Analyse cinétique et cinématique : - du départ de sprint en starting-blocks - de la foulée de course à vitesse maximale

Françoise Natta, Chantal Réga

▶ **To cite this version:**

Françoise Natta, Chantal Réga. Analyse cinétique et cinématique : - du départ de sprint en starting-blocks - de la foulée de course à vitesse maximale. [Rapport de recherche] Institut National du Sport et de l'Education Physique (INSEP). 2000. hal-01924641

HAL Id: hal-01924641
https://insep.hal.science//hal-01924641

Submitted on 16 Nov 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

DEPARTEMENT DES SCIENCES DU SPORT

Laboratoire « Mouvement Action et Performance »

ANALYSE CINETIQUE ET CINEMATIQUE :

- DU DEPART DE SPRINT EN STARTING-BLOCKS
- DE LA FOULEE DE COURSE A VITESSE MAXIMALE

Rapport de recherche
- 1ère partie -

F. Natta* et C. Réga**

* INSEP - Laboratoire « Mouvement Action et Performance »
** INSEP - Département de la Formation

Recherches subventionnées par le Ministère de la Jeunesse et des Sports
(Avenants 10 et 11 convention INSEP-FFA)

Année 2000

Introduction

Dans le cadre de l'unité d'analyse du mouvement, notre objectif principal est l'amélioration de la performance, en apportant à l'entraîneur des informations pouvant l'aider dans sa prise de décision.

L'objectif de cette étude présente un double aspect :

- Premièrement, établir un protocole et aménager un site expérimental qui permettent d'effectuer des expérimentations standardisées et rapidement mises en place afin d'effectuer un suivi des sprinters de haut-niveau à différentes périodes d'une saison et aussi à différents moments de leur carrière et répondre ainsi aux interrogations des entraîneurs tout en leur apportant une aide en terme de suivi de leurs athlètes.

- Deuxièmement, préciser l'organisation motrice d'un expert et en tirer des hypothèses sur le contrôle posturo-cinétique du sprinter.

Cette étude portant sur l'analyse de la course de vitesse est centrée autours de l'appui à deux moments caractéristiques :

- La sortie des starting-blocks et le premier appui qui suit avec un suivi du redressement et des longueurs de foulées jusqu'au troisième appui.

- L'appui à pleine vitesse et les caractéristiques d'un cycle de jambe complet.

Dans un premier temps, nous sommes partis des résultats trouvés dans de précédentes études et de l'expérience de terrain des entraîneurs, cette mise en commun devant aboutir au choix des paramètres cinématiques et cinétiques les plus pertinents en vue de l'amélioration chez les sprinters de leur départ (c'est-à-dire en considérant à la fois la sortie des blocs et le premier appui de course) et de leur foulée à pleine vitesse (c'est-à-dire en considérant à la fois l'appui de course et le cycle de la jambe).
Dans un second temps, le protocole étant établi et testé, nous nous proposons de suivre un certain nombre d'athlètes au cours de leur saison et même de leur carrière sportive en notant l'évolution de ces différents paramètres en vue de l'aide à la décision de l'entraîneur.

Pour ce faire, nous avons couplé une méthode globale avec une investigation segmentaire plus complète qui permet de préciser la coordination posturo-cinétique que les athlètes mettent en œuvre et ceci à différents moments de leur saison sportive.

Etat de la littérature

Course à pleine vitesse

L'objectif du coureur de 100m étant de parcourir sa distance le plus rapidement possible, il cherchera pour réaliser la meilleure performance, à atteindre sa vitesse maximale de course le plus tôt possible et à la maintenir jusqu'à la ligne d'arrivée.

Quelle que soit la distance de course, la vitesse moyenne est déterminée par le produit de l'amplitude des foulées par leur fréquence. L'amplitude est la distance comprise entre deux appuis consécutifs, la fréquence est le nombre de foulées effectuées par seconde. Le rapport optimal entre l'amplitude et la fréquence des foulées est individuel et résulte d'un équilibre entre les différentes variables que sont la morphologie, les qualités physiques et techniques, la distance à parcourir et les phases de la course considérée.

Dans les recherches scientifiques sur la course de vitesse, mais également dans les applications pratiques, la courbe de vitesse a été divisée en trois phases : la phase d'accélération, la phase de vitesse maximale et la phase de baisse de vitesse.

La phase d'accélération dure 30 à 60m chez la plupart des coureurs de 100m et l'on peut noter une décélération plus ou moins marquée dans les 20 derniers mètres de la course.
Toutes les phases de la course de vitesse ont été analysées lors de compétitions internationales comme les Jeux Olympiques de Séoul en 1988 (Brüggeman et Glad, 1990), les Championnats du Monde de Rome en 1987 (Moravec et coll., 1988), de Tokyo en 1991 (Ae et coll., 1992) et d'Athènes en 1997 (Müller et Hommel, 1997). Au cours de ces différentes compétitions, la vitesse moyenne de course par intervalles de 10m a été étudiée, et l'utilisation d'un laser aux Championnats du Monde d'Athènes a permis la mesure de la vitesse instantanée. Par ailleurs, dans certains cas, la fréquence et l'amplitude moyennes des foulées ont été calculées.
L'analyse de ces compétitions indique que la vitesse maximale de course se situe entre 50 et 60m pour la plupart des sprinters de niveau mondial, certains même montrant des capacités d'accélération jusqu'au 80m.
L'étude de ces courses montre qu'à 30m de course les coureurs atteignent déjà environ 90% de leur vitesse maximale. D'autre part, les Championnats du Monde d'Athènes ont montré que les finalistes du 100m masculin maintenaient une vitesse proche de sa valeur maximale (supérieure à 11,5 m/s) pendant 20 à 50m.
Autant que la vitesse maximale absolue atteinte par le coureur de 100m, la capacité à prolonger une vitesse élevée est d'un grand intérêt et caractérise les meilleurs.
Les coureurs moins expérimentés ont tendance à atteindre leur vitesse maximale sur 100m plus tôt que les coureurs experts. Dans l'étude de Volkov et Lapin (1979), des sprinters courant en moyenne en 12s atteignaient leur vitesse maximale à 40 m du départ et à 30m pour ceux qui réalisaient 14s au 100m. Ce résultat est confirmé par Delecluse et coll. (1995) qui ont relevé que les 171 coureurs non experts de leur étude (moyenne de leur performance : 12,21s ± 0,40) atteignaient leur vitesse maximale à 36m du départ.
Le résultat des mesures effectuées en compétitions internationales avec les sprinters experts semble montrer qu'avec l'augmentation du niveau de performance, la phase d'accélération et de maintien de la vitesse maximale augmentent et la phase de baisse de vitesse tend à diminuer.

De nombreuses études se sont intéressées aux paramètres de fréquence et d'amplitude des foulées.
La fréquence des foulées apparaît comme un des facteurs déterminants dans la phase d'accélération du 100m (Plamondon et Roy, 1984 ; Gagnon, 1973). L'étude de ce paramètre au cours de championnats internationaux montre que dans les 10 premiers mètres de la course, chez les meilleurs, la fréquence moyenne représente déjà, environ 80% de sa valeur maximale et l'amplitude moyenne 50%. La fréquence maximale sur 100m peut atteindre une valeur d'environ 5Hz dans la première moitié de la course. L'amplitude des foulées augmente progressivement pendant toute la course. Sa valeur peut s'élever à plus de 2,60m chez certains coureurs, dans la dernière partie de la course de 100m (Moravec et coll., 1988 ; Ae et coll., 1992).
Il est reconnu qu'en course de vitesse, les sprinters experts ont une fréquence et une amplitude de foulées supérieures aux coureurs moins spécialistes (Kunz et Kaufmann, 1981 ; Van Coppenolle et coll., 1983; Armstrong et coll., 1984). Cette capacité est liée aux qualités de force explosive qui leur permet d'agir sur ces deux paramètres de la course en produisant une grande quantité de force dans le temps le plus court possible.
Au niveau de la fréquence des foulées, on n'a pas relevé de différences significatives entre les sexes. Par contre, les sprinters masculins présentent des amplitudes plus importantes que leurs homologues féminines, ce qui explique leur plus grande vitesse de course (Mero et Komi, 1986).
L'étude menée par Hoffman en 1964 (traduit dans Track Technique, 1971) avec 56 sprinters de haut niveau a montré de fortes corrélations entre les données morphologiques et la longueur maximale de foulée, mesurée entre le 50 et le 60m d'une course de 100m. Pour cet auteur, l'amplitude des foulées se trouverait plus directement liée à la longueur des jambes qu'à la taille.
De nombreuses discussions ont porté sur l'importance relative de la fréquence et de l'amplitude des foulées sur la vitesse de course. Certains auteurs ont mis en évidence qu'aux vitesses de course les plus élevées, la fréquence devient le facteur le plus important de la performance.
Au cours d'épreuves de courte durée effectuées à vitesse croissante, Luhtanen et Komi (1978) ont montré qu'aux vitesses les plus élevées, l'amplitude se stabilisait et que la fréquence continuait à s'élever. Ces résultats ont été confirmés par des recherches qui comparent des coureurs présentant un niveau de performance différent. Dans ces études, les plus rapides se distinguent des autres par une fréquence supérieure alors que leur amplitude est sensiblement identique (Mero et coll., 1982 ; Mann et Hermann, 1985 ; Mann, 1986). L'exemple de la recordwoman du monde actuelle du 100m et du 200m, dont les courses ont été analysées lors des Jeux Olympiques de Moscou (1980) est à ce titre, très significatif. Il montre que l'amélioration de ses performances entre la demi-finale et la finale a porté essentiellement sur l'augmentation de la fréquence moyenne des foulées, l'amplitude moyenne ne s'étant pas modifiée (Levtchenko, 1990).
L'étude menée par Mero et Komi en 1986 renforce cette tendance en montrant que pour atteindre une vitesse supra-maximale (108,4%), les coureurs augmentent de 1,5% leur amplitude et de 6,9% la fréquence de leurs foulées.
Dans l'optimisation du rapport fréquence-amplitude des foulées, le niveau d'expertise semble jouer un rôle important. La performance en sprint du non-spécialiste est surtout fonction de l'amplitude des foulées, alors que

chez le sprinter expert, la fréquence des foulées prendrait une place plus déterminante (Coppenolle et coll., 1983).
Gager et collaborateurs (1999) ont analysé au cours de compétitions nationales, les composantes de la course de 100m et ont comparé les sprinters de niveau international aux sprinters de niveau national. Si les deux groupes de coureurs atteignent leur vitesse maximale entre 50 et 60m de course, cependant les plus rapides se distinguent de l'autre groupe par une amplitude moyenne supérieure et une fréquence inférieure. Les auteurs concluent que pour atteindre le niveau national sur 100m, l'amplitude est le facteur déterminant de la performance.
D'après l'ensemble de ces résultats, il semblerait que dans le cadre de la formation du sprinter, la première étape consisterait à accroître l'amplitude des foulées en élevant le niveau de force musculaire, puis à améliorer la vitesse de course en augmentant la fréquence sans réduire l'amplitude des foulées.

La technique du coureur de 100m a été analysée lors des phases de départ et d'accélération de la course ainsi qu'à pleine vitesse. Les études à vitesse maximale ont été réalisées, soit lors de compétitions sportives (Kunz et Kaufmann, 1981 ; Ae et coll., 1992; Mann et Hermann, 1985; Levtchenko, 1990), soit au cours d'épreuves standardisées, sur une distance de 40 à 50m, permettant aux coureurs d'effectuer deux ou trois répétitions le plus rapidement possible (Luhtanen et Komi, 1978 ; Mero et Komi, 1986 ; Mero et coll., 1982; Cöh et coll., 1999). Pour caractériser le comportement du sprinter, les auteurs ont eu recours à une analyse cinématique à partir d'enregistrement vidéo et parfois à une analyse de type dynamique en utilisant une plate-forme de forces. Certaines études ont été couplées à des enregistrements électromyographiques afin de mettre en évidence l'activité électrique des principaux groupes musculaires engagés dans l'action.
L'analyse de la course s'appuie sur une description de la foulée de course et des deux phases qui la caractérisent: la phase d'appui et la phase d'envol ou suspension. En sprint, l'appui occupe environ 40% du cycle de la foulée et la suspension 60% (Cöh et coll., 1999 ; Moravec et coll., 1988). Un cycle complet de course comprend deux foulées, nécessaires pour que le même pied reprennent contact avec le sol (Simonsen et coll., 1985). Avec l'augmentation de la vitesse de course la durée de la foulée diminue (Luhtanen et Komi, 1978).
Au cours de la suspension de la foulée, le centre de masse du coureur décrit une trajectoire ascendante puis descendante. Cette phase permet au coureur de préparer ses jambes au prochain contact au sol et à vitesse maximale, elle dure entre 120 et 140ms (Mero et coll., 1992 ; Cöh et coll., 1999 ; Moravec et coll., 1988). Pendant le retour de la jambe, celle-ci présente une flexion importante au niveau des articulations du genou et de la hanche. Le contact est précédé d'une ouverture de l'articulation du genou, plus ou moins marquée selon les coureurs et d'un retour rapide de la jambe vers le bas et l'arrière en direction du sol (Simonsen et coll., 1985 ; Mann et Sprague, 1980 ; Vardaxis et Hoshizaki, 1989). Cette action appelée « griffé » dans le langage athlétique anime le pied d'une vitesse horizontale par rapport à la hanche, de façon à limiter le freinage au contact et à réduire la durée de l'appui au sol (Mann et Sprague, 1980 ; Mann, 1986). L'analyse par Mann et Hermann (1985), du 200m des Jeux Olympiques de 1984 a montré que le vainqueur présentait au moment du contact au sol, une vitesse relative du pied (par rapport au centre de masse) supérieure à celle des deux autres médaillés.

Chez les meilleurs sprinters, l'appui de course dure entre 80 et 100ms (Moravec et coll., 1988 ; Cöh et coll., 1999 ; Mann et Hermann, 1985). Au cours du contact au sol, le coureur doit produire les forces nécessaires pour modifier la trajectoire descendante de son centre de masse, soutenir son poids de corps et se propulser vers l'avant. De nombreuses études ont pu mettre en évidence une amélioration de la performance de vitesse en relation avec une diminution de la durée de l'appui au sol (Mero et coll., 1982 ; Mero et Komi, 1986 ; Luhtanen et Komi, 1978 ; Kunz et Kaufmann, 1981). Alors que les meilleurs sprinters se distinguent des autres par une phase de contact plus courte, il n'a pas pu être démontré de différence significative entre les coureurs au niveau de la durée de la phase d'envol (Mero et coll., 1982 ; Mero et Komi, 1986 ; Mann, 1986).
La pose du pied en pleine course sur une plate-forme de forces, permet de mesurer les forces de réaction du sol selon les trois axes: vertical, antéro-postérieur et médio-latéral. Les données disponibles sur la force médio-latérale ont le plus souvent été relevées pour la course d'endurance et semblent indiquer que cette dernière représente une assez faible valeur par rapport aux deux autres composantes et tend à demeurer constante d'une vitesse de course à l'autre. Elle ne dépasserait pas, en valeur normalisée, 0,3 fois le poids corporel (Cavanagh et Lafortune, 1980 ; Roy, 1982). L'étude de Cöh et ses collaborateurs, en 1999 rapportent des résultats assez proches, avec des sprinteuses de haut niveau. Les valeurs maximales de cette étude sont en moyenne de 234N (± 32), soit 0,4 fois le poids du corps.
La phase d'appui au sol est décomposée en deux phases: l'amortissement, qui occupe la première moitié de l'appui et la poussée qui occupe la seconde moitié (Hay, 1980 ; Durey 1997). Au cours de l'amortissement, le centre de masse se situe en arrière de la verticale de l'appui. Au cours de la poussée, il passe en avant. A vitesse stabilisée, la force exercée selon l'axe antéro-postérieur est négative pendant la phase d'amortissement ; elle correspond à un freinage car la composante horizontale de la force de réaction du sol s'exerce dans un sens opposé au déplacement. Au cours de la phase de poussée, la force de réaction est positive, elle correspond à la propulsion et la composante horizontale est dans le sens du déplacement.

En théorie, une augmentation de la vitesse horizontale du centre de masse dans la deuxième partie de l'appui qui compenserait exactement la baisse de cette vitesse survenue au début de l'appui devrait aboutir au maintien d'une vitesse moyenne constante. Mais, du fait du freinage causé par la résistance de l'air, ceci serait insuffisant et donc la vitesse produite en fin d'appui doit être légèrement supérieure à la vitesse au début du contact suivant (Wood, 1987 ; Baumann, 1983).

Au plan segmentaire, la jambe qui prend contact avec le sol se fléchit légèrement au niveau des articulations du genou et de la cheville afin d'amortir le choc (Hay, 1980 ; Levtchenko, 1990). Le contact se fait à une distance de 0,20 à 0,30m en avant de la projection verticale du centre de masse (Mero et coll., 1982 ; Cöh et coll., 1999) et au cours de la phase d'amortissement, le centre de masse suit une trajectoire descendante. La principale cause de la baisse de vitesse horizontale au cours de l'appui est la distance horizontale entre le pied et la verticale du centre de masse lors du contact (Mero et coll., 1992). La plupart des auteurs ont montré que plus cette distance augmente et plus la vitesse horizontale diminue (Mann et Hermann, 1985), (Kunz et Kaufmann, 1981). Ce phénomène s'explique par une élévation de l'impulsion de freinage au cours de l'appui.

La force et la durée de freinage déterminent l'impulsion de freinage. Elles devraient être les plus petites possibles afin de limiter la baisse de vitesse horizontale qui se produit au cours de l'appui au sol (Mero et Komi, 1986).

La valeur maximale de la force de propulsion est généralement inférieure à une fois le poids du corps. Mero et Komi (1986) ont mis en évidence des relations significatives entre la vitesse maximale de course et les valeurs moyennes de force de propulsion ($r=0,84$, $p< 0,001$) et de freinage ($r = 0,65$, $p< 0,01$).

Au cours de la phase de propulsion, le centre de masse passe en avant de l'appui et remonte en même temps que la jambe se tend. Il a été constaté que pour raccourcir la durée de l'appui au sol, les sprinters limitaient l'extension au niveau de l'articulation du genou au moment de quitter le sol (Mann et Hermann, 1985 ; Mann, 1986).

