapis roulant à différentes vitesses choisies par leur soin (Wall & Charteris, 1980). Il leur a ensuite été demandé de courir à 3 m.s<sup>-1</sup> pendant une minute

#### 7-4.3 Traitement des données

Les coordonnées 3D de marqueurs réfléchissant placés sur les repères corporels selon le Plugin-Gait Marker Placement ont été enregistrées à 100 Hz à l'aide de 6 caméras du système d'analyse du mouvement Vicon (Oxford Metrics Ltd., Oxford, England). L'enregistrement a été effectué à partir de la 30<sup>ème</sup> seconde de course. Les données ont été filtrées à l'aide d'un filtre passe-bas (6 Hz) et ont été traitées par un logiciel spécifique. Deux foulées successives ont été traitées pour chaque sujet. La durée de chaque foulée a été déterminée entre deux contacts au sol du même pied. Le rapport entre temps d'appui et durée totale de la foulée a été calculé et ramené en pourcentage de la durée totale de la foulée. Pour chaque articulation (hanche, genou et cheville), l'angle articulaire a été calculé. La Phase Relative Continue,  $\Phi$ , a été calculée selon la méthode de la transformée de Hilbert (Pikovsky, et al., 2001). Elle est une mesure de synchronisation des segments en mouvement l'un par rapport à l'autre. Proche de 0°, elle indique une coordination en-phase de ces segments, c'est-à-dire un mouvement synchrone dans la même direction. Proche de  $\pm 180^\circ$ , elle indique une coordination en anti-phase, c'est-à-dire un mouvement des segments synchrone mais de direction opposée. D'une valeur située entre 0° et  $\pm 180^\circ$ , elle indique un décalage temporel entre les deux éléments considérés. De valeur positive, elle indique alors une avance temporelle du segment distal sur le segment proximal, et inversement. La valeur moyenne de chacune de ces données, l'amplitude articulaire ainsi que leur variabilité ont été calculées pour l'ensemble des sujets (Burgess-Limerick, Abernethy, & Neal, 1993; Clark & Phillips, 1993; Li, Van den Bogert, & Caldwell, 1999). L'étude a été effectuée de façon distincte pour le cycle complet de la foulée (du contact du pied au sol jusqu'au contact suivant de ce même pied) et pour chaque phase du cycle de Philippon (Philippon, 1905). Cette décomposition par phases a été simplifiée en périodes d'absorption et de génération d'énergie telles que proposées par Novacheck (1998). La première période d'absorption (phase E2 du cycle de Philippon) débute au contact du pied au sol et se termine au point d'inversion d'appui (angle de flexion maximum du genou lors de l'appui) (« A » sur

les figures). La seconde période d'absorption (phase E1 du cycle de Philippson) débute lorsque le genou a atteint son maximum de flexion lors de la phase oscillante (point d'inversion de la phase oscillante : « B ») et se termine lors du contact du pied au sol. La période de « génération » d'énergie (phases E3 et F du cycle de Philippson) débute au point d'inversion d'appui (A) et se termine au point d'inversion de la phase oscillante (B). Le traitement statistique a été effectué par une ANOVA à un facteur (expertise). Un seuil de significativité de 95% a été retenu.

## 7-5 Résultats

### 7-5.1 Paramètres de la foulée (Tableau n°1a)

La durée de la foulée n'est pas significativement différente entre les deux groupes. En revanche, le rapport entre le temps d'appui et la durée de la foulée est plus faible pour le groupe expert que pour le groupe non expert (38 % vs. 43.43 %) ( $F(1,10) = 5.90$  ;  $p < 0.05$ ). Ces valeurs sont comparables à celles habituellement citées dans la littérature (Novacheck, 1998).

### 7-5.2 Durée des différentes phases de la foulée selon le cycle de Philippson

#### simplifié

La comparaison des durées des différentes phases de la foulée (Tableau n°1d) montre un raccourcissement significatif de la 1ère phase d'absorption pour le groupe expert ( $F(1,10) = 5.24$  ;  $p < 0.05$ ). En revanche, la durée de la phase de génération et de la 2ème phase d'absorption ne présente pas de différence significative entre les deux groupes.

### 7.5.3 Evolution de la coordination inter-articulaire

#### 7.5.3.a. Coordination entre la cheville et le genou

Pour l'ensemble de la foulée, la différence de la valeur moyenne de la phase relative n'est pas significative entre les deux groupes ( $F(1,10) = 0.27$  ;  $p > 0.05$ ) (Tableau 1e). De même, la différence de variabilité de la phase relative entre les essais n'est pas significative ( $F(1,10) = 0.50$  ;  $p > 0.05$ ) (Tableau 1f). En revanche, lors de la 1ère phase d'absorption, la différence de la valeur moyenne de la phase relative est significative entre les deux groupes (groupe expert :  $\Phi = 14.21^\circ$ , groupe non expert :  $\Phi = -16.08^\circ$ ) ( $F(1,10) = 5.09$  ;  $p < 0.05$ ) (Figure n°1a). La valeur moyenne de la phase relative du groupe expert est positive ce qui indique une avance temporelle de l'articulation distale (la cheville) sur l'articulation proximale (le genou).

### 7.5.3.b. Coordination entre la cheville et la hanche

Pour l'ensemble de la foulée, la valeur moyenne de la phase relative entre la cheville et la hanche n'est pas significativement différente entre les deux groupes. De même, la différence de variabilité de la phase relative entre les essais entre les deux groupes (expert et non expert) pour l'ensemble de la foulée ou pour chacune des phases n'est pas significative. En revanche, lors de la phase de génération, la différence de la valeur moyenne de la phase relative est significative entre les deux groupes (groupe expert :  $\Phi = -8.85^\circ$ , groupe non expert :  $\Phi = -29.08^\circ$  ;  $F(1,10) = 9.33$  ;  $p < 0.05$ ) (Figure n°36a). Dans les deux cas, cette valeur est négative ce qui indique une avance temporelle de l'articulation proximale (le genou) sur l'articulation distale (la cheville) avec une synchronisation plus forte (davantage proche de  $0^\circ$ ) pour le groupe expert. L'observation du tracé des phases relatives entre la cheville et la hanche indique une transition de phase marquée en milieu de phase d'appui dans le groupe non expert avec inversion de l'avance temporelle entre la cheville et la hanche alors que le tracé de la phase relative dans le groupe expert indique une transition de phase régulière correspondant à la partie « appui » de la phase de génération pour atteindre une valeur proche de  $0^\circ$  lorsque le pied quitte le sol (Figure n°37b et figure n°38b).

### 7.5.3.c. Coordination entre le genou et la hanche

Pour l'ensemble de la foulée, la valeur moyenne de la phase relative n'est pas significativement différente entre les deux groupes ainsi que sa variabilité inter-essais (Tableau n°1e et Tableau 1f). En revanche, lors de la phase de génération, la valeur moyenne de la phase relative est significativement plus grande pour le groupe expert (groupe expert :  $\Phi = 49.81^\circ$ , groupe non expert :  $\Phi = 28.07^\circ$  ;  $F(1,10) = 5.05$  ;  $p < 0.05$ ) (Figure n°36a). L'analyse du tracé de la phase relative et de sa variabilité entre le genou et la hanche pour le groupe expert (Figure n°38c) indique une brusque transition de phase au début de la période de génération avec inversion de l'avance temporelle entre le genou et la hanche. A la fin de la 2ème période d'absorption, on note une nouvelle transition de phase mais de direction opposée. En revanche, pour le groupe non expert, la transition de phase s'effectue plus régulièrement lors de la 1ère période d'absorption et au début de la période de génération (Figure n°37c). La variabilité inter-essais est grande pour le groupe expert au début de la période de génération, ce qui indique un relâchement plus important dans la synchronisation, et tend à diminuer. En revanche, pour le groupe non expert, la variabilité inter-essais reste faible lors de la période de génération, ce qui indique un couplage inter-articulaire plus fort, et grandit brusquement lors de la 2ème phase d'absorption.