En course de vitesse, la transition entre la phase de freinage et de propulsion se produit à environ 40% de la durée de l'appui (Mero et coll., 1992 ; Mero et coll., 1982 ; Cöh et coll., 1999). Les études effectuées sur les courses prolongées comme sur le sprint, ont montré qu'avec une élévation de la vitesse de course le temps de passage se produisait légèrement plus tôt. Dans l'étude de Mero et Komi en 1986 avec des sprinters, la transition se fait en moyenne à 43ms (± 12) pour une durée d'appui de 101ms pour le groupe le plus rapide et en moyenne à 48ms (± 8) pour une durée d'appui de 108ms pour les sprinters les moins rapides.

Les forces de réaction antéro-postérieures et verticales produites à l'appui, augmentent avec l'élévation de la vitesse de course en même temps que la durée du contact diminue (Mero et Komi, 1986 ; Roy, 1982).

A grande vitesse, l'essentiel de l'effort fourni au cours de l'appui sert à inverser le mouvement vertical vers le bas, pour se propulser à nouveau vers le haut. Les valeurs maximales de force verticale se produisent pendant la phase de freinage horizontal, soit 10 à 40ms après le début du contact (Mero et coll., 1992) et atteignent environ quatre fois le poids du corps. En course prolongée, les valeurs les plus courantes sont de l'ordre de 2,5 à 3 fois le poids du corps (Rodgers, 1993) et à vitesse supra-maximale (108,5%) les données enregistrées par Mero et Komi (1986) atteignent 4,6 fois le poids du corps pour les sprinters et 4,2 pour les femmes.

A des vitesses de course sub-maximale, la courbe de force verticale présente généralement deux sommets : le premier apparaît très tôt après le contact et correspond au choc de l'impact. Il est influencé par les événements se produisant avant la pose du pied et est appelé pic ou force d'impact. Cette force verticale dite passive est le résultat d'une collision passive entre la masse de la jambe et du pied avec le sol (Chang et coll., 2000). Le second sommet correspond à la force verticale de propulsion ou pic actif (Roy, 1982 ; Williams, 1985). Après ce pic initial, la force verticale augmente progressivement jusqu'à sa valeur maximale en même temps que le centre de masse atteint son point le plus bas. Ensuite, au cours de la seconde moitié de l'appui, le centre de masse s'élève et la force verticale diminue jusqu'à zéro quand le pied quitte le sol (Farley et Gonzalez, 1996 ; Chang et coll., 2000).

Des études à vitesse sub-maximale ont pu montrer que la valeur du pic d'impact et la forme de la courbe de force verticale étaient dépendantes non seulement de la position du pied et de la jambe au contact, mais également de la vitesse du pied au moment du contact (Williams, 1985 ; Cavanagh et Lafortune, 1980). Les valeurs de force verticale peuvent être supérieures chez les coureurs qui prennent contact au sol avec le talon. Les joggers ou coureurs de demi-fond dont le premier contact au sol se fait par le talon, présentent généralement un pic d'impact élevé et une durée d'appui plus longue que ceux qui touchent le sol avec le milieu de la plante de pied. Chez ces derniers, le premier pic est atténué, voire absent, et la courbe de force antéro-postérieure présente deux pics négatifs (Cavanagh et Lafortune, 1980). Toutefois, chez la plupart des sprinters, le premier contact au sol se fait en position haute sur la plante des pieds et cela tend à atténuer le choc de l'impact (Mero et coll., 1992). Ce que trouvait également Payne en 1983 dans son étude avec des coureurs de niveau international.

Les courbes de force de réaction du sol peuvent être très différentes d'une spécialité à l'autre mais également d'un coureur à l'autre. Elles s'intéressent au paramètre global qu'est le centre de masse mais donnent certaines informations sur les adaptations segmentaires du coureur avant et au moment de la prise de contact au sol.
Il semble d'après Mann et Hermann (1985) que les sprinters minimisent l'impulsion verticale produite, dans un souci d'économie de course, afin de limiter les variations verticales du centre de masse et de ne pas prolonger la phase de suspension de la foulée. Ces auteurs ont en effet relevé chez les coureurs les plus performants en compétition internationale une vitesse verticale inférieure à celle des moins rapides. Contrairement aux études de Mann (1986) qui n'ont pas révélé de différence significative entre la vitesse verticale des meilleurs sprinters (11m/s) et celle des moins bons (9m/s). Mais, les plus rapides, qui se distinguent par un appui au sol plus bref, sont néanmoins capables d'atteindre les mêmes vitesses parce qu'ils produisent des forces plus élevées en un temps plus court.

Pendant la course, la participation des différents groupes musculaires est complexe. Les études électro-myographiques ont montré que l'activité électrique des muscles augmente avec l'élévation de la vitesse de course et cela, dans les deux phases de l'appui (Mero et Komi, 1986 ; Gollhofer et Komi, 1987).
Au cours de la phase de freinage, se produit une contraction excentrique des muscles extenseurs des articulations du genou et de la cheville, pendant laquelle les muscles sont étirés activement afin de s'opposer aux forces d'impact. Elle est suivie par une contraction concentrique qui se traduit par le raccourcissement des muscles extenseurs au cours de la phase de propulsion. Au niveau du quadriceps, seuls les muscles mono-articulaires, les vastes interne et externe sont actifs pendant l'appui, le droit antérieur intervenant dans le retour de la jambe (Simonsen et coll., 1985; Wood, 1987).
L'activité électrique des muscles est significativement plus basse en phase propulsive qu'en phase de freinage (Mero et Komi, 1986). Ce phénomène est expliqué par la restitution de l'énergie potentielle élastique accumulée dans les composantes élastiques des muscles pendant la phase de freinage et libérée au cours de la propulsion (Cavagna et coll., 1968 ; Ito et coll., 1983 ; Thys, 1987). Il est bien établi que l'efficacité mécanique est plus importante quand un étirement bref et de faible amplitude précède immédiatement le raccourcissement du muscle. L'importance du cycle étirement-raccourcissement est déterminante en terme de rendement mécanique. En effet, le stockage d'énergie potentielle, tout en augmentant la puissance de l'action finale, réduit le travail demandé par le muscle et diminue le coût métabolique. Des auteurs ont montré que pendant la course, le rendement du travail moteur est supérieur à 40% (Cavagna et coll., 1968). Cette valeur est bien supérieure aux 25% de rendement maximum avec lequel les muscles transforment l'énergie chimique (ATP) en travail mécanique. Ceci suggère qu'une partie importante du travail serait due à la récupération d'énergie élastique stockée dans les muscles au cours de leur étirement.
Il a également été démontré que l'activité électrique de certains muscles de la jambe commençait avant le contact au sol (Simonsen et coll., 1985 ; Mero et Komi, 1986 ; Cöh et coll., 1999 ; Gollhofer et Komi, 1987). C'est au cours de la phase de suspension, à la fin du balancement vers l'avant de la jambe, que se produit successivement le stockage et la restitution de l'énergie élastique au niveau de l'articulation de la hanche. En effet, les muscles extenseurs de cette articulation freinent le mouvement vers l'avant de la jambe puis l'inversent. Ce retour de la jambe vers le bas et l'arrière est nommé action de "griffé" par les techniciens. Elle est initiée par une contraction des muscles extenseurs de la hanche et des fléchisseurs du genou. Elle débute avant le contact et se poursuit au début de l'appui dans un effort pour tirer le corps au-dessus du point de contact (Mann et Sprague, 1980 ; Wood, 1987). Cette activation musculaire, qui précède la pose du pied au sol, est associée à une flexion dorsale de la cheville et produit ainsi la raideur nécessaire à la jambe pour préparer l'appui.
Avec la préactivation musculaire, d'autres mécanismes entrent en jeu afin d'augmenter la raideur au contact et au début de l'appui : le réflexe myotatique et les propriétés élastiques des muscles (Mero et coll., 1992).
L'élasticité des muscles de la jambe d'appui a été évaluée à partir d'enregistrements vidéo en utilisant une constante (spring constant) qui rend compte des déplacements verticaux du centre de masse au cours de l'appui et montre la capacité du coureur à résister à l'impact au sol en modifiant le moins possible la trajectoire de son centre de masse (Luhtanen et Komi, 1980). Sa valeur est grande quand la force résultante est élevée, les variations verticales et le déplacement horizontal du centre de masse à l'appui sont petites et la durée de l'appui est brève. La valeur de la constante est élevée pendant le freinage et basse au cours de la phase de propulsion (Luhtanen et Komi, 1980), (Mero et Komi, 1986). La valeur de la constante en phase excentrique augmente avec l'élévation de la vitesse de course. Les meilleurs sprinters présentent des valeurs supérieures aux autres, principalement grâce à une durée d'appui plus courte et une moindre baisse du centre de masse au cours de la phase excentrique (lorsque d'importantes forces verticales compriment la jambe d'appui) (Mero et Komi, 1986).
De récentes études se sont intéressées à la raideur de la jambe au cours de l'appui, en utilisant un modèle simple de ressort linéaire pour représenter la jambe d'appui, avec un point de masse égal à la masse du corps (Blickhan, 1989 ; Farley et Ferris, 1998; Ferris et coll. 1998).
Ce modèle intègre la raideur de l'ensemble du système musculo-tendineux de la jambe. Le ressort représentant la jambe se comprime et se détend au cours de la phase d'appui et les variations de la longueur du ressort sont dues

à la flexion et à l'extension des articulations de la jambe. Le système présente une raideur plus importante lorsque les variations angulaires au cours de l'appui sont réduites et donc la jambe se comprime moins. En sprint, il est important afin de résister aux forces d'impact, que la jambe soit suffisamment raide avant et au moment du contact (Mero et coll., 1992). Une raideur élevée se traduit par un temps d'appui court et peu de variations verticales du centre de masse à l'appui (Blickhan, 1989 ; Farley et Morgenroth, 1999). Ce modèle alimenté par des données issues d'une plate-forme de forces et d'enregistrements vidéo à grande vitesse, prend en compte d'une part, la raideur verticale de l'ensemble du système (jambe plus masse totale du corps) et d'autre part, la raideur de la jambe seule. La raideur de l'ensemble du système ($K_{vert} = F_{peak} / \Delta_y$) reflète les variations verticales du centre de masse à l'appui (Δ_y) et la valeur maximale de la force de réaction verticale du sol (F_{peak}). La raideur de la jambe exprime la compression de la jambe au cours de l'appui et tient compte de la longueur du ressort et de son angle d'attaque au moment du contact (Blickhan, 1989).
Le modèle du ressort a principalement été utilisé dans des activités comme les bonds et la course d'endurance. Il donne un certain nombre d'informations sur les capacités du coureur à modifier la raideur de sa jambe d'appui en fonction des différentes surfaces. Par exemple, à une vitesse de 5m/s, le coureur augmente la raideur de la jambe afin de compenser une baisse de raideur de la surface d'appui. Ce comportement permet au coureur de maintenir au même niveau, le déplacement vertical du centre de masse, la fréquence de course et la durée du contact au sol (Ferris et coll., 1998).
Dans un système avec plusieurs articulations comme la jambe, une raideur plus importante peut être obtenue en bloquant une articulation et en maintenant la jambe aussi droite que possible pendant l'appui. D'un grand intérêt pour notre étude, le modèle montre que, pour sauter plus haut ou pour sauter sur des surfaces différentes, la raideur de la jambe est directement proportionnelle à la raideur de l'articulation de la cheville. Cette articulation semble être, plus que celle du genou ou de la hanche, le principal mécanisme d'ajustement de la raideur de la jambe (Farley et coll., 1998 ; Farley et Morgenroth, 1999). Ce constat nous semble intéressant à vérifier pour le sprint.
Au cours de notre étude nous porterons notre attention en partie sur les variations angulaires de la jambe d'appui pour tenter d'identifier à quel niveau du genou ou de la cheville se situe la plus grande raideur chez le sprinter, sachant que l'articulation de la hanche se tend constamment pendant l'appui de course.

L'analyse biomécanique de la course à pied a donné lieu à la mesure dans le plan sagittal (plan principal du mouvement) d'un certain nombre de variables cinématiques.
Les études sur la course d'endurance ont permis d'identifier certaines des modifications biomécaniques qui se produisent avec l'élévation de la vitesse de course. Ces recherches ont été réalisées soit avec des groupes de coureurs de niveau différent (Cavanagh et coll., 1977 ; Williams et Cavanagh, 1987), soit avec la même population effectuant des courses à vitesse croissante (Williams, 1985 ; Luhtanen et Komi, 1978 ; Roy, 1982; Milliron et Cavanagh, 1990).
Les études de Williams (1985) en particulier, ont permis, chez des coureurs dont la vitesse passe de 4 à 9m/s, de constater les comportements suivants, associés à l'augmentation de vitesse :

- une baisse de la distance horizontale entre le point de contact au sol et la verticale de la hanche,
- une réduction de l'angle formé par le tibia et la verticale lors du contact, de telle sorte que la jambe se pose presque verticalement à grande vitesse,
- une augmentation de la flexion de hanche au niveau de la jambe libre (angle cuisse-verticale) lors du décollage,
- une flexion maximale également plus importante de l'articulation du genou dans la phase de retour de la jambe d'appui,
- un contact sur la plante de pied chez les plus rapides,
- des variations verticales du centre de masse qui diminuent avec l'élévation de la vitesse de course.

Cavanagh et collaborateurs (1977) avaient également constaté des oscillations verticales du centre de masse légèrement inférieures chez les coureurs les plus rapides. Allant dans ce sens, Luhtanen et Komi ont en 1978, mesuré des variations pic à pic de 10,9cm à une vitesse de 3,9m/s et de 6,7cm à une vitesse de 9,3m/s.
Cavanagh et collaborateurs (1977) ont mesuré un certain nombre de variables angulaires au niveau de la cheville chez deux groupes de coureurs de performance différente. Il a relevé au niveau de l'appui une flexion plantaire significativement inférieure chez les plus rapides, ces derniers se distinguant par une extension moindre (≈ -10°) de la cheville au moment du décollage. Par contre, les autres variables articulaires ne montraient aucune différence significative.
Comme l'analyse cinématique consiste à déterminer à chaque instant les coordonnées dans l'espace de cibles placées sur le corps, il est possible de représenter le déplacement des différentes parties du corps, à partir d'un référentiel de son choix, qui peut être fixe ou mobile.
Milliron et Cavanagh (1990) ont étudié un groupe de coureurs se déplaçant sur un tapis roulant à des vitesses croissantes et ont représenté le déplacement dans le plan sagittal des articulations de la hanche, du genou et de la cheville à partir d'un point fixe pris dans le laboratoire. Ce mode de représentation permet une bonne visualisation de l'amplitude du trajet dans l'espace de certains points remarquables.
Les auteurs ont ainsi noté à la vitesse la plus rapide, qui reste néanmoins inférieure à celle du sprint (5m/s), une plus grande amplitude du mouvement au niveau des trois articulations, en particulier du genou et de la cheville, une plus grande élévation du pied en arrière de la hanche et une plus grande distance horizontale de contact par rapport à la verticale de la hanche.

Dans le domaine du sprint, les variables cinématique les plus couramment mesurées concernent d'une part, les caractéristiques générales de la course en terme de vitesse du centre de masse, d'amplitude et de fréquence des foulées et d'autre part, la position du corps et des différentes articulations de la jambe à différents moments : au cours de l'appui de course, pendant la phase de suspension du corps et lors du retour de la jambe entre le moment où elle quitte le sol et son prochain contact (Kunz et Kaufmann, 1981 ; Mero et coll., 1982 ; Mero et Komi, 1986 ; Tjupa et coll., 1989 ; Levtchenko et Papanov, 1991 ; Cöh et coll., 1999).
Les angles articulaires au niveau du membre supérieur ont également été étudiés chez certains auteurs (Sprague et Mann, 1983 ; Armstrong et coll., 1984 ; Mann et Hermann, 1985). Les études menées par Mann et Hermann (1985) concluent que l'action des bras n'a pas d'incidence directe sur la qualité de la performance en sprint. Celles de Sprague et Mann (1983) indiquent que les bras ne semblent pas jouer un rôle significatif pour combattre les effets de la fatigue dans une épreuve de sprint prolongé comme le 400m.
Au moment du contact au sol, Kunz et Kaufmann (1981) mesurent chez des athlètes masculins, l'angle compris entre l'horizontale et la droite qui joint le centre de masse et le pied. Les valeurs relevées par les auteurs sont comprises entre 72° et 75° et sont proches des 74,6° (± 2,1) de moyenne, rapportés par Cöh et ses collaborateurs en 1999 avec des sprinteuses de haut niveau.
La distance horizontale entre la verticale du centre de masse et le pied, à l'instant du contact a été mesurée chez de nombreux auteurs (Mero et coll., 1982 ; Sprague et Mann, 1983 ; Mann et Hermann, 1985 ; Tjupa et coll., 1989 ; Cöh et coll., 1999). Les valeurs de Mann et Hermann (1985), comprises entre 0,22m et 0,33m pour les meilleurs sprinters en situation de compétition, sont en accord avec les résultats de la plupart des autres études réalisées avec des athlètes de haut niveau dans des conditions expérimentales.
Mero et ses collaborateurs (1982) relèvent que les meilleurs sprinters se distinguent des autres par une distance de contact inférieure. Par ailleurs, les effets de la fatigue étudiés chez le sprinter par Sprague et Mann (1983) et par Tjupa et ses collaborateurs (1989) s'accompagnent d'une augmentation de la distance de contact mais également d'une plus grande ouverture de l'angle du genou au niveau de la jambe qui va prendre contact avec le sol.
A la prise de contact, l'angle formé par le tibia de la jambe d'appui et le sol est proche de la verticale, montrant que le pied se pose pratiquement sous le genou, chez le sprinter (Mero et coll., 1982 ; Levtchenko, 1990). L'angle formé par les deux cuisses, au moment du contact, est d'un grand intérêt pour apprécier l'efficacité du retour de la jambe libre. Certains auteurs notent qu'à cet instant, les cuisses sont presque parallèles chez les sprinters ; ce que confirment les valeurs comprises entre 0 et 20° rapportées par Kunz et Kaufmann (1981).
Au cours de l'appui, Mero et ses collaborateurs (1982) ont mesuré chez les sprinters les plus rapides, une moindre baisse du centre de masse pendant la phase d'amortissement. Les conclusions de Mero et Komi en 1986 sont identiques, puisque les auteurs rapportent des valeurs significativement inférieures pour les plus rapides par rapport au groupe le moins performant : respectivement 0,010m (± 0,004) et 0,018m (± 0,005).
Au moment où la jambe va quitter le sol, la plupart des auteurs notent que l'extension du genou de la jambe d'appui n'atteint pas sa valeur maximale (Mann et Hermann ,1985 ; Mann, 1986 ; Levtchenko et Papanov, 1991). Selon Mann (1986), ce comportement caractérise les meilleurs sprinters car ces derniers se distinguent par la faible amplitude articulaire de la cuisse pendant le contact au sol.
Au cours de la phase de suspension du corps, le centre de masse s'élève. Les valeurs relevées pic à pic chez les sprinters indiquent que les plus performants minimisent les déplacements verticaux du centre de masse. Mero et collaborateurs (1982) mesurent des variations pic à pic du centre de masse significativement inférieures chez les sprinters les plus rapides (0,047m ± 0,011) par rapport au groupe le moins performant (0,062m ± 0,016).
Les données de Cöh et collaborateurs (1999) avec des sprinteuses de haut niveau, vont de 4,6cm à 8,5cm et confirment la tendance des meilleurs à limiter les déplacements verticaux du centre de masse en course.
Quand la jambe d'appui a quitté le sol, l'extension de l'articulation de la hanche se prolonge et l'angle entre les deux cuisses atteint sa valeur maximale. La jambe revient alors vers l'avant selon un trajet en arrière de la hanche qui passe plus ou moins sous le niveau de la fesse selon les coureurs. Le retour de la jambe en avant de l'axe de la hanche se produit quand la jambe opposée est au sol. L'amplitude de la flexion de hanche est appréciée par certains auteurs, par l'angle compris entre la cuisse et la verticale. Cette valeur ne semble pas distinguer les meilleurs sprinters des autres, comme le soulignent Ae et collaborateurs (1992) à partir d'une comparaison entre des étudiants et les deux médaillés au 100m des Championnats du Monde de Tokyo en 1991.

Quelques auteurs ont mesuré la flexion maximale de l'articulation du genou lors du retour de la jambe (Armstrong et coll., 1984 ; Mann et Herman, 1985) et certains ont calculé au cours de cette phase, soit l'accélération de la cuisse (Kunz et Kaufmann, 1981), soit sa vitesse angulaire (Mann et Herman, 1985 ; Cöh et coll., 1999) ou encore, la vitesse horizontale atteinte par le pied lors du retour de la jambe (Cöh et coll., 1999). Les travaux de Cöh et collaborateurs (1999) indiquent qu'en sprint, la vitesse horizontale du pied de la jambe libre est maximale pendant la phase de poussée au sol de la jambe opposée et que cette vitesse segmentaire est environ deux fois plus élevée que la vitesse de déplacement horizontal du centre de masse.

Au niveau de la phase de retour de la jambe, certains auteurs dont Mann et Herman (1985) et Mann (1986) n'ont relevé aucun comportement significativement différent entre les experts et les non-experts en sprint.
Kunz et Kaufmann (1981) montrent cependant que les sprinters de leur étude présentent une accélération de la jambe libre supérieure à celle de décathloniens moins rapides qu'eux.
Tjupa et collaborateurs (1989) notent que, sous l'effet de la fatigue, non seulement les mécanismes précédant l'appui se modifient, mais l'amplitude des mouvements de la jambe lors de son retour diminue. Le genou de la jambe libre monte moins vers l'avant, résultat d'une baisse de la flexion de la hanche. Ce que confirment les observations faites par Sprague et Mann en 1983 chez leurs sprinters les moins rapides. Tjupa et collaborateurs montrent également avec la fatigue une diminution de l'amplitude du « griffé » précédant le contact. Le déplacement horizontal du pied vers l'arrière est réduit et explique le phénomène de prise de contact jambe tendue loin vers l'avant, quand la fatigue se manifeste.
Pour mieux visualiser et apprécier l'amplitude du retour de la jambe, certains auteurs ont tracé le trajet du pied autour de la hanche, en fixant cette articulation (Piacenta, 1988 ; Durey, 1997). Ce tracé décrit par le pied pendant le cycle complet de course est appelé « poulaine » (Durey, 1997). Une représentation de ce type fournit des informations segmentaires sur les différentes articulations mobilisées de la jambe et permet de visualiser la montée du pied vers la hanche après son décollage, ainsi que l'amplitude de l'action de « griffé » qui précède le contact au sol.

Départ du sprint

En raison de son intensité émotionnelle, la course de 100m est considérée comme l'épreuve reine de l'athlétisme, et le départ, par son caractère explosif, captive les spectateurs. Il est d'ailleurs souvent retenu par le marketing pour symboliser le dynamisme et l'efficacité.
Si la réglementation actuelle impose le départ en starting-blocks pour toutes les courses de vitesse, du 100 au 400m, cette position de départ n'était pas l'évidence. Sur une photo du départ du 100m lors des 1er Jeux Olympiques contemporains d'Athènes en 1896, nous observons des positions très variées selon les coureurs. Un seul sur cinq compétiteurs visibles adopte la posture quadrupédique actuelle. Est-ce l'empirisme ou la recherche qui a poussé à l'abandon des autres solutions ? Le fait est, que si l'utilisation des starting-blocks s'est révélée être la seule solution retenue pour le haut niveau, au niveau débutant, et notamment pour les enfants en cours d'apprentissage, le départ debout est toujours préféré.
L'évolution historique, comme l'évolution au cours d'un apprentissage, prouvent que cette posture n'est pas « naturelle », et que son adoption suppose l'acquisition d'autres capacités, comme une musculature suffisamment développée et la maîtrise d'une coordination segmentaire complexe. Toutes ces raisons expliquent certainement, du moins en partie, le fait que de nombreux auteurs se soient intéressés à ce mouvement sportif.

Les différentes positions de départ ont souvent été distinguées par rapport à l'écartement des pieds selon l'axe antéro-postérieur. Traditionnellement, on décrit trois positions suivant ce critère: le départ groupé, qui présente une distance d'orteils à orteils entre 25 et 30cm ; le départ moyen, avec une distance entre 40 et 53cm ; et le départ allongé, avec une distance allant de 60 à 71cm. Parmi les premières études portant sur les différents types de départ, les plus représentatives sont considérées être celles de Kistler et celle de Dickinson, en 1934 toutes les deux. Leurs résultats montraient que le départ allongé permettait des poussées plus puissantes, mais que les athlètes quittaient les blocs dans un temps plus court avec le départ groupé. En 1934 également, l'étude de Bresnahan indiquait déjà l'ordre de mise en action des différents segments du corps au cours du départ. Pour un droitier, la chronologie est la suivante : la main gauche quitte le sol la première, puis la main droite, le pied droit et enfin, le pied gauche. Pour lui, toute autre chronologie se fait « au détriment du départ du sprinter ».
Mais la première étude de référence semble être celle de Henry en 1952. Ses principales conclusions sont qu'il faut préférer le départ moyen, parce que le départ groupé permet effectivement de quitter les blocs plus rapidement, mais ceci avec une vitesse inférieure; quant au départ allongé, il permet de « sortir » des blocs avec une vitesse plus grande, mais l'avantage se trouve perdu au bout de 10 yards (9,14m). Des études ultérieures portent également sur la comparaison de ces différents types de départ : Desipres (1972) mesure l'accélération pendant la première seconde et compare le départ agenouillé au départ élevé. Il enregistre l'EMG des principaux muscles. Son étude le conduit à préférer le départ agenouillé,

car les temps de réaction du pied arrière et du pied avant sont plus courts. Il explique ceci par la position du centre de masse qui serait plus près des mains. Le départ agenouillé permet aussi une plus grande accélération et une vitesse horizontale du centre de masse plus importante. Gagnon (1978) montre que tous les sprinters présentent de meilleures caractéristiques biomécaniques avec le départ allongé, bien que les sprinters plus qualifiés soient plus rapides à 50m avec le départ groupé, et ceci bien que les starting-blocks soient quittés plus tôt, mais avec moins de vitesse. Hoster et May (1978) préconisent la position moyenne, comme Henry, parce qu'elle permet la meilleure accélération. Delhez et collaborateurs (1980) étudient la dynamique du mouvement horizontal pour les trois types de départ. Ils concluent que la position corporelle la plus efficace varie d'un sujet à un autre et que la vitesse de départ constitue le paramètre le plus représentatif de la dynamique de l'impulsion. Elle est d'ailleurs fortement corrélée négativement avec le meilleur temps à 100m.
Hafez et collaborateurs (1985) précisent que les facteurs déterminants dans l'obtention du résultat désiré sont une direction proche de l'horizontale de la force appliquée au bloc par le pied avant, juste avant la perte de contact, accompagnée d'une grande vitesse horizontale du centre de masse, et non l'amplitude de la vitesse résultante du centre de masse et de la force appliquée au bloc. D'ailleurs Jakimovic (1985) remarque qu'avec la fatigue, il se produit des changements quantitatifs (diminution des valeurs des vecteurs de force), mais aussi qualitatifs (dégradation de leur orientation) et notamment, le sprinter se propulse alors, davantage vers le haut que vers l'avant.
Plus récemment, Vignerot et collaborateurs (1997) font une analyse mécanique des phénomènes du déséquilibre au cours du départ de sprint, en montrant l'influence des diverses attitudes des athlètes, liées aux réglages des starting-blocks, sur la gestion optimale du départ de sprint. Ces auteurs retiennent comme conditions d'un bon départ : une grande vitesse horizontale du centre de masse en sortie de blocs, une courte durée d'impulsion mais aussi un grand déplacement horizontal du centre de masse. Ces auteurs trouvent que ces conditions sont les mieux remplies lorsque les blocs sont rapprochés (longueur d'un demi-segment jambe). Ils montrent également que seul le mouvement relatif des différents segments les uns par rapport aux autres par des forces internes au système (forces musculaires) est la cause de la force de poussée sur les blocs. Enfin, ils trouvent que le départ est plus performant si l'on ajoute à ces conditions, une consigne de centration visuelle des sprinters au sol.
Ces résultats sont compatibles avec ceux de Mero et Komi (1990) qui trouvent que l'action au départ est optimisée lorsque les principaux muscles sont activés avant même que l'on puisse détecter la moindre variation de force sur les blocs.

D'autres études permettent la comparaison de résultats en fonction du niveau de pratique. Ainsi, Baumann (1976) analyse les différences entre trois groupes de sprinters n'ayant pas le même niveau de performance, mais présentant des mesures anthropométriques presque identiques. Il établit que, chez les meilleurs, la position du centre de masse est plus en avant que chez les autres. Le poids du corps sur les mains est de 73 à 82% pour le groupe fort, alors qu'il ne représente plus que 52 à 67% pour le groupe le plus faible. D'ailleurs, les sprinters les plus habiles présentent une plus grande force dans les muscles des bras et des épaules. Les amplitudes maximales et les valeurs moyennes des accélérations sont plus élevées. De manière analogue, la vitesse et l'impulsion sur les blocs sont plus importantes. Comme Delhez, il signalait déjà les corrélations existantes entre les temps intermédiaires et la performance à 100m (corrélation hautement significative entre le temps à 5m et à 100m). Il en conclut donc, qu'à une bonne performance au 100m correspond une bonne performance au départ. Gagnon (1978) dont l'étude porte sur des femmes, compare également deux groupes de niveaux différents. Ses résultats sont en accord avec les précédents et il remarque que les forces, vitesse et accélération, au départ, sont plus importantes chez les sprinters plus qualifiés. Il signale également que la poussée sur le bloc arrière est mieux exploitée, bien que pour tous les niveaux, l'effort principal soit développé sur le bloc avant. L'étude de Mero et collaborateurs (1983) porte également sur la comparaison de trois groupes de niveaux, chez

des sprinters hommes. Ils en concluent que le niveau de la force horizontale est un facteur plus important que le temps pour le produire et que, en position « prêt », le centre de masse doit être haut et près de la ligne de départ (même conclusion que Baumann). De nombreux auteurs ont porté leur attention, ou du moins, relatent des résultats à partir de l'impulsion exercée sur les blocs avant et arrière. Ainsi, Blader (1967) signale que le départ n'est pas efficace lorsque l'application de force par le pied avant est tardive et que dans un bon départ il existe une haute proportion d'impulsion fournie par le pied arrière. Payne et Blader (1971) précisent qu'il existe une grande variation dans l'amplitude du pic arrière, mais les meilleurs sprinters présentaient toujours une action plus forte. Néanmoins, comme l'impulsion est plus importante que la force maximale, c'est le pied avant qui produit la plus grande partie de l'accélération du corps, en raison de son temps de contact plus long. La force résultante agit initialement devant le centre de masse (CG), ce qui entraîne une tendance à faire tourner le corps en position verticale. Par contre, lorsque la jambe libre est projetée en avant, la force agit derrière le CG, ce qui induit une tendance à faire tourner le corps vers le sol. Ils formulent l'hypothèse que, pendant le temps de poussée sur les blocs, la rotation vers le haut est prédominante. Ils concluent en disant, que l'efficacité du départ serait liée à l'accélération moyenne sur les blocs et surtout à l'accélération moyenne horizontale à l'intérieur des limites d'un équilibre raisonnable dans les premiers pas. Delhez et collaborateurs (1980) enregistrent une poussée horizontale avant le départ et en concluent qu'elle reflète l'activité posturale des muscles extenseurs. Hafez (1985) précise que la force résultante croît continuellement pendant l'action du pied avant jusqu'à un maximum, situé juste avant la perte de contact. Duchateau et collaborateurs (1986) trouvent que le développement de la vitesse initiale en sprint est non seulement lié à la distance qui sépare les blocs de la ligne de départ, mais également à l'obliquité du bloc avant par rapport à la piste. Ils préconisent une inclinaison de 30°. L'étude de Brand et collaborateurs (1987) analyse les conséquences liées au fait que les starting-blocks ne supportent qu'une partie du pied. Ils signalent que ceci entraîne une perte de temps de 120ms, mais font remarquer, que ceci peut s'avérer intéressant parce qu'un muscle pré-étiré augmente sa puissance en raison du réflexe de pré-étirement ; à condition que cette augmentation de puissance compense au moins la perte de temps. Tous ces auteurs relatent les durées et amplitudes des impulsions, et notamment, le temps de réaction des pieds. Le plus souvent, le pied arrière est signalé comme poussant le premier (Baumann, Gagnon, Delhez) mais, dans certaines conditions, les auteurs trouvent que les temps de réaction sont identiques (Payne et Blader, Gagnon).

Une autre grande partie des résultats portent sur l'activité des muscles de la jambe. Parmi les différents travaux, on peut citer celui de Ikai (1968) qui relève une relation hautement significative entre la force propulsive calculée d’après la courbe de vitesse sur 100m et l'étirement maximum de l'extenseur du genou, chez les sujets entraînés, l'étirement isométrique du muscle pourrait être transformé en une force propulsive dynamique. Ces sujets présentent une vitesse de contraction musculaire augmentée et un plus haut degré de coordination neuromusculaire, par rapport aux sujets non entraînés. Baumann (1976) signale aussi, que le départ dépend principalement de la force des muscles extenseurs de la hanche, du genou et du pied. Korneljuk (1982) dont l'étude porte sur les particularités de l'activité musculaire lors du sprint, conclut en disant, que lors des premières foulées, le facteur le plus important de l'accélération du centre de masse de l'athlète est le travail des extenseurs de la hanche. Au début de l’appui de la première foulée, les groupes musculaires des trois articulations de la jambe participent à l’accélération du centre de masse, avec néanmoins, une tension des fléchisseurs de la hanche et du genou deux fois supérieure à la tension des extenseurs de la cheville. Dans la seconde partie, le « gluteus maximus » cesse son activité et ce sont les articulations de la hanche et de la cheville qui sont les facteurs de propulsion de cette phase (la tension des extenseurs du genou étant plus importante que la tension du « triceps surae », fléchiseur plantaire de la cheville. Mero et collaborateurs (1983) remarquent que dans la position « prêt », les bons sprinters ont des angles de la hanche plus fermés pour les deux jambes parce qu'ils utilisent leurs extenseurs de la hanche plus que les autres.

Simonsen et collaborateurs (1985) concluent également de leur étude, que les muscles extenseurs de la hanche sont les principaux responsables de l'accélération de CG pendant la phase au sol du cycle de course. Les extenseurs du genou joueraient aussi un rôle.
D'autres auteurs ont utilisé les données électromyographiques pour expliquer l'action des muscles du tronc pendant la course. Notamment Cappozzo (1983) évalue les caractéristiques de la charge agissant sur la colonne lombaire en associant les composantes du couple inter-segmentaire (au niveau de L4) et les tracés électromyographiques. Entre autres résultats, il met en évidence que le recrutement des muscles du tronc est comparable dans le cas de la course et dans le cas de la marche. Guissard et Duchateau (1990) trouvent que durant le départ il y a une activité plus courte des muscles de la jambe arrière que des muscles de la jambe avant. Ils mettent en évidence que le recrutement débute par le biceps fémoris, puis le quadriceps et enfin les muscles du mollet. Au cours des deux premiers pas, ils constatent que pendant la suspension, les fléchisseurs de la hanche et de la cheville sont activés, surtout ce dernier qui l'est pendant toute la durée et s'arrête brusquement lorsque le pied cherche le sol. En général, ils constatent une activation des muscles avant le contact au sol, ce qui constitue une pré-activation qui est d'une durée plus longue pour les muscles de la cuisse que pour ceux du mollet. La coactivation du « biceps fémoris » et du « rectus fémoris », ainsi que la pré-activation des autres muscles extenseurs, entraînent une augmentation de la raideur de la jambe, qui permet de résister à l'impact au sol et améliore la force d'impulsion durant le pas. Le pattern décrit serait compatible avec une commande motrice centrale simultanée des muscles des deux jambes, modulée périphériquement dans les muscles à double attache, en relation avec leur position articulaire respective et leur rôle dans le mouvement.
Jacobs et Jan Van Ingen Schenau (1992) trouvent que pour des sprinters de haut-niveau, le pattern de coordination musculaire se caractérise par une séquence temporelle des muscles mono-articulaire qui va du proximal au distal. Mais, dans le sprint, il existe aussi une activité réciproque plus prononcée, par rapport aux activités de sauts, des muscles bi-articulaires. Le pattern du mouvement de la jambe au cours de l’appui est caractérisé par une séquence de flexion plantaire et d’extension vers le haut de l’ensemble de la jambe. En plus des contraintes géométrique et anatomique (transformation des accélérations angulaires au niveau des articulations en accélérations linéaire du centre de masse), les auteurs identifient une contrainte spécifique qui est le contrôle de la direction de la force de réaction du sol qui explique cette activité réciproque prononcée des muscles bi-articulaires. Le pattern de coordination intermusculaire serait donc un compromis entre l’exigence spécifique du sprint et l’effet avantageux de la séquence stéréotypée de chronologie musculaire qui va du proximal au distal sur les contraintes géométrique et anatomique.