### 7.5.3.d. Variabilité moyenne inter-essais de la phase relative par phases

La variabilité moyenne inter-essais de la phase relative par phases ne montre pas de différences significatives entre les deux groupes

### 7.5.4 Valeur angulaire moyenne des articulations du membre inférieur

Pour l'ensemble de la foulée (Tableau n°1b), les valeurs angulaires moyennes du genou et de la hanche sont significativement différentes entre les deux groupes avec le genou et la hanche davantage en flexion pour le groupe expert (respectivement  $31.53^\circ$  vs.  $23.31^\circ$  et  $27.75^\circ$  vs.  $6.95^\circ$ ) ( $F(1,10) = 5.31$  ;  $p < 0.05$ ) et ( $F(1,10) = 16.36$  ;  $p < 0.05$ ). Pour chacune des phases (Figure n°36c), les valeurs angulaires moyennes du genou et de la hanche sont significativement davantage en flexion pour le groupe expert (1ère phase d'absorption : respectivement  $33.23^\circ$  vs.  $23.57^\circ$  et  $39.45$  vs.  $21.50$ ,  $F(1,10) = 5.95$  ;  $p < 0.05$  et  $F(1,10) = 9.69$  ;  $p < 0.05$  ; phase de génération : respectivement  $35.11^\circ$  vs.  $25.28^\circ$  et  $13.89^\circ$  vs.  $-3.72^\circ$ ,  $F(1,10) = 5.73$  ;  $p < 0.05$  et  $F(1,10) = 12.57$  ;  $p < 0.05$  ; 2ème phase d'absorption : respectivement  $64.85^\circ$  vs.  $49.16^\circ$  et  $34.62^\circ$  vs.  $11.26^\circ$ ,  $F(1,10) = 9.74$  ;  $p < 0.05$  et  $F(1,10) = 14.04$  ;  $p < 0.05$ ). Que ce soit pour l'ensemble de la foulée ou pour chacune des phases, on ne note pas de différence significative de la valeur angulaire moyenne de la cheville entre les deux groupes. De même, la valeur moyenne de la variabilité entre les essais n'est pas significativement différente dans les deux cas.

### 7.5.5 Amplitude angulaire moyenne des articulations du membre inférieur

Pour l'ensemble de la foulée, on ne note pas de différence significative de l'amplitude angulaire moyenne de la cheville, du genou et de la hanche entre les deux groupes (Tableau n°1c). En revanche, l'amplitude angulaire moyenne du genou pour le groupe expert est significativement plus faible lors de la 1ère phase d'absorption (respectivement  $23.27^\circ$  vs.  $29.58^\circ$ ,  $F(1,10) = 7.51$  ;  $p < 0.05$ ) et significativement plus élevée lors de la phase de génération (respectivement  $44.40^\circ$  vs.  $27.43^\circ$ ,  $F(1,10) = 8.56$  ;  $p < 0.05$ ). L'amplitude angulaire moyenne de la cheville pour le groupe expert est significativement plus faible lors de la 2ème phase d'absorption (respectivement  $11.76^\circ$  vs.  $27.70^\circ$ ,  $F(1,10) = 5.65$  ;  $p < 0.05$ ) (Figure n°36b).

### 7.5.6 Evolution angulaire des articulations au cours de la foulée

Pour les deux groupes, si l'allure générale des différentes courbes traduit une cinématique sensiblement identique, on peut noter cependant quelques différences. Pour la cheville, lors de la 1ère phase d'absorption, caractérisée par un mouvement de flexion dorsale, la variabilité

inter-essais est plus faible au moment du contact au sol pour le groupe expert (Figure n°41a) et tend à augmenter jusqu'au début de la phase de génération. Pour le groupe non expert au contraire, elle tend à diminuer après 5% du cycle environ (Figure n°40a). Au cours de la phase de génération, la variabilité inter-essais est importante pour le groupe expert et tend à diminuer lors de la 2ème phase d'absorption. En revanche, elle reste faible pour le groupe non expert lors de la phase de génération et augmente de façon conséquente lors de la 2ème phase d'absorption. L'évolution angulaire du genou au cours de la foulée se déroule de façon parallèle entre les deux groupes, le groupe expert (Figure n°41b) étant significativement plus en flexion. Le corridor de variabilité inter-essais est plus étroit pour le groupe non expert (Figure n°40b). De même au niveau de la hanche, l'évolution angulaire au cours de la foulée se déroule de façon parallèle entre les deux groupes, le groupe expert étant significativement plus en flexion (Figure n°41c). Le corridor de variabilité inter-essais est sensiblement identique entre les deux groupes.

## **8. Variables dépendantes**

### **8.1. Fréquence effective**

La fréquence du mouvement effectif cycle à cycle (moyennée entre les deux segments) était calculée pour chaque essai puis transformée en score d'erreur. Ce score reflétait la différence entre la fréquence effective moyenne au cours d'un essai et la fréquence requise. Dans la mesure où cette variable rend compte de la capacité des sujets à suivre la fréquence imposée par le métronome quelles que soient les conditions, le seuil de significativité lors de l'analyse de cette variable était de  $p < 0.2$  pour éviter les erreurs de type II (Abdi, 1987).

### **8.2. Indices de stabilité de la coordination**

La phase relative entre les oscillations de chaque membre servait de mesure pour la précision et la stabilité des états des coordinations bi-segmentaires.

#### **8.2.1. Calculs de phase relative**

En fonction des tâches réalisées, différentes méthodes ont été utilisées pour calculer la phase relative : la phase relative discrète a été calculée en utilisant la méthode de l'estimation par points (par exemple, Zanone et Kelso, 1997), la phase relative continue par la méthode de l'arc tangent ou encore par celle des transformées de Hilbert (voir Hamill et al., 2000, pour une revue des techniques de calcul de phase relative). Le choix des méthodes de calcul de la phase relative au cours des différentes expériences était réalisé à partir des deux motivations suivantes : (1) un souci de formation et d'exploration des différentes méthodes utilisées pour calculer la phase

relative dans l'approche des patrons dynamiques de coordination, (2) la prise en compte de la cinématique des membres à partir desquels la phase relative était mesurée. Je ne reviendrai pas sur la première motivation qui découle davantage de critères académiques que de justifications scientifiques. En revanche, la deuxième motivation est méthodologiquement et conceptuellement fondamentale. En effet, les trois méthodes utilisées, bien que donnant des résultats identiques, ne permettent pas de comparer les données obtenues avec chacune d'entre elles. C'est à dire que les valeurs de précision ou de stabilité de la phase relative obtenues avec une méthode ne sont pas directement comparables à celles obtenues avec une autre méthode. En effet, la phase relative discrète permet de mesurer la phase relative entre n'importe quel type d'oscillateurs périodiques, indépendamment de la forme et des caractéristiques de leur cycle limite. Par contre cette méthode possède deux désavantages majeurs. Premièrement, cette méthode n'évalue la coordination qu'à un moment particulier du cycle de mouvement. De plus cette méthode limite le nombre d'observations car dans le cas d'une phase relative discrète calculée par cycle, le nombre de valeurs correspond au produit de la fréquence d'oscillation par la durée de l'essai (par exemple, à 1Hz pendant 15s, nous obtiendrons au mieux 15 valeurs de phase relative). Si l'on prend chaque point de rebroussement, le nombre de valeurs de phase relative est multiplié par deux (dans le cas de l'exemple précédent, nous obtiendrons au mieux 30 valeurs de phase relative). Les méthodes de calcul de phase relative continue présentent l'avantage d'obtenir un nombre d'observations égal au produit de la fréquence d'échantillonnage par la durée de l'essai (moins une valeur, due à la dérivée). Ainsi, pour reprendre l'exemple précédent, si la fréquence d'échantillonnage est de 100 Hz, nous obtiendrons au mieux environ 1500 valeurs de phase relative. La phase relative continue peut se calculer soit à l'aide de la méthode l'arc tangent, soit à l'aide de la méthode de la transformée de Hilbert. La méthode de l'arc tangent présente l'avantage d'être très précise au niveau temporel. En revanche, elle est très sensible aux modifications d'amplitude du mouvement et nécessite que les oscillateurs se comportent comme des oscillateurs quasiharmoniques. La méthode de la transformée de Hilbert présente quant à elle l'avantage de rester robuste face aux changements d'amplitude et de fréquence en cours d'essai. En revanche, l'exactitude des données que l'on obtient avec cette méthode dépend directement de la qualité des algorithmes utilisés pour extraire la partie imaginaire de la transformée de Hilbert. Cette méthode est très sensible au bruit des données brutes et nécessite un filtrage IIR (Infinite Impulse Response) plus important qu'avec les deux autres méthodes.