Beaucoup d'études tentent de préciser la position optimale de départ du sprint en se référant aux angulations segmentaires. On notera celle de Borsow (1978) qui montre qu'un départ rapide dépend du maintien des meilleurs angles en position « prêt » et les différentes positions adoptées permettraient simplement au sprinter de maintenir ces angles en tenant compte de ses propres particularités anthropométriques. Hoster et May (1978) déterminent une position initiale optimale du centre de masse par rapport au moment de déséquilibre du tronc. Certaines études portent sur des points plus particuliers. Schnauber et Singer (1975) recherchent des indices permettant de détecter de façon certaine un faux départ. Le critère serait d'atteindre 250N de force horizontale développée par les deux jambes avant 100ms depuis le coup de pistolet. Mero et collaborateurs (1983) étudient les relations existant entre les paramètres biomécaniques et la distribution en fibres rapides et lentes des muscles. Yokooi et collaborateurs (1987) analysent l'influence de la taille.

Nous noterons également l'intérêt des travaux portant sur la première partie de la course. Parmi eux nous pouvons citer celui de Borzov (1979) qui détermine onze paramètres qui participent à la modification de la vitesse au cours des sept premières foulées. Et celui de Chengzi et Zongcheng (1987) qui étudient les rapports existant entre la phase d'appui et la phase de suspension. Plus récemment, Dowson et collaborateurs (1998) utilisent le modèle

théorique de Gunther (1975) (qui tient compte de dimensions de longueur, de masse et de temps pour exprimer la force et l'accélération) pour investiguer les relations entre la force musculaire isocinétique et la performance en sprint, particulièrement dans la phase d'accélération de la course. Ces auteurs trouvent que le meilleur indicateur de cette performance est le pic du moment de force de l'extenseur du genou mesuré à grande vitesse (4,19 rad/s). Les relations sont meilleures entre la force isocinétique et l'accélération moyenne entre 0 et 15m qu'avec le temps mesuré à 15m. Elles sont encore meilleures si l'on exprime la force en tenant compte des dimensions corporelles en s'inspirant du modèle de Gunther. Delecluse et collaborateurs (1995) qui étudient les courbes de vitesses sur des courses de 100m effectuées par des étudiants en éducation physique et une sprinteuse de haut-niveau, relèvent trois composantes principales dans le traitement statistique de 50 variables de vitesse (une tous les 2m). La première composante représente la capacité à atteindre et à maintenir une grande vitesse dans la seconde partie du 100m (entre 36 et 100m), la seconde représente la capacité à continuer à augmenter encore sa vitesse après la phase d'accélération initiale (entre 10 et 36m) et la troisième la capacité à accomplir une grande accélération initiale (entre 0 et 10m). La vitesse maximale est atteinte à 36m, mais 98% de celle-ci est déjà atteint à 26m et on note une baisse dès 64m. La phase d'accélération peut donc être divisée en deux parties. La vitesse maximale présente une corrélation positive avec la seconde composante principale et aussi avec la première. Par contre, la perte de vitesse présente une corrélation négative avec la première composante, mais une corrélation positive avec la seconde. Ceci signifie qu'il faut chercher une balance optimale entre la phase d'accélération au départ de la course et le maintien d'une grande vitesse jusqu'à la fin du 100m, car l'amélioration de l'un peut dégrader l'autre.

Enfin, toute une série d'articles de portée générale ne manque pas d'intérêt, ne serait-ce que du point de vue historique. Comme celui de Payne et collaborateurs (1968) qui explique la technique et l'intérêt des plate-formes de forces et montre leur utilisation dans l'étude du sprint, entre autres ceux de Morawski (1980) et de Komi (1984) qui étudient d'une manière plus générale la relation existant entre la biomécanique et les performances neuromusculaires. Une étude faite en laboratoire présente des conclusions qu'il serait intéressant de vérifier dans le sprint, au départ mais aussi à pleine vitesse. C'est celle de Chang et collaborateurs (2000) qui porte sur des courses à petites vitesses (3m/s), avec des charges additionnelles. Ces auteurs montrent que la gravité est le premier déterminant de la force verticale générée pendant la course mais exerce aussi une influence majeure sur la force horizontale, plus grande que l'inertie. Néanmoins, la relation entre la force verticale et la gravité n'est pas directement proportionnelle et donc l'inertie pourrait jouer un rôle sur la génération des forces verticales actives. L'analyse du vecteur force résultant semble plus fonctionnelle que celle de ses composantes et si on le regarde à trois instants différents, ces auteurs constatent que la norme change mais pas la direction pour le même instant quelles que soient les conditions de charge, ce qui signifie que les changements de grandeur de la force verticale sont accompagnés de changements proportionnels de la force horizontale, ceci afin de maintenir l'alignement avec la jambe. Ceci pourrait constituer d'après les auteurs un mécanisme universel qui aurait pour fonction de minimiser le moment musculaire net à chaque articulation et donc la force musculaire et le coût métabolique.

De nombreux entraîneurs ont tenté, par une description très détaillée, de dépasser l'empirisme régnant encore dans la pratique sportive. Ainsi Antal (1974) à partir d'une observation des J.O. de Munich en 1972, préconise un certain type de matériel plutôt qu'un autre (comme le type de tartan ou de déclenchement sonore), et décrit une nouvelle technique de sprint. Bush et Weiskopf (1976) donnent des conseils pratiques d'entraîneurs de haut niveau. Kruszalak et Prus (1984) décrivent les nouvelles tendances du sprint américain au travers de la programmation de l'entraînement.
Il apparaît donc que le départ du sprint intéresse aussi bien le milieu sportif que le milieu scientifique, mais que le dialogue entre ces deux mondes reste encore à établir. D'autre part,

s'il est dorénavant arrêté que la position quadrupédique est la seule reconnue pour les départs de course de vitesse dans les compétitions officielles, sa complexité est telle, que la recherche de la position optimale ressemble bien à une véritable quête, chaque étude donne un éclairage différent au problème et apporte sa part de solution. Notre travail ne prétend pas donner la solution finale mais veut y contribuer par un positionnement du problème qui nous semble original.

Nos travaux antérieurs

Nous avons déjà mené une étude à partir d'une méthode d'approche dite « biomécanique » où nous avons considéré le problème des relations entre posture et mouvement dans le départ du sprint.

Des travaux menés par Brenière depuis 1974 (1981, 1986) sur la marche stationnaire concluent que pour une base donnée, l'accélération du centre de masse et la vitesse de progression sont limitées parce que le recul du centre des pressions est restreint. La posture initiale induit des contraintes posturales pour le mouvement exécuté dans cette posture. Pour augmenter la vitesse, il faut augmenter la base de sustentation.

Le départ du sprint, en starting-blocks, constitue à l'évidence, une situation de choix pour tester cette hypothèse. En effet, la base posturale y est notablement augmentée, et la position qu'occupe alors la projection du centre de masse permet un ample recul du centre des pressions. Il est en outre possible, en modifiant l'inclinaison du corps, de modifier la position initiale du centre de masse. Cela dit, le départ en appui quadrupédique présente un inconvénient majeur: il nécessite le redressement du corps, c'est à dire de développer des forces qui ne sont pas motrices.

Les résultats montrent qu'il est certainement avantageux de partir en starting-blocks, c'est à dire avec un appui vertical au niveau des pieds, puisque l'amplitude du recul du centre des pressions covarie avec la poussée maximale sur les blocs, et notamment, avec la poussée maximale arrière

La vitesse verticale du centre de masse est un paramètre global qui rend compte du redressement. La comparaison de deux populations (experts et non-experts) montre que cette composante évolue différemment en fonction du niveau technique des sujets. La population des athlètes de haut niveau, qui représente la population de référence (Natta et Brenière, 1998), présente un pic de vitesse verticale à l'instant de sortie des blocs supérieur à celui qui était enregistré à l'instant du lever des mains. Alors que les non-spécialistes présentent exactement l'organisation inverse, c'est à dire que le premier pic de vitesse verticale est toujours supérieur au second. Cela peut signifier que pour les non sprinteuses, les nécessités posturales sont telles qu'elles se préoccupent immédiatement de se redresser, alors que les spécialistes semblent capables de gérer suffisamment le déséquilibre initial pour s'organiser par rapport à un redressement progressif.

Nos résultats ont également montré que, bien que le redressement soit progressif, il apparaît prioritairement dans le temps, par rapport à la vitesse de progression du centre de masse. En d'autres termes, nous pouvons dire que les nécessités d'équilibration sont satisfaites en premier avant l'objectif (Natta et Brenière, 1997).

Les résultats nous conduisent à penser que la poussée du pied arrière est certainement plus impliquée dans le redressement. En effet, si les nécessités d'équilibration sont prises en compte prioritairement, nous avons vu que le pied arrière poussait le plus souvent en premier. La vitesse résultant de cette poussée covarie positivement avec le premier pic de vitesse verticale, à l'instant du lever des mains, alors que la vitesse résultant de la poussée avant, elle, covarie négativement avec le même pic. Cette différenciation du rôle des pieds n'apparaît que pour la population de référence, celle des athlètes de haut niveau. Cette population serait capable de spécialiser chacun des pieds dans une tâche différente, le pied arrière aidant au redressement et s'engageant très tôt au cours de l'initiation de la course, et le pied avant démarrant plus tardivement, avec une action plus longue qui vise à atteindre l'objectif qui est de s'élancer vers l'avant le plus rapidement possible. Nous pouvons en déduire que les athlètes de haut niveau possèdent un degré de spécialisation du geste qui pourrait traduire la mise en oeuvre d'une programmation très élaborée.

Quelques sujets quittaient le bloc arrière avant de lever les mains. Nous en avons conclu que ceci pouvait être le signe, hormis la chute, que les sujets avaient dépassé leur position limite vers l'avant. Par ce moyen, elles éviteraient un déséquilibre qu'elles ne pourraient compenser. Cette organisation leur permet de conserver plus longtemps une base de sustentation importante et le centre de masse à l'intérieur de cette base d'appui.

Nous avons trouvé que tout allongement de la durée d'anticipation dans la phase posturale induit un retard dans l'exécution du mouvement volontaire, contradictoire avec l'objectif chronométrique de la course (Natta et coll., 1990). Mais, parallèlement les mouvements anticipateurs permettent de mettre l'athlète en mesure d'effectuer le retour de sa jambe arrière. Les mouvements anticipateurs sont donc nécessaires pour que le mouvement se déroule.

Toutes les sprinteuses de haut niveau que nous avons testées adoptent une posture spontanée de départ qui place leur centre de masse très en avant, c'est à dire favorisant un déséquilibre important. Ces résultats nous amènent à penser qu'il faudrait rechercher un positionnement vers l'avant du centre de masse, ceci implique une musculation plus importante des bras.

Nous avons vu au cours des résultats que la posture initiale modifiait la coordination sensori-motrice. Nous pouvons penser que les synergies mises en oeuvre sont différentes. Certains paramètres sont augmentés dans une situation alors qu'ils sont diminués dans l'autre. Chaque posture présente à la fois des avantages et des

inconvénients. Mais la position avancée du centre de masse favorise une augmentation du recul du barycentre des forces aux appuis et du pic de poussée totale qui est un des éléments déterminants de la vitesse du centre de masse. Elle semblerait donc plus avantageuse qu'une position reculée.
Le calcul de la vitesse moyenne horizontale par unité de temps mis en rapport avec la posture initiale (caractérisée par la coordonnée antéro-postérieure normalisée du centre de masse) a permis de montrer que la position initiale moyenne susceptible de permettre un départ optimal placerait le centre de masse à 25% de la distance pieds-mains à compter de la ligne de départ.

Première partie : Mise en place d'un site et d'un protocole expérimentaux

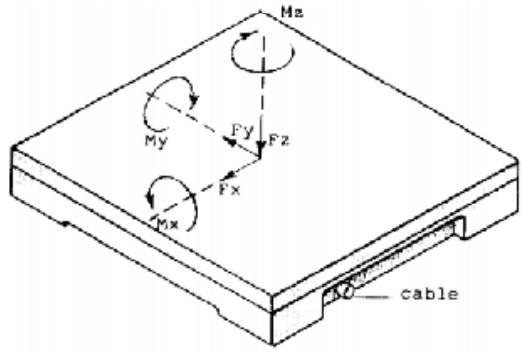
Site et Techniques

Partie dynamique

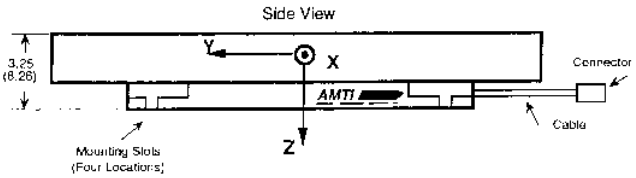
La plate-forme de forces

Le corps humain est souvent caractérisé par sa géométrie, sa masse, son centre de masse. Avec un tel modèle, on étudie le mouvement du centre de masse et le mouvement de rotation de ce solide autour de son centre de masse.
Dans les mouvements qui comportent des appuis au sol, la prise d'informations sur les forces en action au cours de l'appui nécessite l'utilisation d'un outil spécifique : la plate-forme de forces. Il s'agit d'une technique d'analyse tridimensionnelle bien adaptée à l'étude globale des mouvements complexes chez l'homme, c'est-à-dire une étude qui s'intéresse au centre de masse.

Description de la plate-forme de forces
Une plate-forme de forces simule un morceau de sol et permet de mesurer l'intensité de la pression des pieds à l'endroit où le sujet est en contact avec elle. Celle que nous utilisons est de marque AMTI (figure 1-1, schéma et coordonnées (x, y, z) de la force d'action résultante (F) et du moment résultant (M) du modèle installé sur la piste de sprint du stade J. Maigrot de l'INSEP), elle a une fréquence d'échantillonnage de 500Hz (c'est à dire qu'elle délivre une information toutes les 2ms) et mesure 121,92cm x 60,96cm.
Sa caractéristique essentielle est d'être intégrée dans un couloir de course au stade couvert de l'INSEP. Ce qui permet d'effectuer l'étude dans des conditions réelles d'entraînement.



Vue générale



Vue de profil

Figure 1-1: **Schémas de la plate-forme de forces AMTI**

Un étalonnage statique de la plate-forme qui a consisté à charger et décharger une série de poids (entre 1 et 25kg) jusqu'à une valeur maximale de 200kg (soit environ 1960N), ceci à trois emplacements différents a montré :

- une variabilité de ± 4N de la valeur du poids au cours d'une acquisition de 0,5s, quelle que soit la charge et l'emplacement

- une variabilité de ± 1.08N de la valeur d'un même poids au cours des différents essais

Principes de fonctionnement

Une plate-forme de forces se présente comme un plateau immobile suspendu à des capteurs de force.
Elle se compose schématiquement d'un cadre métallique, sur lequel sont montés quatre capteurs de forces tri-axiaux.
Cette base est surmontée d'une plaque rigide, l'ensemble cadre métallique et plaque supérieure est fixé sur un socle rigide, de masse importante et sans contact avec son environnement afin de l'isoler de toute vibration extérieure.
La plate-forme est branchée à un ordinateur qui effectue l'acquisition des données et les calculs.
Cette technique vise à explorer le mouvement à partir des forces extérieures qu'il génère. Elle procède du principe fondamental de la mécanique qui explicite l'égalité, à la masse près, entre la résultante des forces extérieures ($\vec{F}$) et la résultante de la quantité d'accélération ($\vec{a}$).

$$\vec{F}=m\vec{a}$$

Lors de l'appui au sol, le sujet subit principalement l'action de deux forces extérieures :

- son propre poids, produit de sa masse (m) par l'accélération due à la pesanteur (g), selon la 2^{e} loi du mouvement de Newton :

$$P = mg$$

- la force de réaction du sol (R). Il s'agit d'une force égale en grandeur, qui se produit en direction opposée à la force d'action (F). Ce phénomène est la manifestation de la 3^{e} loi de Newton qui énonce que lorsque deux corps sont en contact, toute action de l'un engendre une réaction de l'autre, égale et en sens contraire.

$$R = - F$$

Les forces de réaction entre le sol et les pieds sont mesurables par le plateau de forces.
En fait, lorsqu'un coureur effectue un appui sur la plate-forme, la force d'action F est la résultante des forces d'actions élémentaires, ensemble des points de contact de l'athlète sur le plateau de forces.

Les données de la plate-forme traduisent la relation directe entre les forces extérieures et les accélérations du centre de masse de l'individu.

A chaque instant de l'appui, la force d'action du sujet est tributaire des forces internes dues aux muscles et aux tendons de chaque articulation.
L'action d'un troisième type de force extérieure, les forces de frottements dues au fluide environnant et à la surface de contact, est le plus souvent négligée dans les conditions de mesure en laboratoire, mais elle peut devenir déterminante dans certaines études portant sur l'aérodynamique du matériel ou sur les types de sol, par exemple.
Certains mouvements sportifs comme la course, la marche, le saut en longueur se prêtent bien à une analyse en deux dimensions. Dans ce cas, on se limite à étudier le geste dans le plan sagittal (plan principal du mouvement) et à mesurer les forces verticales et antéro-postérieures en négligeant les forces médio-latérales.
Quand un sujet est immobile sur une plate-forme de forces, la seule action qu'il produit est une force verticale dirigée vers le sol. La résultante de cette force s'exerce au centre de masse du sujet et correspond à son poids de corps qui est mesuré par la plate-forme comme le ferait une balance
Les forces de réaction (en Newton) sont représentées en fonction du temps, comme le montre la figure 1-2 qui présente les forces de réaction mesurées selon les 3 axes, au cours d'un sprint.

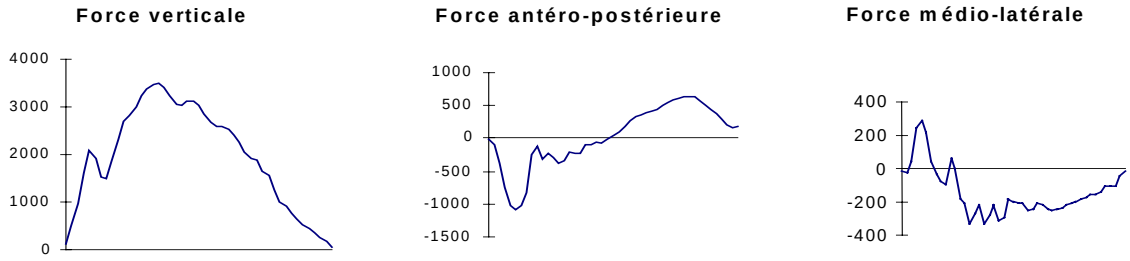


Figure 1-1 : Forces de réaction mesurées au cours d'un appui à 40m de course

La plate-forme de forces permet également d'accéder à d'autres paramètres comme les impulsions de translation ou variation de quantité de mouvement. L'impulsion de translation dépend de la grandeur de la force exercée et de son temps d'application, selon la relation :

$Ft = m \Delta V_G$ où m est la masse et V_G la vitesse du centre de masse

Elle nous est donnée par le calcul de la surface de la courbe comprise entre les cordonnées et l'axe des temps. L'impulsion produite au cours de l'appui au sol s'exprime en N.s et est calculée pour chacun des trois axes.

Si la plate-forme de forces permet d'obtenir des indices globaux relatifs aux forces s'exerçant au niveau du centre de masse général du corps (elle permet entre autres la mesure du temps d'appui, des forces exercées selon les trois directions de l'espace et des trois moments de force), elle ne donne pas d'information sur les actions segmentaires. Pour une connaissance approfondie du mouvement, il est judicieux d'associer une analyse de type cinématique (enregistrement vidéo), à l'étude des forces en action.

Autre outil pour l'analyse des forces

Figure 1-1 : Starting-blocks et contacteurs mains

Ne possédant qu'une plate-forme de forces et celle-ci étant trop courte, nous avons opté, lors de l'étude du départ, pour l'enregistrement du premier appui après la sortie des starting-blocks. Néanmoins, nous souhaitions recueillir des informations sur le temps de réaction du sprinter et sur ses poussées sur les blocs. Nous avons donc conçu un starting-block muni de capteurs de forces sensibles aux forces horizontales afin de recueillir les poussées horizontales exercées par l'athlète sur les blocs arrière et avant.
Les blocs ont été modifiés. Ils se prolongent par une plaque métallique vers l'avant de manière à ce que l'athlète ne pose aucune partie de son pied au sol, et ceci afin de ne rien perdre des forces horizontales (figure 1-3).

Partie cinématique

La description cinématique consiste à repérer des points particuliers du corps pour analyser les variables de temps et d'espace du mouvement étudié. Le choix de ces points-cibles dépend bien sûr de ce que l'on veut analyser. De telles représentations espace-temps sont déjà couramment utilisées par les entraîneurs, c'est le cas par exemple de la poulaine.

La vidéo

L'image vidéo étant le support de notre analyse cinématique du mouvement, les prises de vue sont réalisées en format vidéo grand public à 25 images par seconde mais avec une vitesse d'obturation très rapide au 1000^{e} de seconde afin que l'arrêt sur image reste net même pour des mouvements très rapides. Ces images seront ensuite détramées pour obtenir une vitesse de 50 images par seconde.

Figure 1-1 : Calibration de la plate-forme, calibration de l'espace et emplacement des mires

La tenue des sprinters
Il faut impérativement avoir une tenue moulante et noire sans bande blanche, et garder le maximum de parties du corps nues si les athlètes sont noirs pour obtenir le plus grand contraste possible avec les cibles et le minimum d'erreur due aux glissements des cibles par rapport à leur emplacement initial. Les pointes doivent être sombres sans bande (figure 1-4).

Les cibles
Ce sont des ronds de 4cm de diamètre, placés aux différentes articulations selon le modèle anthropométrique de Winter, en matière réfléchissante pour bien les distinguer à la lecture (figure 1-4).

L'environnement
Un local a été installé au bord de l'espace d'expérimentation de manière à laisser tout le matériel sur place tout en le sécurisant. Il a été peint en noir pour ne pas perturber l'enregistrement des images vidéo. L'électricité a été installée à l'intérieur. Ce dispositif permet un gain de temps considérable sur le temps d'installation global et facilite donc le passage de plus nombreux athlètes. Des rideaux sont posés sur les vitres pour éviter l'entrée du jour dans le champs de prise de vue.
La scène est éclairée pour faire ressortir les cibles. L'espace d'expérimentation est cadré selon le plan ci-dessous (figure 1-5). L'espace est également calibré avant chaque test pour passer des mesures en pixels aux mesures en mètre et tenir compte du parallaxe. La calibration s'effectue grâce à douze points fixes placés au sol et sur des poteaux selon le schéma ci-dessous.

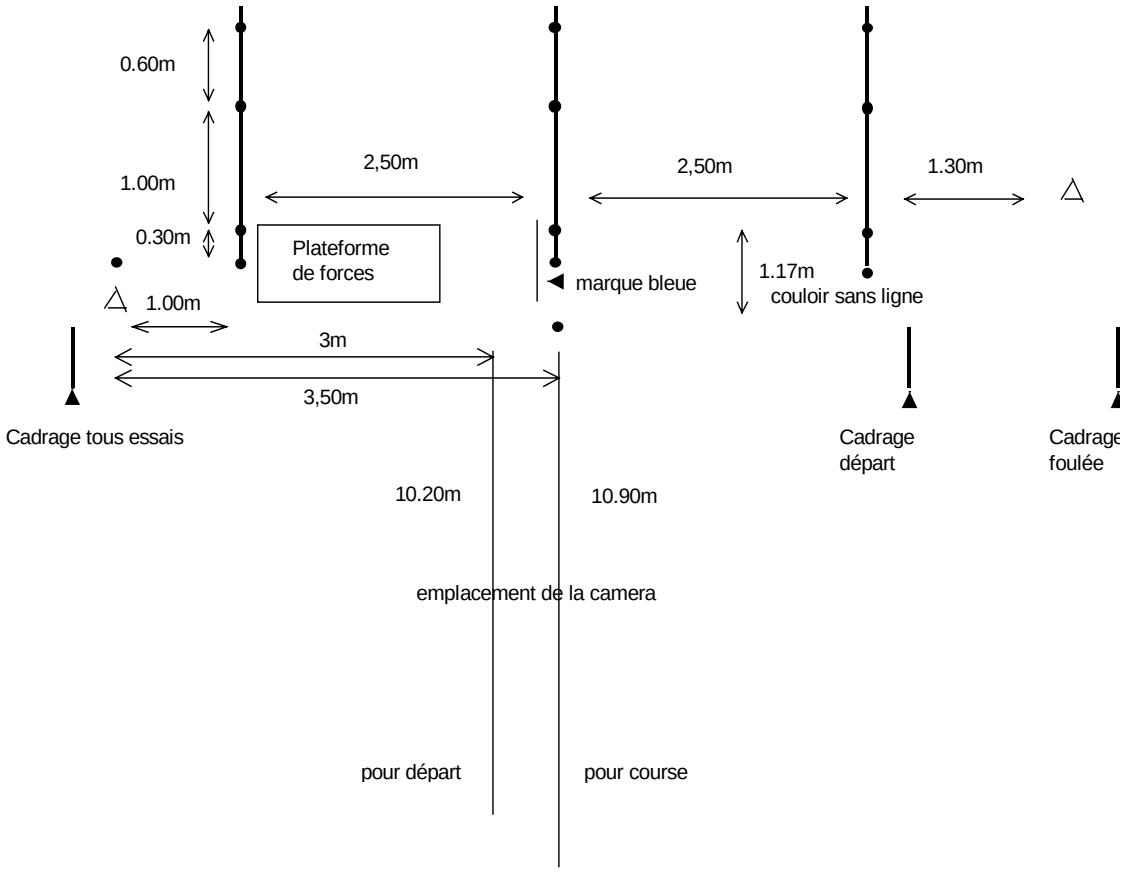


Figure 1-1 : Plan métrique de l'espace d'expérimentation

Outils servant spécifiquement à dater et à stocker les informations

Ordinateur
Toutes les données sont directement stockées dans l'ordinateur. Il est relié à un boîtier de connections (composé de onze voies), lui-même relié à deux amplificateurs (un comprenant quatre voies pour le bloc de départ et les contacts mains, et l'autre comprenant six voies pour la plate-forme de forces), ainsi qu'au clap de départ.

Boîtier de connections
Il permet que tous les signaux émanant des différents appareils soient enregistrés en même temps par la carte d'acquisition de la plate-forme. Cette carte comprend un nombre supérieur de voies qu'il est nécessaire pour la plate-forme.

Boîtier de déclenchement
Le début d'une acquisition, c'est à dire le début de l'enregistrement des informations, peut s'obtenir de deux manières différentes ou couplées :

- soit au signal du clap de départ
- soit au déclenchement de la plate-forme de forces

C'est le boîtier de déclenchement qui permet de choisir entre ces trois possibilités. La troisième qui est de coupler les deux premières permet, pour un même essai, d'obtenir deux acquisitions différentes. Ainsi, nous pouvons obtenir des données au départ concernant les blocs et les contacteurs mains par une première acquisition et ensuite des données dynamiques sur la foulée à pleine vitesse lors du passage sur la plate-forme de forces par une seconde acquisition.

Figure 1-1 : Cellule pour l'arrêt du chronomètre

Clap de départ
C'est un ensemble constitué de deux plaques liées ensemble, muni de poignées et d'un micro. Il produit un son bref et fort qui déclenche le chronomètre. Il donne le zéro temporel, lequel nous est indispensable pour :

- calculer le temps de réaction des athlètes au départ
- dater l'instant de lever des mains de la position en starting-blocks
- dater la pose du premier appui de course
- donner le temps à 10m ou à 50m qui constitue un indice de la performance de l'essai.

Il produit un signal électrique enregistré par l'ordinateur. Il permet donc également la synchronisation de l'ensemble des autres signaux enregistrés.

Chronomètre au millième
Il démarre au clap de départ et s'arrête par rupture d'un faisceau lumineux lorsque l'athlète franchit la ligne d'arrivée des 10 m ou 50 m de course. Il donne donc un temps électrique pour ces distances.

Cellule
Elle est amovible et réglable en hauteur, elle détecte la présence d'un faisceau lumineux provenant d'une lampe torche. La rupture du faisceau lumineux au passage de l'athlète arrête le chronomètre (figure 1-6).

Contacts mains
Sans donner les forces exercées sous les mains, ces contacts produisent un signal électrique lorsque les mains ne les chargent plus, ce qui permet de dater séparément le lever de chaque main.

Pour une meilleure	**Vidéo (Technique)**	**Tenue**	**Cibles**	**Environnement**
Mesure	Détramage (passer de 25i/s à 50i/s)	Combinaison moulante ou parties du corps nues (cibles en place)	Respect de l'emplacement en fonction du modèle anthropométrique choisi	Calibration et cadrage
Lecture des données	Vitesse d'obturation rapide (arrêt sur l'image net)	Tenue noire (bon contraste)	Réfléchissantes (bon contraste)	Fond noir et éclairage (bon contraste)

Tableau 1-1 : Précautions méthodologiques pour l'analyse cinématique

Les outils de traitements

Nous utilisons des logiciels dont certains sont de plus en plus faciles d'accès. La connaissance de leurs principes de fonctionnement, l'utilisation de certaines fonctions et la lecture des documents qu'ils produisent sont des connaissances indispensables pour l'analyse du mouvement.
Nous distinguons deux grands types de systèmes. Les systèmes d'analyse différée, qui utilisent un stockage préalable des données comme l'image à l'aide d'une bande et que nous analysons après. Les systèmes en ligne qui font un pré-traitement des données au moment de leur acquisition et qui stockent à la fois les données brutes et certaines données déjà calculées.

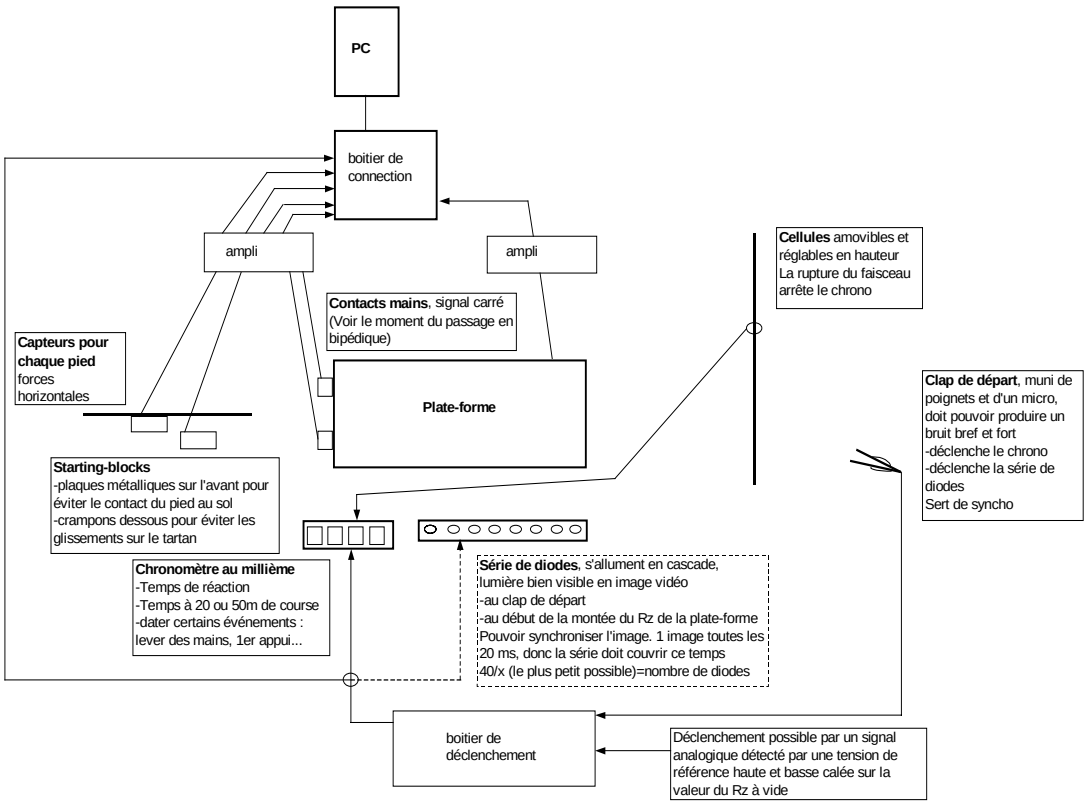


Figure 1-1 : Schéma de liaison entre les différents appareils

Les systèmes informatiques pour le traitement dynamique
Ils nous permettent de calculer dans un premier temps les forces qui s'exercent sur l'ensemble du corps.
Cette démarche peut être simplifiée grâce à l'utilisation de logiciels courants ou spécifiques, un des logiciels courants utilisés est Excel. Elle s'effectue de la manière suivante :

- enregistrement des fichiers informatiques de la plate-forme
- sortie d'une feuille de résultats intégrés au logiciel de la plate-forme comportant certains calculs comme les impulsions et exportation de l'ensemble des données brutes
- traitement des données brutes avec Excel
- établissement d'une feuille de résultats fournie à l'entraîneur (voir annexes)
- compilation de l'ensemble des résultats pour moyennage, comparaison et discussion

Les systèmes informatiques pour le traitement cinématique
La plupart des logiciels utilisés permettent de calculer et de visualiser les variables cinématiques choisis.

Il s'agit tout d'abord de voir le mouvement au travers d'une reconstitution animée de celui-ci. Cette reconstitution se fait sous forme « fil de fer » après avoir récupéré les coordonnées de l'ensemble des cibles. Cette simple reconstitution présente déjà plusieurs avantages visuels intéressants pour l'entraîneur : la trace du mouvement (kinogramme), l'accélération ou le ralentissement du mouvement, la trajectoire d'un point selon un référentiel absolu ou selon un référentiel relatif autour d'un point de son choix et enfin des variations angulaires entre deux segments ou entre un segment et un axe. Elle permet ensuite d'effectuer le calcul d'autres grandeurs cinématiques (vitesses linéaires ou angulaires…). On peut aussi lui appliquer un modèle anthropométrique que l'on aura préalablement choisi, et ainsi étudier le mouvement des centres de masse segmentaires ou global.

La représentation la plus simple concerne la variation temporelle de la position d'un point (par exemple le déplacement de la hanche sur l'axe horizontal). Puis par dérivation et après filtrage, on peut calculer et représenter la variation d'une composante de la vitesse en fonction du temps. La précision étant insuffisante nous ne nous autoriserons pas à calculer les accélérations.
On peut visualiser aussi la trajectoire de différents points du corps dans différents référentiels, ce qui permet notamment de tracer la « poulaine » et d'effectuer des calculs sur celle-ci…

Les logiciels utilisés sont au nombre de quatre :

- Le premier que l'on utilise est Adobe qui permet de dialoguer avec la carte à numériser les images et à les détramer.

Les trois suivants font partie d'un ensemble appelé 3 D vision développé par Gilles Dietrich spécifiquement pour l'analyse vidéo.

- Le premier logiciel est SNAP qui permet de récupérer les coordonnées, selon les axes vertical et antéro-postérieur, des cibles posées sur l'athlète. Cette phase suppose de traiter environ 60 images pour une séquence vidéo allant de la sortie des blocs jusqu'au 3ème appui et environ 30 pour l'appui à pleine vitesse et un cycle complet de jambe.
- Le deuxième logiciel est DYNAVIEW qui permet de calculer et de visualiser les courbes de déplacement de chaque marqueur, il permet aussi au préalable de choisir un filtrage du signal avec une fréquence de coupure adéquate. Il permet également, par dérivation de calculer les vitesses de déplacement de ces marqueurs…
- Le troisième logiciel est WIEW 3D, il permet de visualiser le mouvement en représentation « fil de fer », mais on peut aussi faire un certain nombre de calculs comme appliquer une modélisation pour calculer les centres de masse segmentaires ou le centre de masse global. Le modèle anthropométrique que nous avons utilisé est celui de Winter.

Figure 1-1 : Installation dans le starting-block

Protocole et population étudiée

Protocole

Les tests s'effectuent, premièrement en début de saison avec un minimum d'entraînement, deuxièmement avant la fin de sa saison.
En effet, les données ne sont fiables qu'à la condition que l'athlète ait pratiqué deux mois d'entraînement pour respecter le protocole sans risque d'accident ou de grande fatigue, mais également pour que ses résultats puissent être comparés avec ceux des meilleurs sprinters actuels.

L'expérimentation se déroule selon le protocole suivant :

- **Fiche de renseignement du sujet**

Nous établissons une fiche qui prendra en compte : le nom, la taille, la longueur de jambes, le poids, la performance réalisée la saison dernière du sprinter (voir en annexe). Cette fiche permettra de normaliser les données et de comparer les athlètes entre eux.