## 8.2.2. Détail du calcul de la phase relative

### 8.2.2.1. Méthode de l'estimation par point (phase relative discrète)

La phase relative discrète était obtenue par la méthode de l'estimation par point. Cette méthode est basée sur l'utilisation d'un algorithme de détection des pics ou des vallées des séries temporelles obtenues pour chaque membre. La détection des crêtes se fait par les repérages de passage à zéro de la dérivée de la série temporelle (vitesse nulle correspondant à un pic ou à une vallée). De plus, le signe de la dérivée de second ordre de la série temporelle renseigne sur la nature de la crête : pic ou vallée. En effet, si la valeur de la dérivée de second ordre lors d'un passage de la dérivée d'ordre un à zéro est négative, cela signifie que l'on a affaire à un pic alors que si cette valeur est positive, nous sommes en présence d'une vallée. A partir des moments d'apparition des pics et vallées de chaque série temporelle (une par membre), nous calculons la phase relative discrète à partir de la formule suivante :

. où  $t_1$  correspond à un point de rebroussement (pic ou vallée) du membre pris pour référence,  $t_2$  correspond à un point de rebroussement (pic ou vallée respectivement par rapport à la référence) du membre pris pour cible, et  $T$  correspond à la période entre deux points de rebroussement (pic à pic ou pic à vallée) du membre pris pour référence.

### 8.2.2.2. Méthode de l'arc tangent (phase relative continue)

Cette méthode est basée sur l'utilisation de l'arc tangent (défini de 0 à  $2\pi$ ) de l'angle de la phase issu du portrait de phase de chaque oscillateur. Le portrait de phase illustre la vitesse de déplacement du membre en fonction de sa position. Une fois que les angles de phase sont ainsi calculés pour chaque oscillateur, l'historique du temps est normalisé vers un nombre défini de points. La phase relative continue se calcule dès lors par la soustraction de l'angle de phase d'un membre par celui de l'autre membre pour chaque point de l'historique de temps normalisé. Nous obtenons donc les équations suivantes :  $\Phi_{référence}$  et  $\Phi_{cible}$  correspondent aux angles de phase normalisés, respectivement de la série temporelle du membre servant de référence et de celui servant de cible, à chaque instant du cycle de mouvement. Dans toutes nos expériences, la main droite était définie comme membre de référence pour le calcul de la phase relative.

### 8.2.2.3. Méthode de la transformée de Hilbert (phase relative continue)

La transformée de Hilbert est utilisée afin de réduire les effets dus à la normalisation des données, nécessaire dans la méthode de calcul de la phase relative par arc tangent. En effet, la méthode de l'arc tangent utilise la normalisation afin de contrôler les différences en amplitude et en vitesse du déplacement de chaque membre ainsi que les variations de fréquence d'oscillation de chaque membre (Hamill et al., 2000). La transformée de Hilbert décale chaque fréquence positive des séries temporelles de  $-\pi/2$  radians permettant ainsi d'obtenir un signal en quadrature du signal d'origine. Le signal résultant est une série de nombres complexes dont la partie réelle correspond au signal d'origine et dont la partie imaginaire correspond à la série d'origine mais décalée de  $-\pi/2$  radians (c'est-à-dire à la transformée rapide de Fourier inverse des fréquences positives correspondant aux angles décalés). Nous obtenons ainsi l'équation.

### 8.2.3. Nombre de transitions de phase et variabilité de la phase relative

La stabilité des patrons de coordination était calculée à l'aide du nombre de transitions de phase, du temps avant l'occurrence d'une transition et de la déviation standard de la phase relative pour les périodes précédant la transition. Afin d'identifier les transitions de phase (c'est-à-dire le changement abrupt d'un patron de coordination vers un autre), une interface graphique spécifique a été utilisée (Figure 39). Grâce à cette interface, l'expérimentateur était informé quand la valeur moyenne de la phase relative au cours de trois cycles consécutifs quittait l'intervalle de  $\pm 45^\circ$  (en général) autour de la phase relative requise. La position des curseurs était alors placée à la dernière valeur de phase relative comprise dans cet intervalle. Cette valeur permettait de définir les périodes précédant et suivant la transition, c'est-à-dire juste avant et juste après que la phase relative passe d'une valeur correspondant à un mode de coordination vers un autre plus stable. Cette procédure permettait donc de découper les essais en zones précédant et suivant la transition de phase (voir Carson et al., 1995 pour une méthode similaire). Figure 39 : Méthode de détermination de l'occurrence d'une transition de phase. Représentation illustrée de la méthode utilisée pour déterminer le début de la transition lors d'un essai représentatif (ici, le patron requis était non isodirectionnel et produit par la coactivation de groupes musculaires non homologues en condition de non vision à la fréquence d'oscillation de 2,5 Hz). La période suivant la période pré transition est représentée en fond gris. Les analyses n'étaient réalisées que sur les périodes pré transition. La ligne pleine représente la phase relative issue de l'estimation par points et la ligne en pointillés représente l'évolution de la moyenne de la phase relative lors de trois cycles consécutifs. Le début de la transition correspond au moment où la moyenne mobile des trois cycles sort du critère  $\pm 45^\circ$

représenté par les deux traits horizontaux (respectivement  $135^\circ$  et  $225^\circ$ ). Chaque participant réalisait un nombre prédéfini d'essais (8 en général) pour chacune des conditions. Ainsi, pour chaque sujet, dans chaque condition, la somme du nombre de transitions de phase était réalisée. Cette somme était alors transformée en pourcentage variant de 0% à 100%. Le pourcentage de transitions de phase était alors transformé en utilisant la transformation racine carrée de l'arc sinus de manière à assurer l'homogénéité de la variance et la normalité de la distribution de l'erreur (Abdi, 1987).

#### **8.2.4. Temps avant transition**

Le temps avant transition correspondait pour chaque essai au temps séparant le début de l'essai de la fin de la période avant transition. Pour les essais dans lesquels aucune transition n'était observée au cours de la période d'observation, le temps avant transition correspondait au temps total de l'essai (Monno, Chardenon, Temprado, Zanone et Laurent, 2000).

La variabilité des patrons de coordination était calculée à partir de la déviation standard de la phase relative.

#### **8.3. Indice de précision de la coordination**

L'erreur absolue de la phase relative était utilisée comme un indicateur de la précision des coordinations bimanuelles. L'erreur absolue correspondait à la valeur absolue de la différence entre la phase relative moyenne et la phase relative requise au cours de la période pré-transition.

### **9. Traitements statistiques**

Le temps avant transition, la déviation standard et l'erreur absolue de la phase relative étaient calculés pour les périodes précédant la transition. La normalité de la distribution des valeurs de l'erreur absolue de la phase relative et la variabilité correspondante était testée. Les essais ne satisfaisant pas le critère d'uniformité (testé à l'aide d'une loi normale avec un intervalle de confiance de 95% ; Abdi, 1987) et les essais dont les valeurs initiales de phase relative correspondaient à des valeurs de phase relative suivant une transition étaient exclus de l'analyse de variance. Les valeurs de phase relative étaient testées selon les méthodes de statistiques circulaires classiques (Mardia, 1972). Une analyse de variance (Anova) portant sur l'ensemble des facteurs expérimentaux avec mesures répétées était réalisée sur les valeurs transformées du pourcentage de transition de phase, sur le temps avant transition, sur la déviation standard et sur l'erreur absolue de la phase relative. Le seuil de significativité était de  $p < .05$  (Abdi, 1987).

Les décompositions post-hoc des interactions étaient réalisées à l'aide des moyennes issues du test de Newman-Keuls.

**DEUXIEME PARTIE :**  
**PARTIE PRATIQUE**

## **CHPITRE 01 : METHODOLOGIE DE LA RECHERCHE**

**1-Echantillon:**

L'échantillon était composé de 14 athlètes on divisé par deux type de course (5 athlète de sprinte ,9 athlète de demi fonde) (n=14)

Notre étude a comencé le début de Avril et s'est terminée la fin de Juin ,au niveau regional ,elle s'est pratiqué au stade de souk el tenine willaya de Bejaia, la date de filmé la video c'est le 8 Juin 2021

La categorie qui se pratiqué (U18) avec deux fiminin de sprinte et deux fiminin de demi fonde et trois masculin de sprinte et sept masculin de demi fonde

Neuf sujet (age = 18.0 +/- 3 ans / taille =176.0 +/-9 cm, masse corporelle =68.5 +/- 8.0 kg ) tous entraînés en athletisme ont participé a cette étude. Aucun d'entre eux de problème de santé ou signe de pathologie. Leurs principales caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant.