- **Préparation de l'athlète**

La préparation de l'athlète dure au moins 30 minutes, temps auquel il faut ajouter le temps nécessaire à l'échauffement de l'athlète. Elle consiste en :

- habillage (choix de la tenue noire la plus ajustée possible, « emballage » des pointes par recouvrement des parties claires ou fluorescentes de scotch noir)
- pose des cibles (17 sur l'athlète)
- réglage des starting-blocks (quel pied devant, quel écart entre les blocs, quelle distance à la ligne de départ ?)
- mesures (taille, longueur de jambe, longueur des segments de cible à cible)

- **Départ en starting-blocks**

L'athlète règle les starting-blocks et les contacts mains en fonction d'une ligne de départ placée juste devant la plate-forme de forces (figure 1-8).
Le test consiste en 5 courses départs en starting-blocks sur 10 mètres avec pose du premier appui sur la plate-forme (figure 1-9). L'athlète effectue une récupération totale entre les essais

pour que les tests soient fait sans effet de fatigue et que nous analysions des essais à 100% du potentiel du moment de l'athlète. On préconise de prendre au moins 3 minutes de repos entre chaque série.
Le cadrage vidéo permet d'étudier certains paramètres sur la posture dans les blocs, la sortie des blocs et les trois premières foulées.

Figure 1-1 : Sortie des blocs et pose du premier appui sur la plate-forme

- **Foulée à pleine vitesse**

Le cadrage permet d'étudier un cycle de jambe complet.
Le test consiste en 5 courses chronométrées à vitesse maximale, départs en starting-blocks sur 50 mètres avec pose d'un appui à 40 m sur la plate-forme.
La récupération est encore très importante mais cette fois ci plus longue (6 minutes).
Pour analyser la foulée à pleine vitesse, il faut également que sur la distance de 50 m qui a été retenue, le pied droit passe sur la plate-forme afin que nous puissions coupler la prise de vue vidéo et les données dynamiques de la plate-forme de forces.

Le cycle de jambe, défini temporellement par l'intervalle entre deux positions successives identiques, par exemple de l'instant du posé du pied droit jusqu'au posé du pied droit suivant, nous intéresse parce qu'un seul cycle peut caractériser une allure régulière de course, sachant qu'il se répète à l'identique.

La population étudiée

Nom des hommes	Nombre de tests	Entraîneur	Nom des femmes	Nombre de tests	Entraîneur
B. A.	1	Cazier M.C.	B. P.	1	Bily L.
B. J.	2	Cazier M.C.	D. D.	1	Bonvin P.
C. F.	1	Bonvin P.	N'K. G.	1	Bonvin P.
G. M.	1	Verzier J.	G. F.	2	Cazier M.C.
G. R.	1	Maizetti J.	M'B. S.	1	Bonvin P.
G. R.	1	Cazier M.C.	M. E.	1	Bonvin P.
G. N.	1	Verzier J.	O. M.	1	Bonvin P.
H. D.	2	Bonvin P.	R. K.	1	Bonvin P.
J. S.	1	Verzier J.	R. S.	3	Bonvin P. et Cazier M.C.
L. O.	2	Cazier M.C.	S. O.	1	Bily L.

M.-E.	2	Cazier M.C.			
M. A.	3	Verzier J.			
S. B.	3	Bonvin P.			
T. J.C.	1	Maizetti J.			
V. F	1	Bonvin P.			
W. B.	1	Verzier J.			

Tableau 1-2 : Sprinters ayant participé aux tests

Seize sprinters et dix sprinteuses ont participé à la mise en place de ce protocole expérimental. Cinq entraîneurs ont travaillé avec nous sur ce dispositif avec un total de trente-huit séries de tests (tableau 1-2).

Tous sont expérimentés, ils sont venus entre une et trois fois.

	Hommes Moyenne (écart-type) Extrêmes	**Femmes** Moyenne (écart-type) Extrêmes
Performance sur 100m (s)	M = 10,64 (0,31) De 10,19 à 11,04	M = 11,69 (0,23) De 11,23 à 12,04
Age (années)	M = 23,91 (3,16) De 17 à 32	M = 21,89 (4,23) De 18 à 31
Taille (m)	M = 1,81 (0,06) De 1,72 à 1,90	M = 1,71 (0,04) De 1,64 à 1,77
Poids (kg)	M = 76,73 (9,27) De 60,2 à 94,4	M = 61,3 (5,24) De 54,2 à 70,9
Longueur jambe (m)	M = 1,08 (4,2) De 1,02 à 1,16	M = 1,02 (3,8) De 0,96 à 1,06

Tableau 1-3 : Caractéristiques des sprinters

Ces athlètes ne constituent pas une population tout à fait homogène (tableau 1-3). C'est pourquoi, parmi les hommes nous distinguerons deux niveaux d'expertise et que bien sur les hommes seront séparés des femmes. C'est pourquoi aussi, certains des paramètres seront donnés en valeur normalisée, en fonction de la taille, du poids, et même de la longueur de jambe, ceci permettra de comparer leurs mesures malgré les différences morphologiques individuelles et donc de voir si nous relevons des organisations ou des coordinations inter-segmentaires qui sembleraient plus efficaces pour la performance.

Les paramètres étudiés

Nomenclature

Paramètres de temps (s)

t_0 : temps au signal de départ
t_{br} : temps à la sortie du bloc arrière (rear)
t_{bf} : temps à la sortie du bloc avant (front)
t_l : temps au début de l'appui (landing)
t_{Rz1} : temps au premier pic de la force verticale
t_{Rzmax} : temps au pic maximum de la force verticale
t_{Rx+} : temps à la valeur maximale de propulsion
t_{Rx-} : temps à la valeur maximale de freinage
$t_{x-,x+}$: temps au passage freinage-propulsion (durée de freinage)
t_{t-o} : temps à la fin de l'appui (take-off)
t_{l2} : temps au début du deuxième appui
t_{l3} : temps au début du troisième appui
ΔtA : durée de l'appui
(n) après un paramètre de temps indique que le temps est normalisé en pourcentage du temps d'appui

Paramètres de longueurs (m)

Lj : longueur des jambes
T : taille
dz : distance verticale de la pointe du pied au centre de masse
dx : distance horizontale de la pointe du pied à la projection du centre de masse
dxli : distance horizontale du centre de masse à la ligne de départ
dxbr : distance horizontale du bloc arrière à la ligne de départ
dxbf : distance horizontale du bloc avant à la ligne de départ
difdxb : distance horizontale entre les blocs
dhx : distance horizontale de la pointe du pied à la projection de la hanche
dGxA : distance horizontale parcourue par le centre de masse au cours de l'appui
dzPou : distance verticale minimum du pied à l'horizontale de la hanche dans la Poulaine
dxPou : distance horizontale maximum du pied dans la Poulaine
%rPou : pourcentage en arrière de la distance horizontale maximum du pied dans la Poulaine
dxGri : distance horizontale entre la position la plus antérieure du pied avant le contact et sa position au contact (rend compte de l'action du pied vers l'arrière avant l'appui)
indGri : rapport (exprimé en %) de l'amplitude du « griffé » (dxGri) sur la distance maximale du pied vers l'avant avant le contact
Oscz : oscillation verticale pic à pic du centre de masse
ΔGz : augmentation verticale de centre de masse entre le premier et le second appui
Lc1 : longueur du 1° cycle de course (longueur de sortie de bloc du pied arrière)
Ls1 : longueur de la première foulée (stride)
Ls2 : longueur de la deuxième foulée
Ls3 : longueur de la troisième foulée
Lc2 : longueur du deuxième cycle de course
Lc½ : longueur d'un demi-cycle de course à pleine vitesse (amplitude moyenne de deux foulées)

Paramètres de fréquence (Hz) et de vitesse (m/s)

f : fréquence de foulée à pleine vitesse
VmA : vitesse moyenne du centre de masse à l'appui
VmaxPou : vitesse maximale de retour du pied par rapport à la hanche
$VPout_l$: vitesse du pied par rapport à la hanche au contact

Paramètres d'angles (°)

α1 : angle cuisse-vertical de la jambe d'appui (hanche)
α'1max : angle maximum cuisse-vertical de la jambe libre
extα1 : angle parcouru par la cuisse d'appui au cours de l'appui
α2 : angle cuisse-jambe de la jambe d'appui (genou)
α2min' : angle minimum de la jambe d'appui pendant le retour (lorsqu'elle est libre avant l'appui étudié)
flexα2 : flexion de la jambe d'appui au cours de l'appui
extα2 : extension de la jambe d'appui au cours de l'appui
indα2 : indice d'extension de la jambe d'appui (rend compte de l'allure de la courbe, rapport d'extension au tiers de l'appui sur l'extension totale pendant l'appui)
α'2max : angle maximum cuisse-jambe de la jambe libre
α'2min : angle minimum cuisse-jambe de la jambe libre pendant retour
flexα'2 : flexion de la jambe libre pendant le retour
α3 : angle jambe-pied de la jambe d'appui (cheville), (flex, ext, min : voir ci-dessus)
α4 : angle entre les cuisses (max : voir ci-dessus)
α5 : angle jambe-horizontale sol de la jambe d'appui
α6 : angle tronc-verticale debout
rdT : redressement total du tronc de la position en blocs jusqu'au troisième appui
rdt_{br} : redressement du tronc de la position en blocs jusqu'à la sortie du bloc arrière
rdt_{bf} : redressement du tronc de la sortie du bloc arrière jusqu'à la sortie du bloc avant
rdt_l : redressement du tronc de la sortie du bloc avant jusqu'au premier appui
rdt_{l2} : redressement du tronc du premier appui jusqu'au second appui
rdt_{l3} : redressement du tronc du second appui jusqu'au troisième appui
(') après un α indique qu'il s'agit de la jambe libre (opposée à l'appui étudié)
(') après un indice indique qu'il s'agit de la jambe d'appui étudiée mais lorsqu'elle est libre

Paramètres de forces (N) et d'impulsions (N.s)

P : poids
Rz1 : premier pic de la force verticale (choc d'impact)
Rzmax : pic maximum de la force verticale
Rx^+ : pic maximum de la force horizontale (propulsion)
Rx^- : pic minimum de la force horizontale (freinage)
ImpRz : impulsion verticale
$ImpRx^+$: impulsion de propulsion
$ImpRx^-$: impulsion de freinage
ImpRx : impulsion horizontale nette (différence entre impulsions de propulsion et de freinage)
(n) après un paramètre de force indique que la force est normalisée en nombre de fois le poids du corps
(n) après un paramètre d'impulsion indique que l'impulsion est normalisée en nombre de fois le poids du corps multiplié par 1000

Présentation des paramètres

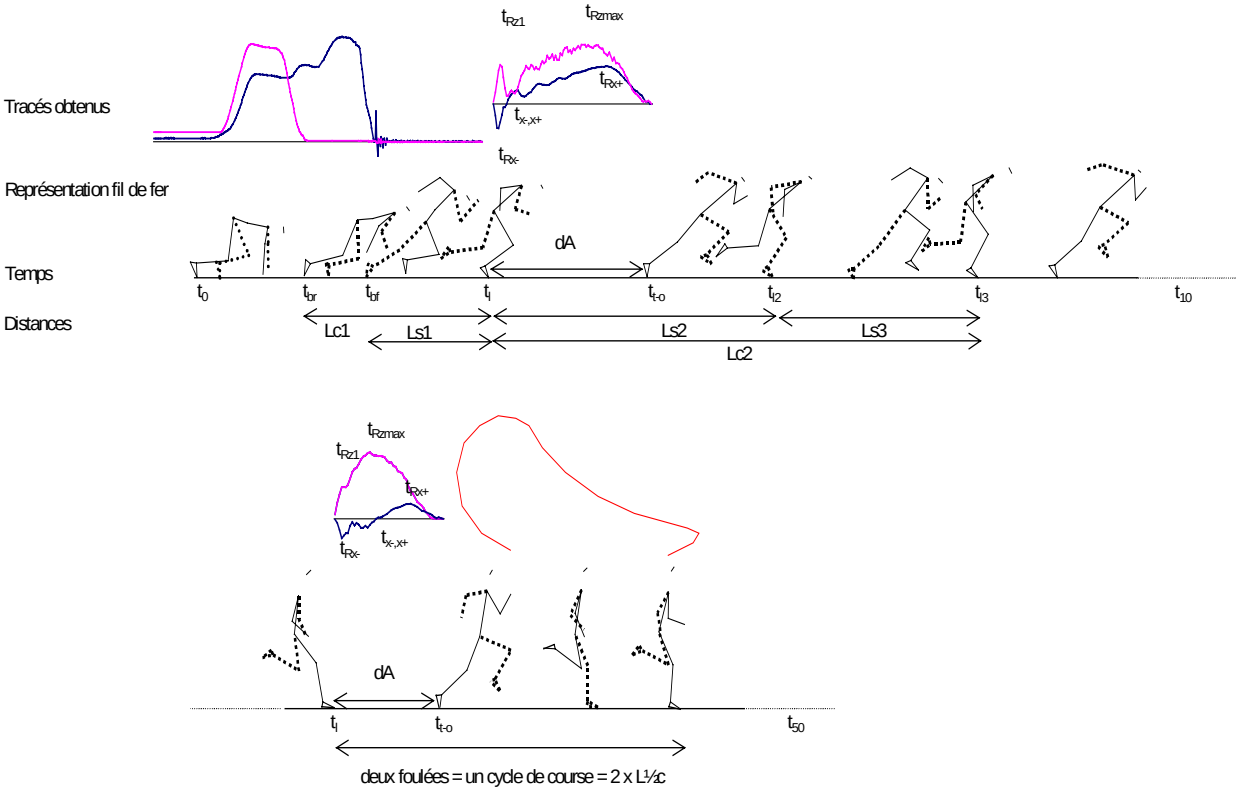


Figure 1-1 : Schéma des phases de course étudiées

Sur la figure 1-10 sont représentées les deux phases de la course que nous étudions, en haut, la sortie des blocs suivie des premières foulées et, en bas, l'appui à pleine vitesse suivi d'un cycle de jambe complet. Au-dessus des kinogrammes sont ajoutés les tracés typiques que nous obtenons. Tout d'abord, les forces de poussées horizontales sur les blocs, puis les forces verticale et antéro-postérieure au premier appui, puis les mêmes forces à l'appui à pleine vitesse et enfin, le tracé de la poulaine au cours d'un cycle de jambe.

En dessous des kinogrammes sont représentés les indices de temps et de longueurs. Il faut remarquer que certains paramètres porteront le même nom qu'il s'agisse du premier appui ou de l'appui à pleine vitesse. Ceci permettra de faciliter la comparaison de ces deux phases.

Figure 1-2 : Paramètres du tracé de la courbe Rx

Sur la force qui s'exerce dans le plan du mouvement (figure 1-11), nous relevons les deux pics, le pic négatif ou pic de freinage et le pic positif ou pic de propulsion, les temps auxquels ces pics surviennent, les impulsions négative et positive, c'est à dire la force pendant le temps qu'elle s'exerce (représentées graphiquement par la surface entre la ligne de base et la courbe), le temps où l'impulsion négative devient positive et l'impulsion nette qui est la différence entre l'impulsion de propulsion et l'impulsion de freinage. Il faut noter que si la vitesse moyenne était vraiment constante, cette impulsion nette serait nulle, l'impulsion positive compensant exactement l'impulsion négative.

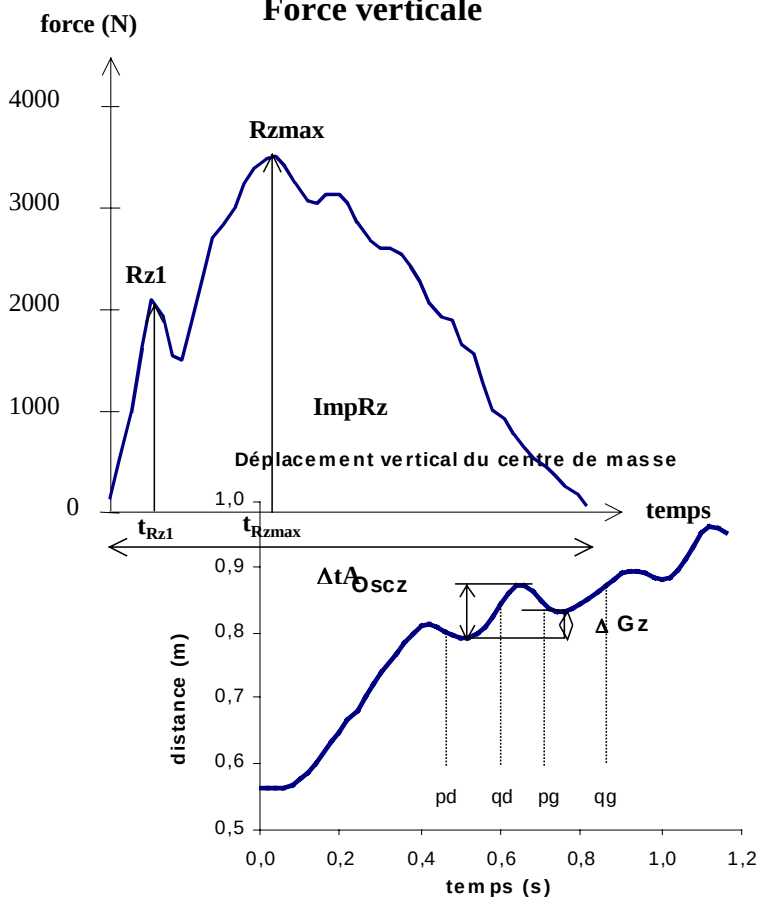
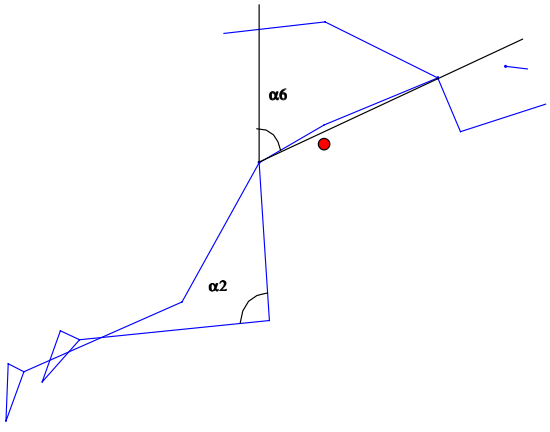


Figure 1-3 : Paramètres du tracé de la courbe Rz

Sur la force qui s'exerce dans le plan vertical (figure 1-12), nous relevons les deux pics, le premier pic qui correspond au choc produit par le pied lors de son entrée en contact avec le sol et le pic maximum, les temps auxquels ces pics surviennent, l'impulsion verticale, c'est à dire la force pendant le temps qu'elle s'exerce (représentée graphiquement par la surface entre la ligne de base et la courbe), et la durée de l'appui qui est obtenu ici avec une bien meilleure précision que d'après les images.