	M	SD
Age	18	3
Taille (cm)	176	9
Poids (kg)	68.5	8

**Tableau 01 :** Caractéristique de l'échantillon.

**2-Moyens et methodes :****2-1 Matriel :**

Une camera CANON a été etulisé pour la prise de video pendant les phase de course des sprinteurs et demi fondiste (figure 1 ). Cette camera était placée sur trépied. Perpendiculairement au sens de déplacement .a une distance d'environ 5 mètres selon la configuration du piste de course.

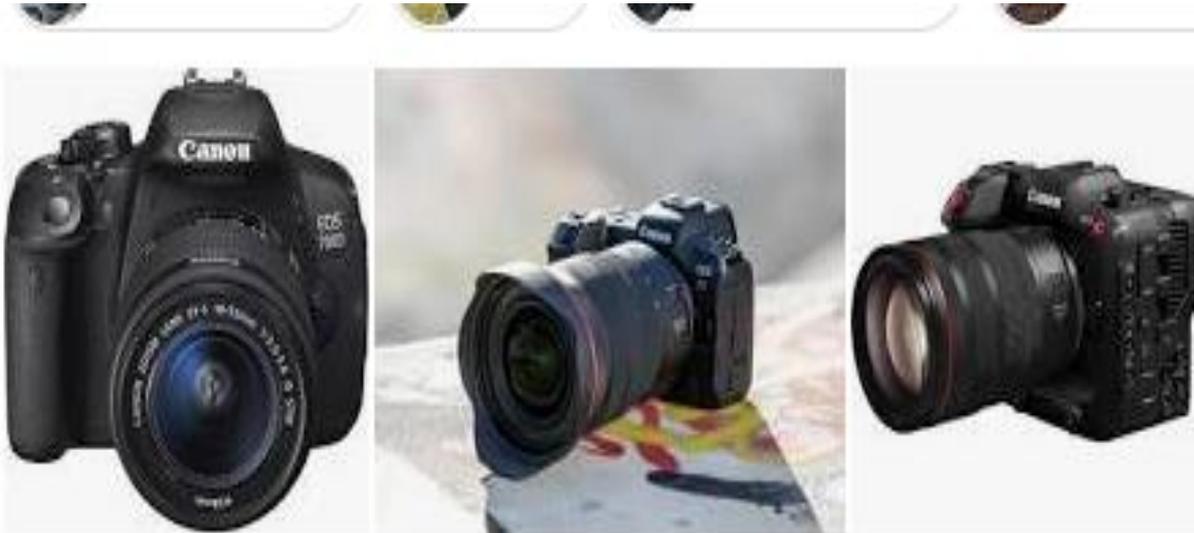
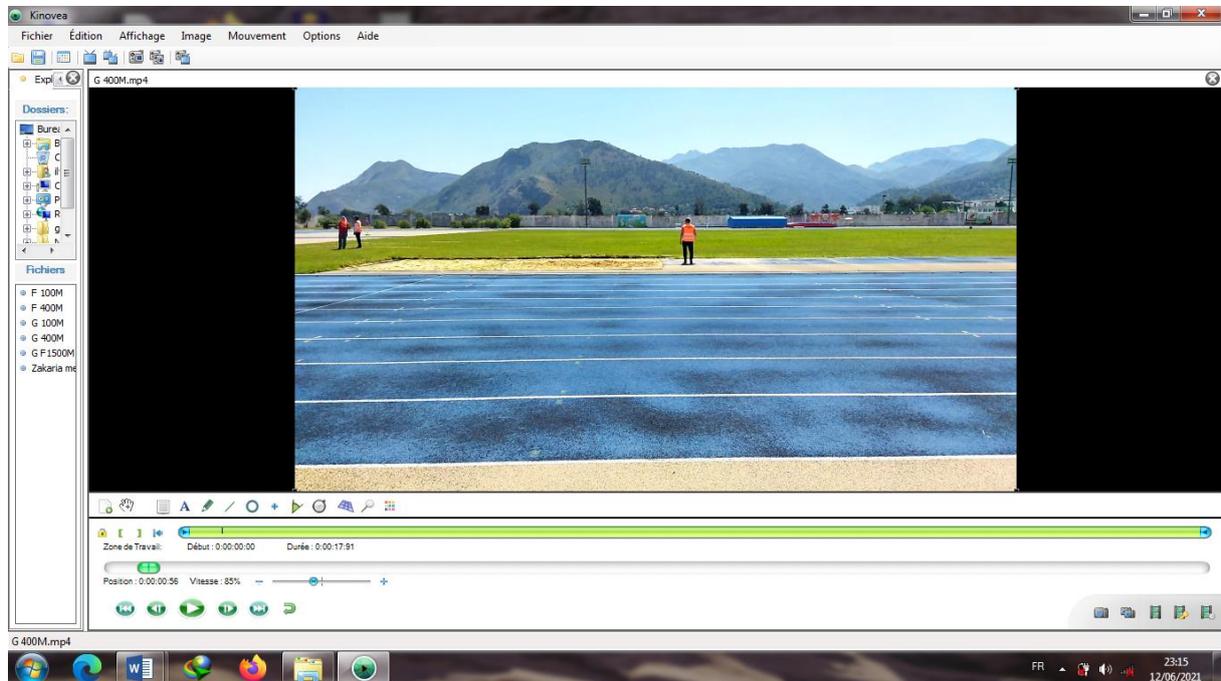


Figure 02 : Une camera CANON



**Figure 03 :** les pied de la camera CANON et leur position

Et aussi le programme KINOVEA nous aide pour donner les resultats.



**Figure 04 :** L'ogiciel Kenovea

Les données recueillies sont ensuite exportées sous format Excel pour le traitement

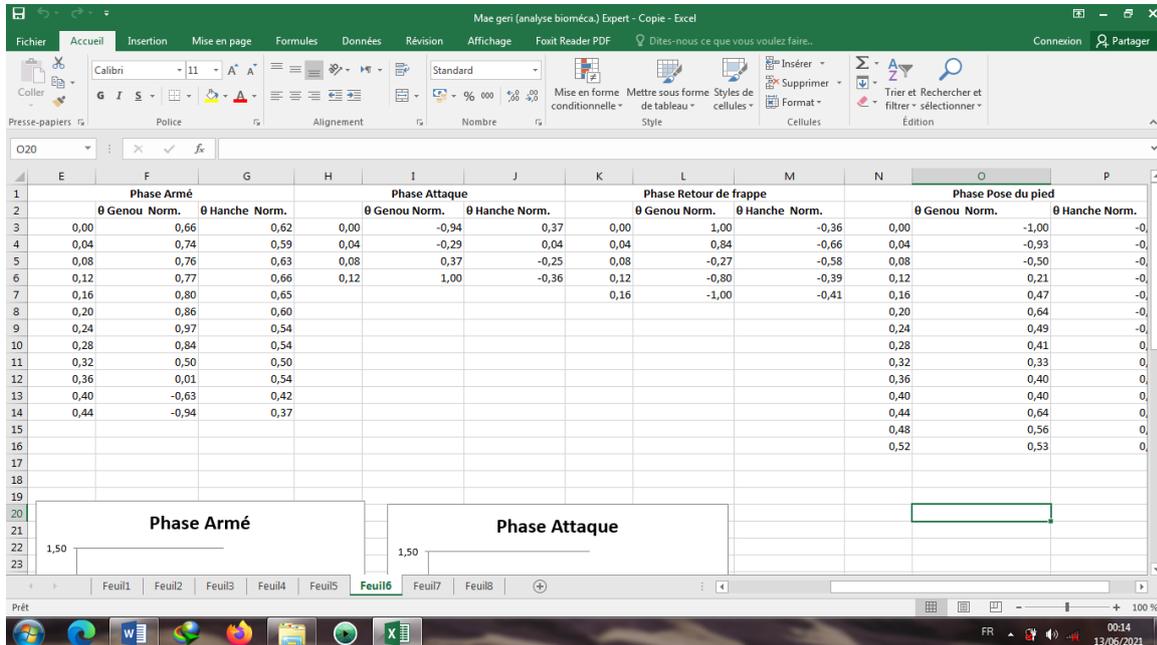


Figure 05 : format Excel

**2-2-METHODE :**

La methode que nous allons utiliser pendant cette expérimentation est expérimentale celle des phases relatives continues.

**3- PROCEDURE EXPERIMENTALE:**

Après avoir sélectionné les sujets de notre recherche, nous avons marqué les segments de la partie inférieure des deux cotées du corps de chaque sujet à l'aide de mini patches, afin de pouvoir repérer les angles segmentaires de genou et hanche pendant l'analyse cinématique.

Aussi, afin de pouvoir recueillir des données par rapport aux positions des angles segmentaires, des articulations, des vitesses angulaires, nous avons réalisé une analyse cinématographique. Pour cela nous avons filmé de côté avec une caméra posée sur un trépied qui permet de pouvoir garder un angle de vue stable.

Les sujets ont effectué 4 phase de course, un GS et un TS filmés du côté droit.

A travers le logiciel KINOVEA, nous avons pu obtenir des données. D'une part, visualisé le mouvement des sujets, et d'autre part enregistré les positions des segments, des articulations, et des angles segmentaires lors de la course (sprint et demi fond).

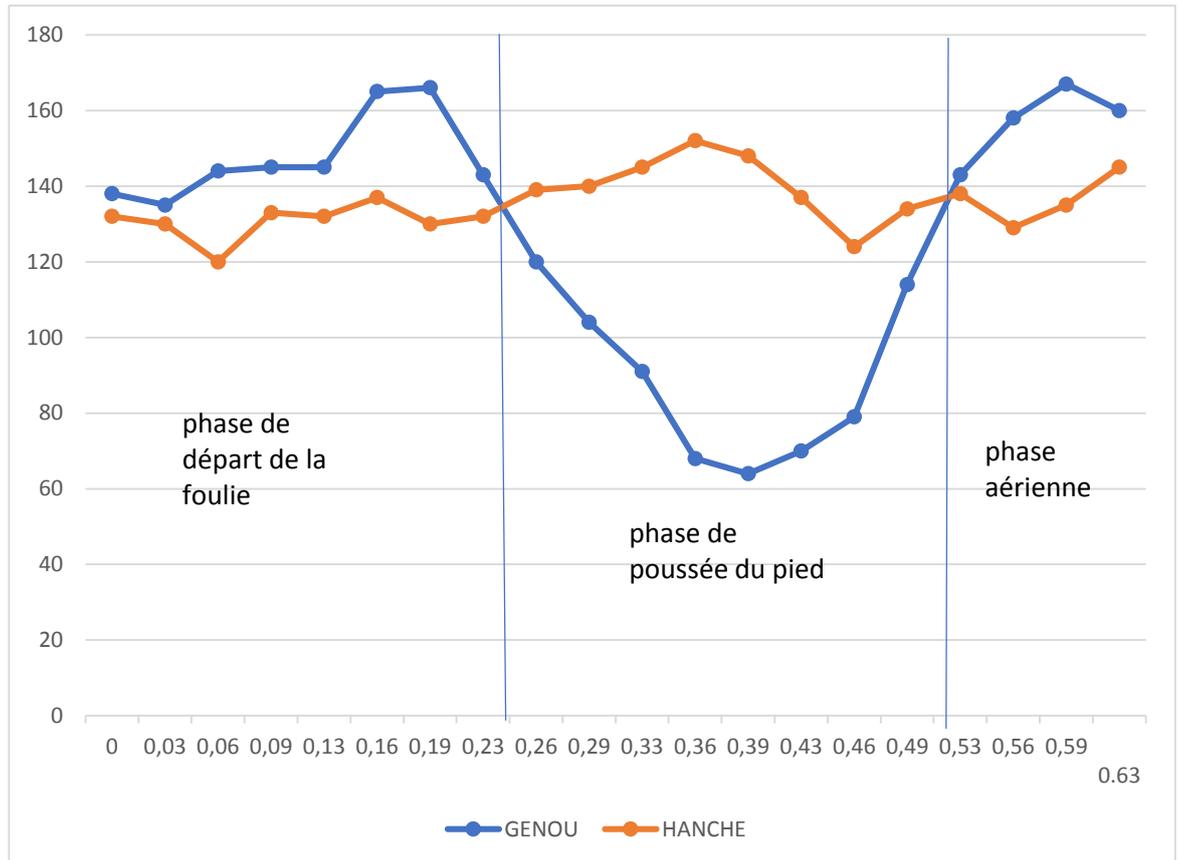
Pour obtenir et traiter ces données, nous avons réalisé un découpage vidéo afin d'obtenir seulement ce qui nous intéresse. Le calcul des angles articulaires (genou et hanche) s'est selon la méthode d'Euler. Nous avons positionné le rapporteur avec une souris manuellement sur chaque incrément vidéo, ensuite prélevé les données pour pouvoir calculer les vitesses angulaires, les angles de phase et les phases relatives continues genou et hanche de sprinteur et demi fondiste sur Excel\*

## **Chapiter 02 :Analyses et interpretations des resultats**

## 1 – Analyses et interprétation des graphiques :

## 3-3 Jeune athlète 1 ( athlète de demi fond 1500M) pied droit

L'ogiciel Kenovea :



**Figure 06** : interprétation du profil cinématique du jeune athlète 1 (athlète de demi fond 1500M) pied droit .L'ogiciel Kenovea

Sur ce graphique relative au course de jeune athlète de demi fond 1500 M ,nous remarquons que dans les deux phases du départ et de la poussée de pied l'angle du genou et de la hanche sont inertes, avec une légère extension ,puis une flexion de l'angle du genou a la fin de la période de la poussée liée a la particularité technique de ce style de course ,pendant la phase aérienne nous pouvons voir l'extension de l'angle du genou avant sa stabilisation a la fin de la dernière phase, tandis que

l'angle de la hanche évolue en extension pendant la dernière période de la phase de poussée et finit par se stabiliser dans la phase aérienne