Figure 1-4 : Déplacement vertical du CM au départ

Le déplacement vertical du centre de masse au cours de différents appuis (figure 1-13) rends compte d'une oscillation du corps, celui-ci s'abaissant à chaque pose de pied et s'élevant à chaque fin de poussée et suspension. Mais, au départ, le décalage vertical de cette même oscillation au cours des premières foulées rend aussi compte du redressement du sprinter dans son ensemble.



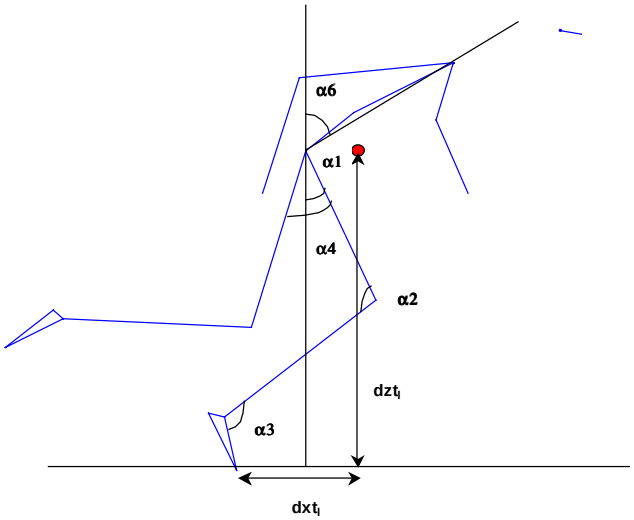
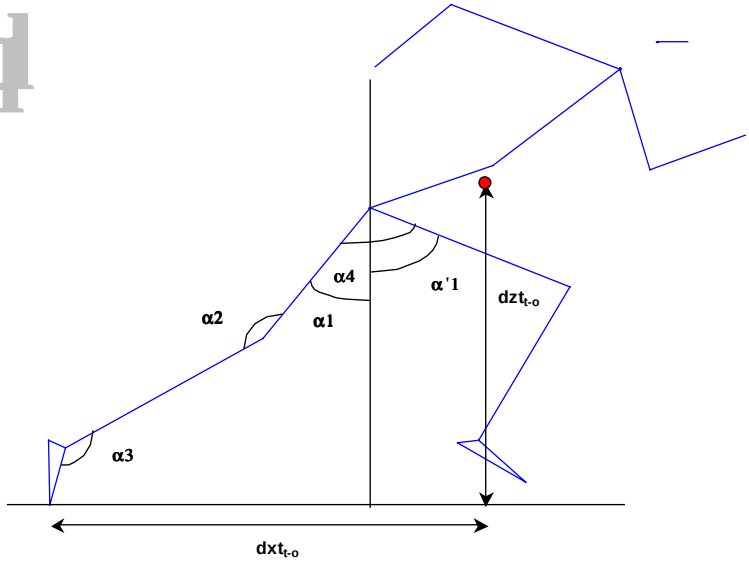


Figure 1-5 : Angles à la sortie du bloc avant

Les mêmes angles sont relevés à différents instants au cours de l'appui, mais pour analyser le départ (figure 1-14), on retient plus particulièrement l'angle que forme le tronc avec la verticale. Un angle nul correspondrait à un buste totalement droit. L'évolution de cet angle de



la position dans les blocs jusqu'au troisième appui permet d'analyser le redressement du sprinter. Un deuxième angle nous intéresse c'est l'angle minimum du genou de la jambe arrière (donc celle qui va effectuer le premier appui).

Figure 1-6 : Paramètres cinématiques au début de l'appui

La phase d'appui est particulièrement riche en informations puisque nous pouvons coupler les données cinématiques avec les données dynamiques.

Nous retrouvons ici l'angle du genou, l'angle du tronc avec la verticale (pour le premier appui qui est représenté sur la figure 1-15), mais aussi, l'angle de la cheville, l'angle de la cuisse avec la verticale et l'angle formé entre les deux cuisses (qui sont négatifs ici puisque les rotations viennent de s'effectuer dans le sens contraire du mouvement). Nous étudions également les distances verticale et horizontale du centre de masse au pied. L'angle du genou de la jambe libre est aussi regardé au cours de l'appui mais également avant l'appui, son maximum en quittant le bloc, son minimum avant que la cuisse ne passe à la verticale (ce qui donne un indicateur indirect de la hauteur du pied vers la hanche en arrière), et son minimum pendant le retour.

1-7 : Paramètres cinématiques au décollement du pied

Les mêmes paramètres que précédemment sont étudiés à la fin de l'appui. Il faut noter que l'angle de la cuisse avec la verticale et l'angle entre les deux cuisses sont ici positifs, c'est-à-dire qu'il ne s'agit pas de la même jambe qui se trouve devant. L'angle maximum que forme la jambe libre avec la verticale est également étudié.

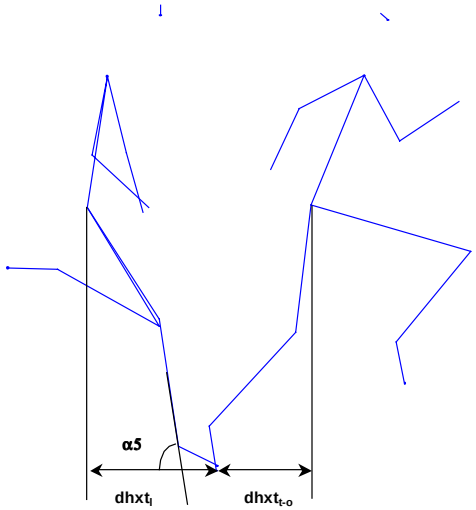
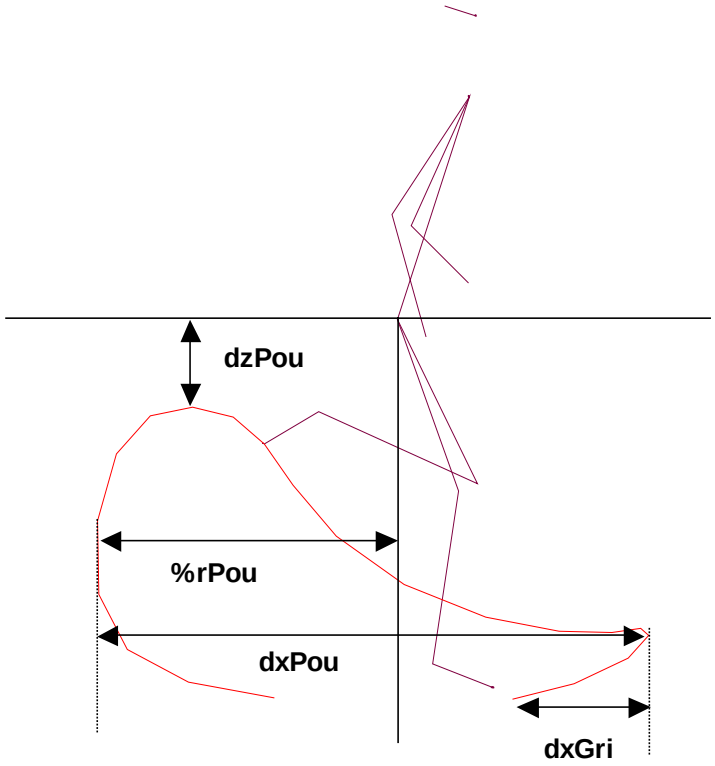


Figure 1-8 : Paramètres cinématiques supplémentaires à l'appui à pleine vitesse

A pleine vitesse est aussi étudiée la distance horizontale du pied à la projection de la hanche au début et à la fin de l'appui, ainsi que l'angle que forme la jambe avec l'horizontale.



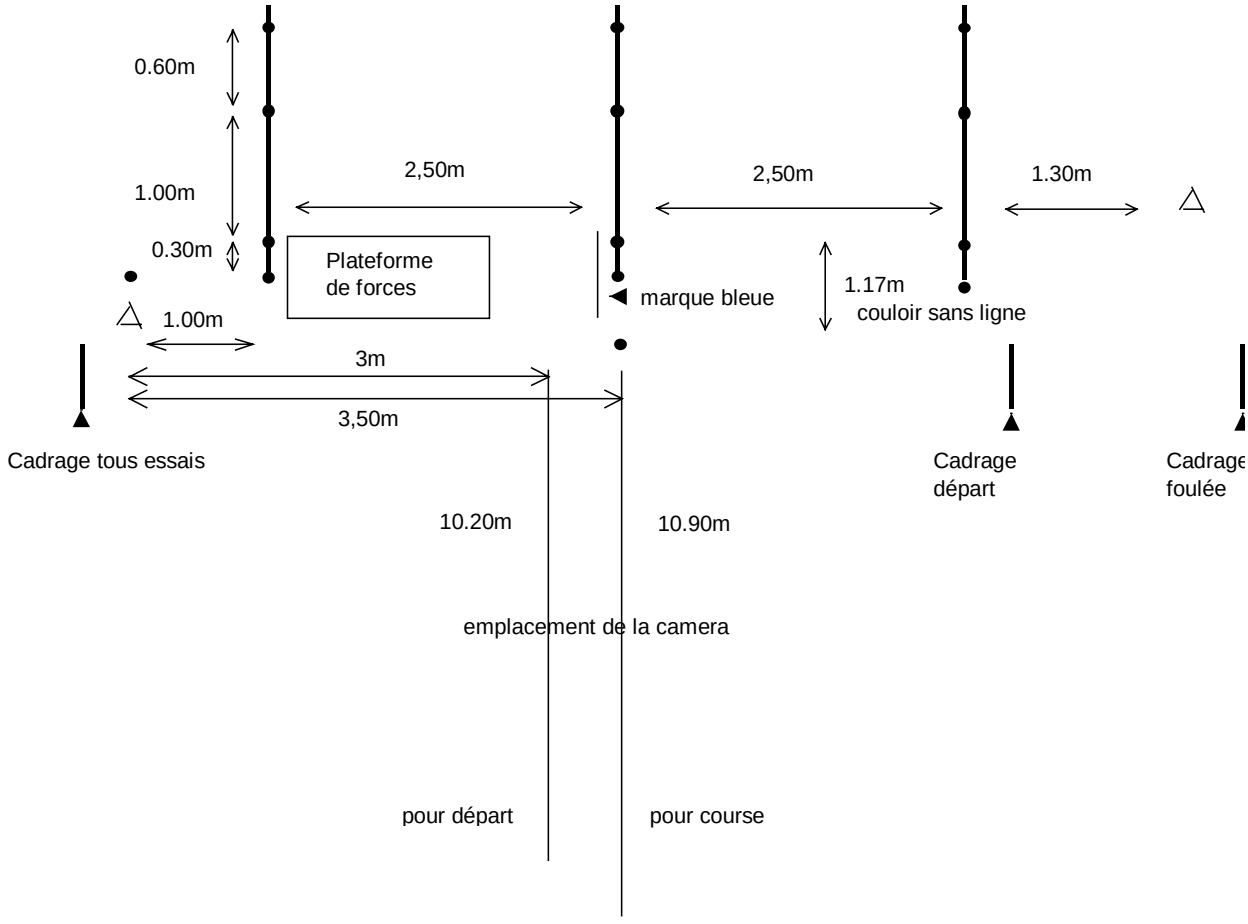
Certains paramètres sont spécifiques du trajet du pied par rapport à la hanche qui devient alors un référentiel mobile. On calcule la distance verticale minimum du pied à l'horizontale de la hanche, la distance maximum horizontale, ainsi que son pourcentage en arrière de la hanche que nous appellerons souvent cycle arrière. Est également calculée la distance horizontale parcourue par le pied lors de son retour vers l'arrière avant le contact, ce qui permet d'apprécier l'amplitude de l'action de « griffé ». Cette représentation donne aussi lieu au calcul de certaines vitesses relatives, comme la vitesse horizontale maximale du pied par rapport à la hanche lors du retour de la jambe et cette même vitesse au moment du contact au sol.
Un indice de « griffé » est calculé et représente dxGri en pourcentage par rapport à l'amplitude horizontale de la poulaine en avant de la hanche.

Annexes

Fiche technique

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES
DATE :.....
SUJETS :.....

Filmer un espace de calibration
9 ½ balles de tennis sur poteaux au centre du couloir+ 4 mires au sol au centre+ 1 mire sur ligne= 14 points



Type de camera	
Vitesse d'obturation	
Eclairages	

Fiche d'expérimentation

Manip du.....
SUJET:.....

DATE NAISSANCE :.....
TAILLE :.....POIDS :.....
LONGUEUR JAMBES (de la crête iliaque) :.....
PERFORMANCES :

60m	100m	Spécialité

PIED AVANT :.....
DISTANCE START AV - LIGNE DE DEPART :.....
DISTANCE START AR - LIGNE DE DEPART :.....
DISTANCE START AV - START AR :.....

DISTANCE DES MARQUEURS (selon Winter)

	Epaule coude	coude poignet	taille hanche	hanche genou 1	genou 1 et 2 cheville	cheville orteils	Cheville sol	oreille yeux
côté D externe								
côté G interne								

1°) cinq départ avec course sur 10m (récupération 3')

- D1 _____
- D2

_____

- D3

_____

- D4

_____

- D5

Récupération

2°) cinq courses de 50m (récupération 6')

- F1 _____
- F2

_____

- F3

_____

- F4

_____

- F5

Fiche de résultats sur les données dynamiques du premier appui

ANALYSE DU 1er APPUI DE COURSE

NOM : **DATE : --**
AGE : // **PERFORMANCES : au 100m ()**
POIDS (Newton) : N (1kg = 9.81N) **SPECIALITE :**

Paramètres	essai 1	essai 2	essai 3	essai 4	Moyenne	Ecart-type
	D	D	D	D		
Temps manuel/électrique 20m (s)					#DIV/0!	#DIV/0!
Temps de l'appui (s)					#DIV/0!	#DIV/0!
Forces verticales (Rz)						
Valeur 1° pic (N)					#DIV/0!	#DIV/0!
Rz1 Norm (x fois P)					#DIV/0!	#DIV/0!
Tps à Rz1 (s)					#DIV/0!	#DIV/0!
Norm (% tps d'appui)					#DIV/0!	#DIV/0!
Valeur maximale (N)					#DIV/0!	#DIV/0!
RzM Norm (x fois P)					#DIV/0!	#DIV/0!
Tps à RzM (s)					#DIV/0!	#DIV/0!
Norm (% tps d'appui)					#DIV/0!	#DIV/0!
Impulsion totale (N.s)					#DIV/0!	#DIV/0!
IT Norm (x fois P*1000)					#DIV/0!	#DIV/0!
Forces antéro-postérieures (Ry)						
Valeur max propuls (N)					#DIV/0!	#DIV/0!
VMP Norm (x fois P)					#DIV/0!	#DIV/0!
Tps à VMP (s)					#DIV/0!	#DIV/0!
Norm (% du tps d'appui)					#DIV/0!	#DIV/0!
Valeur max freinage (N)					#DIV/0!	#DIV/0!
VMF Norm (x fois P)					#DIV/0!	#DIV/0!
Tps à VMF (s)					#DIV/0!	#DIV/0!
Norm (% du tps d'appui)					#DIV/0!	#DIV/0!
Impul propulsion (N.s)					#DIV/0!	#DIV/0!
Impul propul normal					#DIV/0!	#DIV/0!
Impul freinage (N.s)					#DIV/0!	#DIV/0!
Impul freinage normal					#DIV/0!	#DIV/0!
Impulsion totale (N.s) (diff. propul/frein)					#DIV/0!	#DIV/0!
Norm (x fois P) x 1000					#DIV/0!	#DIV/0!
Tps au passage freinage/propulsion					#DIV/0!	#DIV/0!
Norm (% du tps d'appui)					#DIV/0!	#DIV/0!
Poussées blocks						
Temps réaction (compétition) (s)					#DIV/0!	#DIV/0!
TR pied AR (début poussée) (s)					#DIV/0!	#DIV/0!
TR pied AV (début poussée) (s)					#DIV/0!	#DIV/0!
Durée poussée AR (s)					#DIV/0!	#DIV/0!
Durée poussée AV (s)					#DIV/0!	#DIV/0!

Fiche de résultats sur les données cinématiques du premier appui

Fiche de résultats sur les données dynamiques de l'appui à pleine vitesse

INSEP UAM **ANALYSE DE L' APPUI DE COURSE**

ANALYSE DU 1er APPUI DE COURSE **DATE : //**

NOM : **AGE** : // **Perf au 100m** (") **Spécialité** : (")

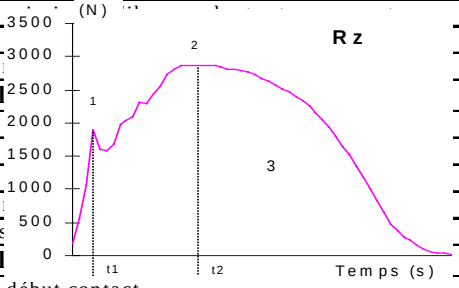
POIDS (N) : N = kg (9.805) **Taille** : m **Longueur jambe** : m

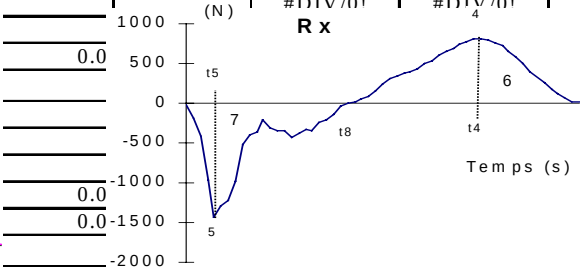
Pied AR = 1er appui **Distance ligne-AR**: 0. **Distance ligne-AV**: 0.