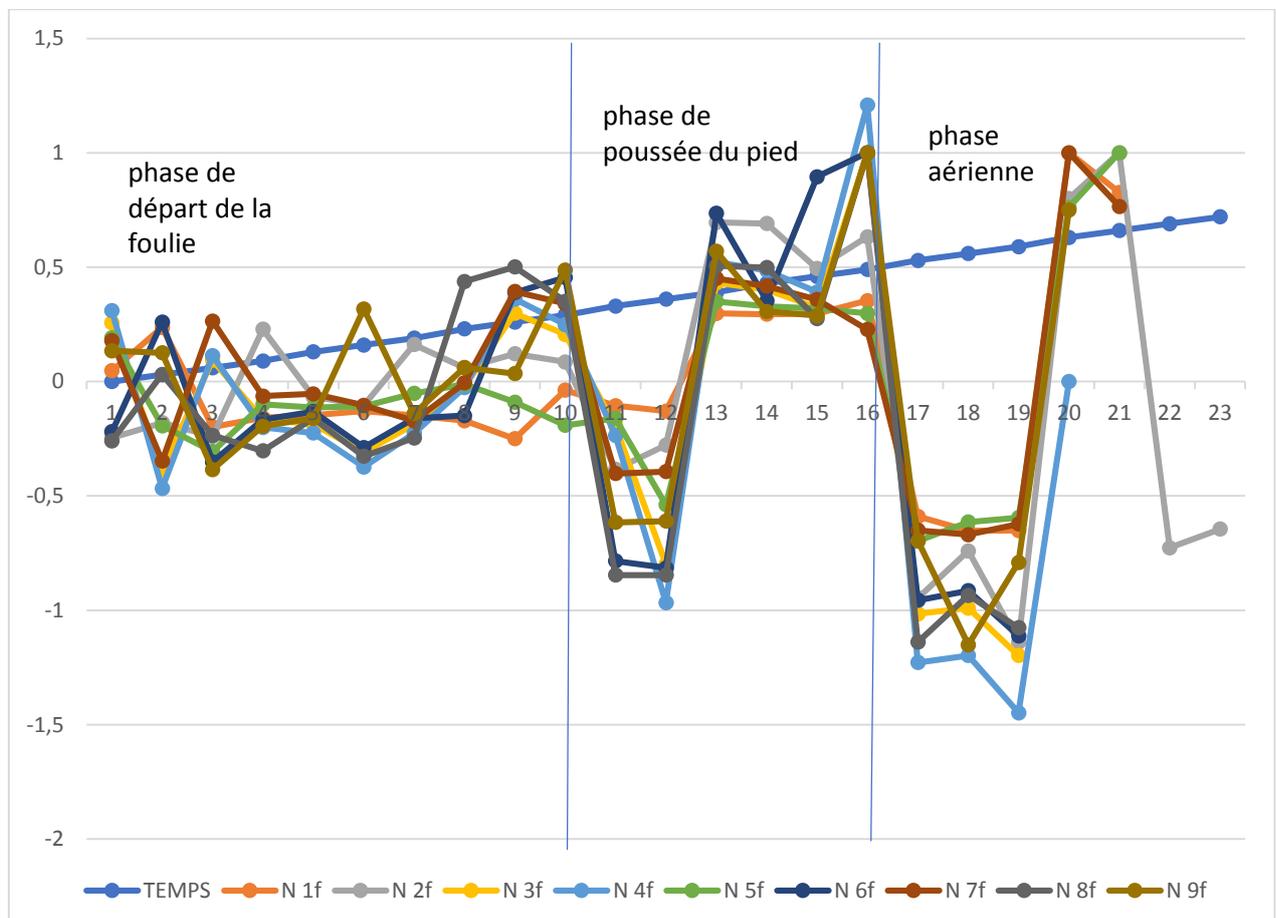
**1-2 La phase relative :**



**Figure 07** : : interprétation de la phase relative continue du jeune athlète 1 (athlète de demi fond 1500M) pied droit .L’ogiciel Kenovea

Nous constatons dans ce graphique que pratiquement dans toutes les 3 phases que l'angle du Genou évolue en avance par rapport a l'angle de la hanche ,sauf vers la phase aérienne c'est ce dernier qui évolue en avance par rapport a l'angle du genou

**1-3 interprétation de la phase relative et normalisation du athlète demi fond 1500 M**



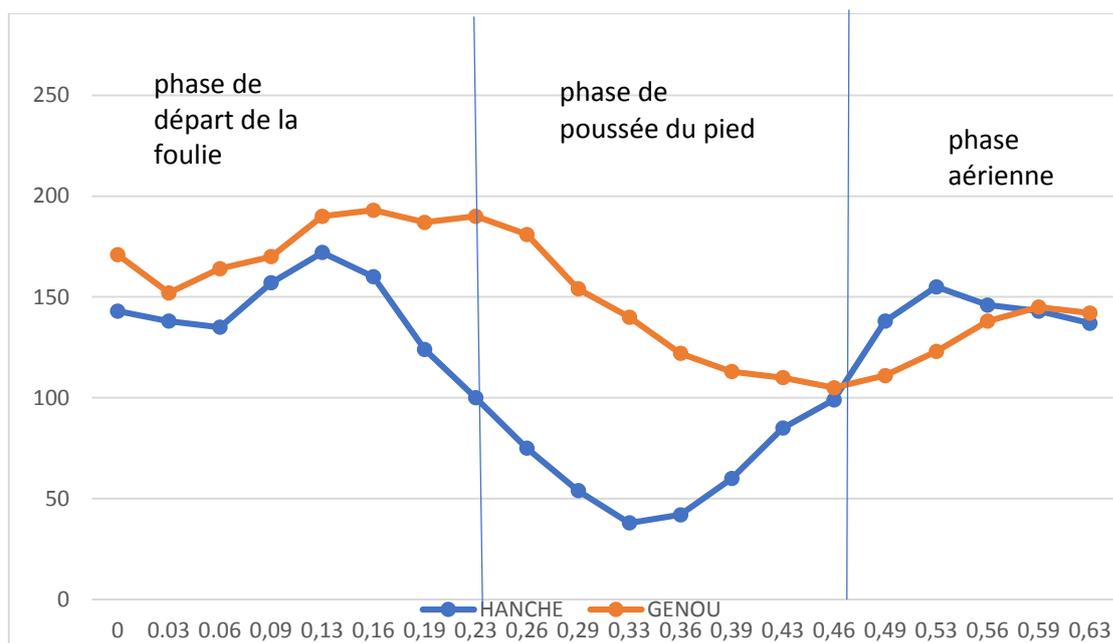
**Figure 08** : interprétation de la phase relative et normalisation du athlète demi fond 1500 M .Pied droit .L’ogiciel Kenovea

Sur ce graphique nous remarquon plein de courbes irréguliére qui nous laissent constater que l’évolution des deux angles du genou et de la hanche est inconstant ou l’angle du genou est en retard par rapport a celui de la hanche pendant la phase du départ et le début de la phase de poussée au milieu de cette dernière l’angle du genou est en avance généralement jusqu’au commencement de la dernière période de la phase aérienne

**4 Jeune athlete 2 ( sprinteur):**

**2-1Jeune athlete 2 ( athlete desprinteur) pied droit**

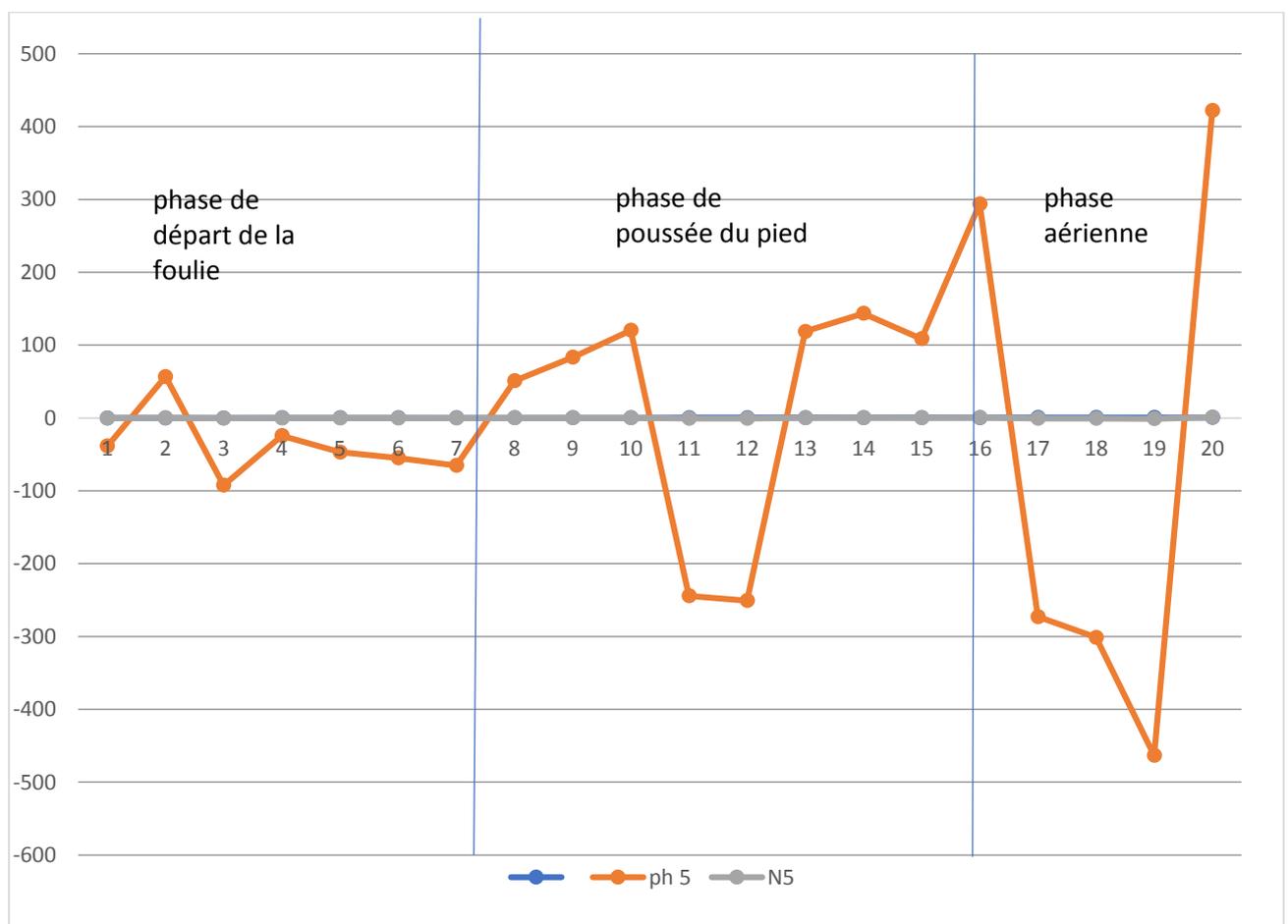
L’ogiciel Kenovea :



**Figure 09** : : interprétation de la phase relative continue du jeune athlète 1 (athlète de sprinteur) pied droit .L’ogiciel Kenovea

Nous observons sur ce graphique dans la première phase et la première période de la phase de poussée l'angle de hanche et du genou sont inertes, et dans la deuxième période de cette même phase nous remarquons une extension importante de l'angle du genou et de la hanche, avant que ce dernier se stabilise dans la phase aérienne, tandis que l'angle du genou évolue de nouveau en flexion avant de stabiliser dans cette dernière phase.

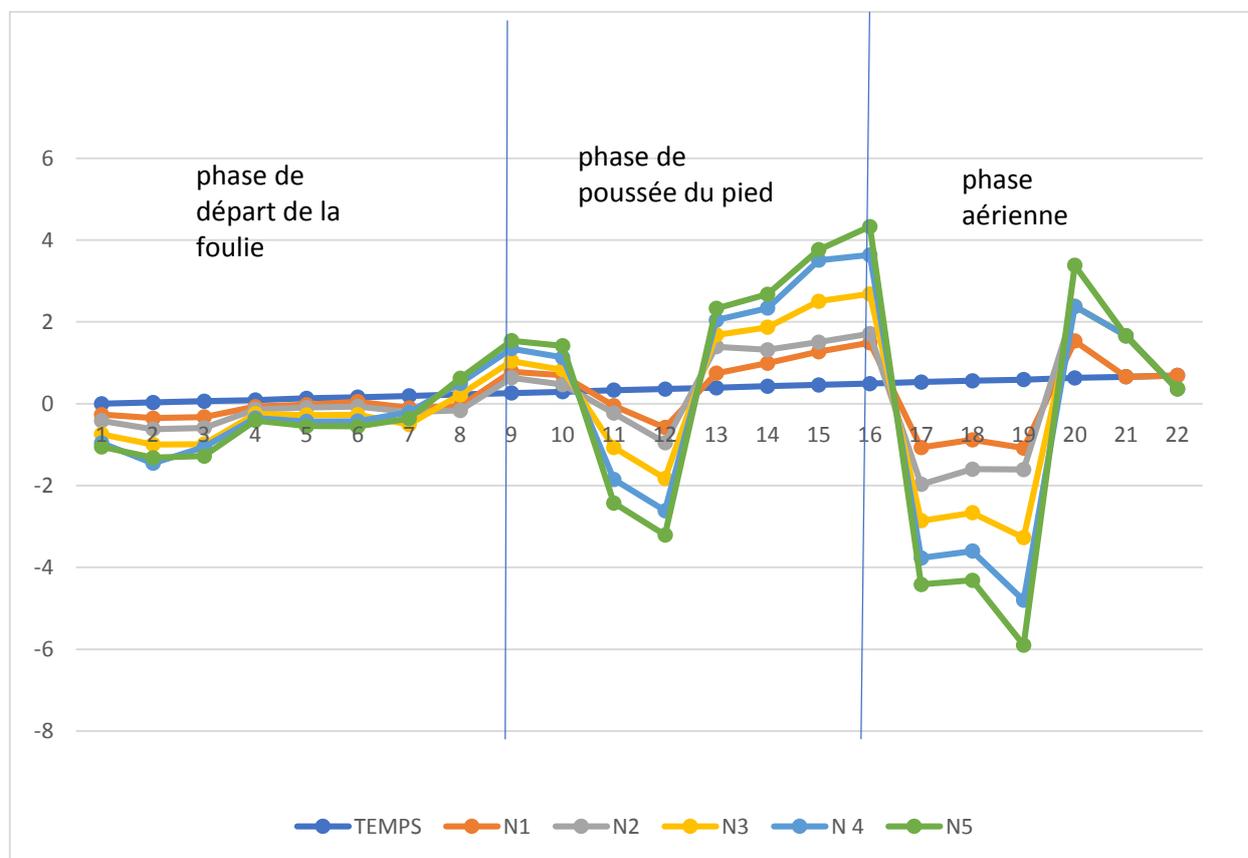
**2-2 La phase relative :**



**Figure 10** : : interprétation de la phase relative continue du jeune athlète 1 (athlète de sprinteur) pied droit .L'ogiciel Kenovea

Nous observons sur ce graphique que l'angle du genou est en avance par rapport à celui de la hanche pendant la phase de départ et la première période de la poussée, et vers la fin de la phase aérienne il a du retard par rapport à l'angle de la hanche

### 1-3 interprétation de la phase relative et normalisation du athlète sprinteur

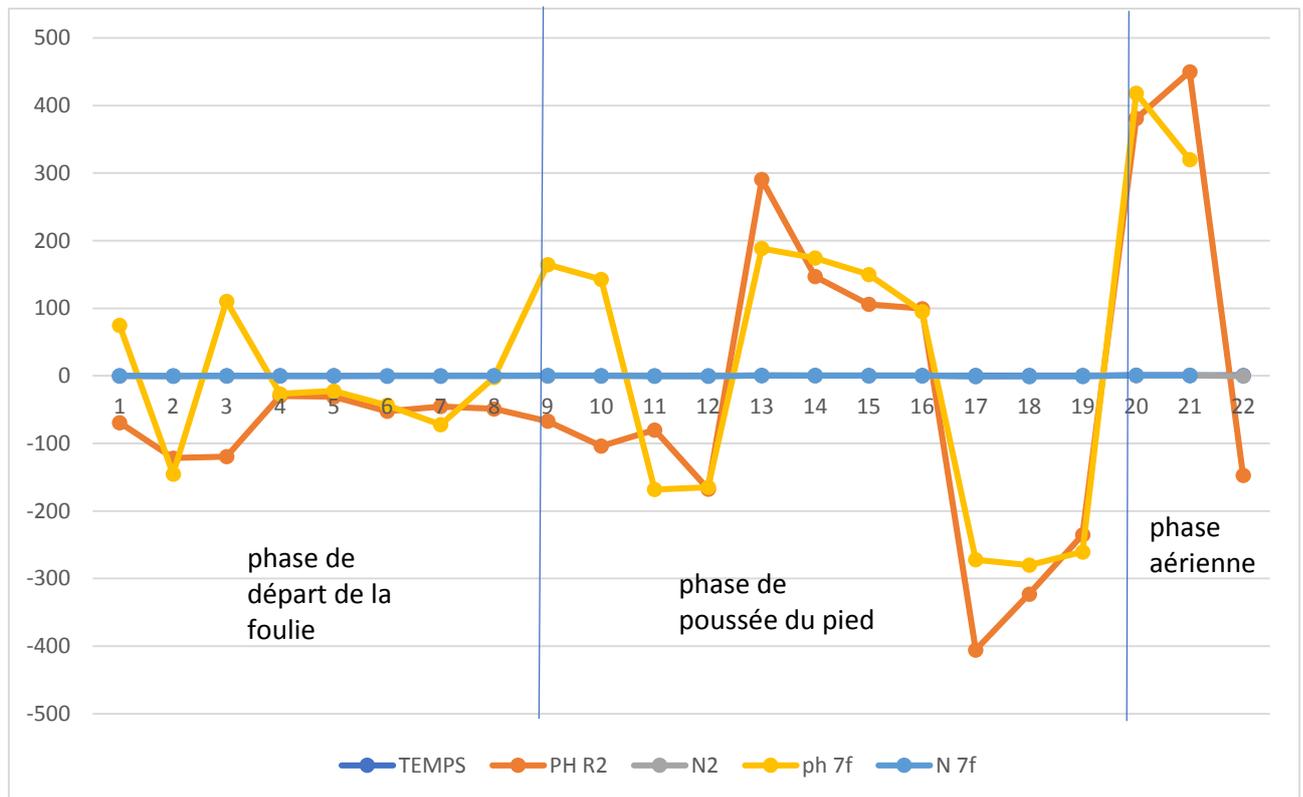


**Figure 11** : interprétation de la phase relative et normalisation du athlète sprinteur .Pied droit .L'ogiciel Kenovea

Sur ce graphique nous remarquons que l'évolution de l'angle du genou est en retard par rapport à l'angle de la hanche, vers la fin de la phase de poussée nous pouvons voir

également que l'angle du genou évolue en avance par rapport a l'angle de la hanche ,et finalement dans la phase aérienne l'angle du genou évolue de nouveau en retard par rapport a l'angle de la hanche

**5 Un analyse graphique (comparation entre la phase relative des sprinteur 100M et des demi fondist 1500 M de la pied droit)**



**Figure 12:** interséption de la phase relative de la foulé entre les sprinteur et des demi fondist .L'ogiciel Kenovea

Dans cette graphique nous observons dans la première phase (phase de début) l'angle du genou de demi fondist et soprinteur est en retard par rapport la hanche jusqu'à la deuxième période l'angle de la hanche de sprinteur est plus retard que le genou par contre la pied de la foulé de demi fondist est plus courts par rapport les sprinteur

La déffirence entre la foulé de demi fondist et sprinteur s'est l'angle de genou de sprinteur s'est plus augmenté par contre l'angle de genou de demi fondist

La distance de la foulé de sprinteur est plus grande par rapport les demi fondist

## **Discussion et conclusion**

---

### Discussion et analyse des résultats

L'objectif general de cette recherche a été d'analyse la coordination intersegmentaire Entre les sprinteur 100M et demi fondistes pour determiner la defference entre les deux nos recherches scientifuque et notre protocole experimental ne nous ont pas permis d'apporter de reponse sur la technique la plus favorable entre l'ogiciel kenovea par contre nous avons constate que les athletes professionnels et d'elite sont pour la majorite en faveur de la position l'experimentations a montre qu'il y a plus de regularite dans la coordination comme nous l'avons observe sur le sujet

A cet effet nous avons tenté de vérifier les hypothéses :

➤ **Hypothèse générale est de savoir :**

Il existe une différence dans la dans la coordination inters segmentaire entre le sprinteur et demi-fordiste

Les paramètres morphologique et mode de course (la foulé d'athlète) déterminer la différence dans la coordination inters segmentaire entre le sprinteur et demi-fordiste

Athlete de fond qui avait l'angle de hanche et l'angle de genou pratiquement dans le meme stade d'evoltation pendant la phase de la possee et pandant la phase aerienne il se sont stabilises en continuant sur le meme constance

Athlete sprintre avait l'extension de l'angle du genou qui ete legerment en avance par rapport a l'angle de la hanch pendant la phase de la possee par contre pendant la phase aerienne les deux angles étaient sur le meme stade d'evolution avec une regularite due au bon deploiement de cet athlete pendant cette phase

En plus nous pensons que c'est du au style d'apprentissage traditionnel des entraineurs des le jeune age d'ailleurs Quant a notre expérimentation nous avons pu constater des imperfection et des parasites techniques par l'analyse cinémagraphique en comparant les deux styles de course sur tous les athlète et par spécialité de ce fait nous constatons qu'il existe une différence entre des différents courses utilisés par nos course

- L'interprétation des phases relatives se fait comme décrit au tableau 02

Occurrences	Interprétation
PRC $g.h = 0$	G et H sont au meme stade d'évolution entre leur maximaux repectifs
PRC $g.h = < 0$	G et H de l'avance par rapport à l'articulation H
PRC $g.h = > 0$	G et H a du retard par rapport à l'articulation H
PRC $g.h$ Constante	G et H évoluent dans les memes proportion au course de cette constance

**Tableau 02 :** Tableau de l'interprétation des PRC

## Conclusion

Le course en athlétisme s'est avéré être plus complexe que ce que l'on avait imaginé, il faut aussi savoir que nos recherches ont été limitées au niveau temps et matériel même humain pour pouvoir dégager des résultats, et peut-être même des solutions pour améliorer la technique de course.

Cependant, ce mémoire nous a permis de dégager des contenus d'enseignements qui nous seront utiles, cela nous a permis de dégager des points essentiels sur le course de sprint et demi-fondiste.

- ❖ Les entraîneurs doivent prendre en considération les différences individuelles chez chaque athlète compétitif afin de décider laquelle des deux techniques est la plus appropriée pour l'utilisation en compétition.
- ❖ Pour les sprinter il ne suffit pas d'accélérer dans la course de sprint, mais plutôt conserver une vitesse acquise lors du départ, il est donc essentiel de prendre en considération la qualité de la course en vitesse.
- ❖ À notre avis les entraîneurs doivent réserver une partie de l'entraînement pour les athlètes ce paramètre complètement course pourrait jouer un rôle majeur dans le développement de la performance.
- ❖ Il faut expliquer aux athlètes qu'il est important de se projeter vers l'avant et insister sur pousser avec ses jambes le plus fort possible et se déplier le plus vite possible.
- ❖ Il est possible d'améliorer l'efficacité de course par des exercices de type pliométrique afin d'améliorer la détente et la puissance de vitesse.
- ❖ À travers cette recherche scientifique nous avons pu construire notre approche sur le course et sur l'importance de l'analyse cinématographique biomécanique qui sont indispensables à l'amélioration de la performance sportive.

**Résumé :**

L'objectif de cette recherche qui consiste en une contribution à une analyse biomécanique en course (100M, 1500M) était d'évaluer la coordination intersegmentaire entre les sprinteur et demi fondist par le biais de phases relatives continues 14 athlète (age= 18/ 3.9 ans ;taille= 176.0=9cm ;masse corporelle =68.5=8.0kg ) ont pris part à cette étude

Les résultats ont montré des différences significatives en terme de coordination intersegmentaire entre les sprinteurs et demi fondistes chez les différents athlètes selon leur age et leur style de course

**Mot clés :** athlète, course, coordination intersegmentaire, phases relatives continue

**Abstract :**

The objective of this research, which consisted of a contribution to a biomechanical analysis in running (100M;1500M ) was to evaluate the intersegmental coordination of the different styles running through continuous relative phases, 14 athletes (age= 18 / 3 years ;height= 176.0±9cm ;body weight =68.5±8.0kg )participated in this study

The results showed significant differences in intersegmental coordination among the different athletes according to their age and style running

**Keywords:** athlete, course, coordination intersegmental, continuous relative phases

# **Index bibliographique**

## Index bibliographique

### Ouvrages

- 1- **Frédéric Aubert .Thierry Choffin** : Athlétisme Les courses ,2007
- 2- **Paul Grimshaw et Adrian Burden** : Biomécanique du sport et de l'exercice ,Bibliothèque royal de Belgique : 2010/0074/319
- 3- **Michel Dufour** : Le puzzle de la performance ,les qualités physiques, 39270 Chavéria , Mai 2011
- 4- **Burgess Limerick (1993)** : Relative phase quantifies interjoint coordination , Jornal of biomécanique
- 5- **Paul Gyax** : Education phtsic a l'école ,1979
- 6- **F.Natta et C.Réga** : analyse cinetique et cinématique du départ de sprint en starting-blocks et de la foulee de course a vitesse maximale , 2000
- 7- **Banister EW ,Calvert TW , Savage MV ,Bach T ,A:** Systems model of training for athletic ;performance,Aust .J. Sports Med .Exer. Sci.1975,7:57-61
- 8- **Banister EW:** modeling elite athletic performance. In H. J. Green and J.D McDougal and H.A. Wenger(Eds), Physiological testing of Elite Athletes,pp. 403-424. Champaign, Illinois: Human Kinetics 199.
- 9- **Bishop D,Edge J.** :The effects of a 10-day taper on repeated-sprint performance in femals. J.I. Sci . Med .Sport 2005,8 (2):200-209
- 10 - **Bompa TO:** Theory and Methodology of training (4<sup>th</sup> ed) .Toronto, Ontario Canada: Kendall/Hunt Publishi,g Company ,1996

**11 - Bruin G, Kuipers H, Keizer HA, Vander Vusse GJ:** Adaptation and overtraining in horses subjected to increasing training loads. J.Appl. Physiol. 1994, 76(5): 1908-1913

**12 – Thèse:** Etude comparative de la qualité physique « Vitesse » chez les footballeurs et les sprinteurs amateurs cadets- Mazoui Nacir 2017/2018

**13- Thèse :** Contribution à une analyse biomécanique des différents styles de départ plongeon en natation- Bouchebbah Aghiles ,2018/2019

**14- Thèse :** contribution à la caractérisation mécanique des critères de qualités du départ de la course vitesse sur 100 M – Khalil Ben Mansour, 18 mai 2009