NOM : DATE :

Performance au 100m : AGE :

PARAMETRES	ESSAI 1	ESSAI 2	ESSAI 3	ESSAI 4	Moyenne	E Type
Temps manuel au 10 m (s)	F1	F2	F3	F4	#DIV/0!	
Durée de l'appui (s) (1)					#DIV/0!	#DIV/0!
Poids en Newton (1kg proche de 10N)						
Centre de masse						
Temps manuel au 30 m (s)					#DIV/0!	#DIV/0!
(début contact) distance verticale (m)					#DIV/0!	#DIV/0!
Temps électrique au 30 m (s)					#DIV/0!	#DIV/0!
(début contact) distance horizontale (m)					#DIV/0!	#DIV/0!
Durée de l'appui (s)						
(fin contact) distance verticale (m)					#DIV/0!	#DIV/0!
(fin contact) distance horizontale (m)					#DIV/0!	#DIV/0!
FORCES VERTICALES (Rz)						
Vitesse moyenne au cours de l'appui (m/s)					#DIV/0!	#DIV/0!
Oscillation pic à pic (m)					#DIV/0!	#DIV/0!
Valeur 1er pic (N) : (1)					#DIV/0!	#DIV/0!
Course						
I normalisée (x fois le poids du corps)					#DIV/0!	#DIV/0!
Longueur de pas AR (m) 1er appui					#DIV/0!	#DIV/0!
Temps au 1er pic (s) : (t1)					#DIV/0!	#DIV/0!
Longueur de 1e foulée (m)					#DIV/0!	#DIV/0!
t1 normalisé (en % de la durée d'appui)					#DIV/0!	#DIV/0!
Longueur de 2e foulée (m)					#DIV/0!	#DIV/0!
Valeur maximale (N) 2e pic : (2)		0.000		0.000	0.000	0.00
Redressement du buste					#DIV/0!	#DIV/0!
I normalisée (x fois le poids du corps)					#DIV/0!	#DIV/0!
Temps à la valeur maximale (s) : (t2)					#DIV/0!	#DIV/0!
t2 normalisé (en % de la durée d'appui)					#DIV/0!	#DIV/0!
Impulsion totale (N.s) : (3)					#DIV/0!	#DIV/0!
I normalisée (x fois le PC x 1000)					#DIV/0!	#DIV/0!
angle à pose 2° appui (5)					#DIV/0!	#DIV/0!
angle à pose 2° appui (5)					#DIV/0!	#DIV/0!
FORCES ANTERO-POSTERIEURES (Rx)						
redressement		0.0	0.0	0.0		0.00
redressement départ (1-2)		0.0	0.0	0.0		0.00
Valeur maximale de propulsion (N) : (4)		0.0	0.0	0.0	#DIV/0!	#DIV/0!
redressement départ (2-3)		0.0	0.0	0.0	#DIV/0!	#DIV/0!
I4 normalisée (x fois le poids du corps)		0.0	0.0	0.0	#DIV/0!	#DIV/0!
redressement 1er appui (3-4)		0.0	0.0	0.0	#DIV/0!	#DIV/0!
Temps à la valeur maximale (s) : (t4)		0.0	0.0	0.0	#DIV/0!	#DIV/0!
redressement 2e appui (4-5)		0.0	0.0	0.0	#DIV/0!	#DIV/0!
t4 normalisé (en % de la durée d'appui)		0.0	0.0	0.0	#DIV/0!	#DIV/0!
Valeur maximale de freinage (N) : (5)					#DIV/0!	#DIV/0!
Ligne verticale du C.M. entre 1er et 2e appui (m)				#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
I5 normalisée (x fois le poids du corps)					#DIV/0!	#DIV/0!
Angle cuisse/vertical					#DIV/0!	#DIV/0!
Temps à la valeur maximale (s) : (t5)					#DIV/0!	#DIV/0!
début contact jambe d'appui (1)				#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
t5 normalisé (en % de la durée d'appui)				#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Impulsion de propulsion (N.s) : (6)		0.0	0.0	0.0	#DIV/0!	#DIV/0!
I6 normalisée (fois PC x 1000)				#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Angle genou					#DIV/0!	#DIV/0!
Impulsion de freinage (N.s) : (7)					#DIV/0!	#DIV/0!
I7 normalisée (fois PC x 1000)				#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Impulsion totale (N.s) (diff. propul/frein)				#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Normalisée (x fois le PC) x 1000				#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Temps au passage freinage/propulsion : (t8)				#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
extension au cours de l'appui		0.0	0.0	0.0	#DIV/0!	#DIV/0!
t8 normalisé (en % de la durée d'appui)					#DIV/0!	#DIV/0!
Indice d'extension (1/3)				#DIV/0!	#DIV/0!	
angle max jambe libre				#DIV/0!	#DIV/0!	
angle				#DIV/0!	#DIV/0!	
angle						
flexio						
Angl						
angle						
angle						
angle						
flexio						
extens						
Angl						
angle début contact				#DIV/0!	#DIV/0!	
angle max après appui				#DIV/0!	#DIV/0!	





Fiche de résultats sur les données cinématiques de l'appui à pleine vitesse

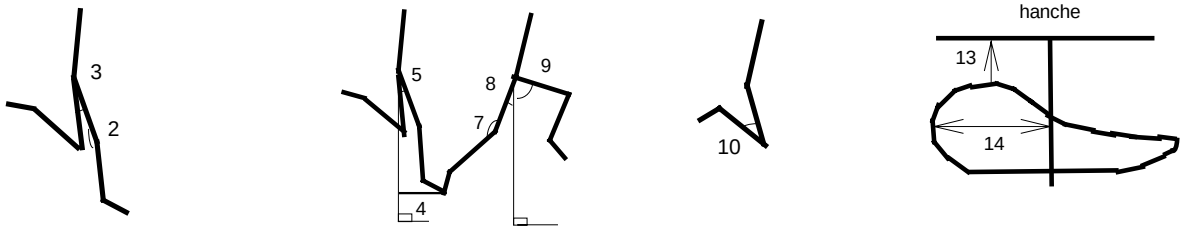
LA FOULEE DE COURSE
RESULTATS DES VARIABLES CINEMATIQUES

CARACTERISTIQUES DU SUJET

Performance au 100m (s) Poids (N) Taille (m)		
Temps manuel au 50m (s) Temps électrique au 50m (s) Durée de l'appui (s) Vitesse moyenne du CG entre 40 et 50m (m/s) Amplitude moyenne entre 40 et 50m (m) Amplitude moyenne / taille Fréquence moyenne entre 40 et 50m		

VARIABLES CINEMATIQUES

Angle genou avant contact (en degrés)		
Angle genou au contact : (2) Angle hanche/verticale au contact : (5) Angle entre cuisses au contact : (3) Distance horizontale/hanche au contact : (4) Vitesse horizontale du pied/hanche au contact		
Angle minimum genou pendant l'appui		
Angle genou au décollement : (7) Angle hanche/verticale au décollement : (8) Angle de la jambe libre au décollement (/vert) : (9)		
Flexion du genou pendant l'appui Extension du genou pendant l'appui Extension de la hanche pendant l'appui Flexion de la cheville pendant l'appui Extension de la cheville pendant l'appui		
Angle maxi entre cuisses après décollement Angle minimum du genou pendant retour : (10)		
Amplitude horizontale de la poulaine Distance verticale minimale pied/hanche : (13) Vitesse maximale du pied/hanche pendant retour % du trajet en arrière de la hanche : (14)		



Bibliographie

Ae, M., Ito, A., Suzuki, M. The men's 100 metres. *IAAF quarterly*, 7, 1, 47-52, 1992.
Armstrong, L.E., Costill, D.L., Gehlsen, G. Biomechanical comparison of university sprinters and marathon runners. *Track Technique*, 87, 2781-2782, 1984.
Baumann, W. Biomechanical analysis of the 100m sprint for women.Women's track and field athletics, The official Report of the First IAAF Congress on Women's *Athletics, Mainz, F R Germany*, 9-11 December 1983, 232-241, 1983.
Baumann, W. Kinematic and dynamic characteristics of the sprint start. *In Komi, P.V. (ed.), Biomechanics V-B, University park press, Baltimore,* 194-199, 1976.
Blader, F. B. The analysis of movements and forces in the sprint start. *Biomechanics I, Ist Int. Seminar Zurich 1967*, 278-281, 1967.
Blickhan, R. The spring-mass model for running and hopping. *J.Biomechanics*, 22 11-12, 1217-1227, 1989.
Borsow, V. Modèle de départ. *Atletika (Tchécoslovaquie) 4, Avril*, 11-12, 1979.
Borsow, V. La position de départ optimale du sprinter. *Legkaya atletikia, URSS 4, l0. Traduction Insep* 301, 1978.

Brand, M., Greiff, H., Theysohn, H., Oberste, W., Nicol, K. Complex investigation of track start. *in Bergmann, G., Kölbel, R., Rohlmann, A. (Eds) Biomechanics : Basic and Applied Research, Martinus Nijhoff Publishers*, 679-684, 1987.
Brenière, Y., Do, M.C. When and how does steady state gait movement induced from upright posture begin? *J. Biomechanics*, 19, 12, l035-l040, 1986.
Brenière, Y., Do, M.C., Sanchez, J.A. Biomechanical study of gait initiation process. *J. Biophys. Med. Nucl*., 5, 197-205, 1981.
Bresnahan, G.T. A study of the movement pattern in starting the race from the crouch position. *Research Quaterly V (supplément)*, 5-11, 1934.
Brüggemann, G. P., Glad, B. Time analyses of the sprint and hurdle events. Scientific research project at the games of the XXIV Olympiad-Seoul 1988-final report. New Studies in Athletics, suppl., 1990.
Cappozzo, A. Force actions in the human trunk during running. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 23, 1, 14-22, 1983.
Cavagna, G.A., Dusman, B., Margaria, R. Positive work done by a previously stretched muscle. *Journal of applied physiology*, 24, 21-32, 1968.
Cavanagh, P. R., Lafortune, M. A. Ground reaction forces in distance running. *J of Biomechanics* 13, 5, 397-406, 1980.
Cavanagh, P. R., Pollock, M. L., Landa, J. A biomechanical comparison of elite and good distance runners. *In P. Milvy (Ed.), The marathon : Physiological, medical, epidemiological, and psychological studies. New York : New York Academy of Sciences*, 328-345, 1977.
Chang, Y.-H., Huang, H.-W. C., Hamerski, C. M., Kram, R. The independent effects of gravity and inertia on running mechanics. *The Journal of Experimental Biology*, 203, 229-238, 2000.
Chengzhi , L., Zongcheng, H. Temporal and kinematic analysis of swing leg for elite sprinters. *International series on Biomechanics, Vol.68, Biomechanics X-B*, 1987.
Cöh, M., Milanovic, D., Dolenec, A. Biomechanische Merkmale des Sprintschitts von Sprinterinnender Spitzenklasse. *Leistungssport* 5, 41-46, 1999.
Delecluse C. H. and coll. Analysis of 100 meter sprint performance as a multi-dimensional skill. *J of Human Movement Studies* 28, 87-101, 1995.
Delhez, L., Loverius, J. P., Timmermans, J. M. Dynamique du mouvement horizontal lors du départ du sprint. *Revue SPORT* 23, n°2 (90), 81-90, 1980.
Desipres, M. Kneeling and standing sprint starts. *Track technique* 72, Jun 1978, 2302-2303. Reprinted form *Athletics coach* 6 (3), 1972.
Dickinson, A. D. The effect of foot spacing on the starting time and speed in sprinting and the relation of physical measurements to foot spacing. *Research Quaterly* V (supplément), 12-19, 1934.
Dawson, M.N., Nevill, M. E., Lakomy, H. K. A., Nevill, A. M. and Hazeldine, R. J. Modelling the relationship between isokinetic muscle strength and sprint running performance. *Journal of Sports Sciences*, 16, 257-265, 1998.
Duchateau, J. Guissard, N., Hainaut, K. Electromyographie du départ en "starting-blocks" en athlétisme. *Journal de biophysique et biomécanique* l0, supplément au n°1, 1986.
Durey, A. Physique pour les Sciences du sport. *Eds Masson, Paris*, 1997.
Farley, C. T., Morgenroth, D. C. Leg stiffness primarily depends on ankle stiffness during human hopping. *Journal of Biomechanics*, 32, 267-273, 1999.
Farley, C. T., Ferris, D. P. Biomechanics of walking and running : center of mass movements to muscle action. *Exercice and sport sciences reviews* 26, 253-285, 1998.
Farley, C. T. and coll. Mechanism of leg stiffness adjustment for hopping on surfaces of different stiffnesses. *J Appl Physiol* 85 (3), 1044-1055, 1998.
Farley, C. T., Gonzalez, O. Leg stiffness and stride frequency in human running. *Journal of Biomechanics*, 29, 181-186, 1996.
Ferris, D. P., Louie, M., Farley, C. T. Running in the real world : adjusting leg stiffness for different surfaces. *Proc R Soc Lond. B*, 989-994, 1998.
Gager, B., Thépaut-Mathieu, C., Lehénaff, D. Evolution of stride and amplitude during course of the 100 m event in athletics. *The IAAF technical quarterly*, 14, 1, 43-50, 1999.
Gagnon, M. A kinetic analysis of the kneeling and the standing starts in female sprinters of different ability. *In Asmussen, E. and Jorgensen, K. (eds). Biomechanics VI-B, Baltimore university park press, c 1978 , 46-50 . International congress of biomecanics, 6th, Copenhagen, Denmark*, 1978.
Gagnon, M. Implications de la biomécanique sur les procédés d'entraînement en course. *Mouvement*, 8, 3, 165-175, 1973.
Gollhofer, A., Komi, P. V. Measurement of man-shoe-surface interaction during locomotion. *Medicine Sport Sci.*, 26, 187-199, 1987.
Guissard, N., Duchateau, J. Electromyography of the sprint start. *Journal of Human Movement Studies* 18, 97-l06, 1990.
Hafez, A. M. A., Roberts, E. M., Seireg, A. A. Force and velocity during front foot contact in the sprint start. *Biomechanics*, 1985.
Hamill, J., Derrick, T. R., Holt, K. G. Shock attenuation and stride frequency during running. *Hum. Mov. Sci.*, 14, 45-60, 1979.

Hay, J.G. Athlétisme : course à pieds . Biomécanique des techniques sportives. *VIGOT Edition, Paris, collection sport + enseignement* (20), 1980.
Henry, F.M. Force-time characteristics of the sprint start. *Research Quarterly* 23, 301-318, 1952.
Hoffmann, K. Stature, leg length, and stride frequency. *Kultura Fizyczna*, 9, 1964. Traduction dans *Track Technique*, 46, 1463-1469 (1971).
Hoster, M., May, E. Réflexions sur le biomécanisme du départ de sprint en athlétisme. *Leistungsport, RFA*, 8, 3, 267-273. Traduction INSEP 317, 1978.
Ikai, M. Biomechanics of sprint running with respect to the speed curve. *In biomechanics I (Eds by Wartenweiler, J. et all)*, 282-290. Karger, Basel/New-York, 1968.
Ito, A. Komi, P. V., Sjödin, B., Bosco, C., Karlsson, J. Mechanical efficiency of positive work in running at different speeds. *Medicine & Science in sport & exercice*, 15, 4, 299-308, 1983.
Jacobs, R., Ingen Schenau, G. J. Intermuscular coordination in a sprint push-off. *J. Biomechanics* 25, 9, 953-965, 1992.
Jakimovic, V. Pourquoi y-a-t'il diminution de la vitesse de course? *Legkaja atletika (URSS)*, 4, l0. Traduction INSEP n°52, 1985.
Kisler, J. W. A study of the distribution of the force exerced upon the blocks in starting from various starting positions. *Research Quarterly V (supplément)* 27-32, 1934.
Komi, Biomécanique et performance neuromusculaire. *Medicine and science in sports and exercice (USA)* 16, 1, 26-80. Traduction INSEP 522, 1984.
Korneljuk, A.O. Les bases scientifiques du développement de la vitesse en sprint. *Track and field quarterly review*, Summer 2 , 6-9, 1982.
Kunz, H., Kaufmann, D. A. Biomechanical analysis of sprinting : decathletes versus champions. *Brit J Sports Med*, 15, 3, 177-181, 1981.
Levtchenko, A., Papanov, V. En piste Kathrin Krabbe et Galina Malcugina (commentaire d'une chronophotographie). *Legkaya atletika*, 0, 2, 12-14, 1991.
Levtchenko, A. The sprinting structure of Florence Griffith-Joyner. *Modern Athlete and Coach*, 28, 2, 7-10, 1990.

Luhtanen, P., Komi, P. V. Force-,power-, and elasticity-velocity relationships in walking, running, and jumping. *Eur J Appl Physiol*, 44, 279-289,1980.
Luhtanen, P., Komi, P. V. Mechanical factors influencing running speed. *In Asmussen, E. and Jorgensen, K. (eds). Biomechanics VI-B, Baltimore university park press*, c 1978 , 23-29 . International congress of biomecanics, 6th, Copenhagen, Denmark, 1978.
Mann, R. The biomechanical analysis of sprinters. *Track technique*, 3000-3003, 1986.
Mann, R., Herman, J. Kinematic analysis of Olympic sprint performance : men's 200 meters. *International Journal of Sport Biomechanics*, 1, 151-162, 1985.
Mann, R., Sprague, P. A kinetic analysis of the ground leg during sprint running. *Research Quarterly for Exercice and Sport*, 51, 2, 334-348, 1980.
McMahon, T. A., Valiant, G., Frederick, A. J. Groucho running. *J. Appl. Physiol*. 62, 2326-2337, 1987.
Mero, A., Komi, V., Gregor, R. J. Biomechanics of sprint running. A review. *Sports Med* 13, 6, 376-392, 1992.
Mero, A., Komi, V. Reaction time and electromyographic activity during a sprint start. *Eur J Appl Physiol* 61, 73-80, 1990.
Mero, A., Komi, P. V. Force-,EMG-, and elasticity-velocity relationships at submaximal, maximal and supramaximal running speeds in sprinters. *Eur J Appl Physiol* 55, 553-561, 1986.
Mero, A., Luhtanen, P., Komi, P. V. A biomechanical study of the sprint start. *Scand J Sports Sci* 5, 1, 20-28, 1983.
Mero, A., Luhtanen, P., Komi, P. V. Zum Einsfluss von Kontaktphasenmerkmalen auf die Schriifrequenz beim Maximalsprint. *Leistunssport*, 12, 4, 308-28, 1982.
Milliron, M. J., Cavanagh, P. R. Sagittal plane kinematics of the lower extremity during distance running. *In P.R. Cavanagh (Ed.), Biomechanics of Distance Running, Champaign, IL : Human Kinetics Publishers*, 65-106, 1990.
Moravec, P., Ruzicka, J., Susanka, P., Dostal, E., Kodejs, M., Nosek, M. The 1987 international athletic foundation/IAAF scientific project report : time analysis of the 100 metres events at the II World Championships in athletics. *IAAF quarterly*, 3, 61-96, 1988.
Morawski, J. Biomécanique et sport. *Mlody technik (Pologne)* 4, 22-29 . Traduction INSEP n°380, 1980.
Müller, H., Hommel, H. Biomechanical research project at the Vith Championships in athletics, Athens 1997: preliminary report. *IAAF quarterly. New study in Athletic*, 12, 2-3, 43-73, 1997.
Natta, F., Brenière, Y. Influence de la posture initiale sur la dynamique du départ de sprint en starting-blocks. *Science et Motricité* 34, 44-51, 1998.
Natta, F., Brenière, Y. Effets de la posture initiale dans le départ du sprint chez les athlètes féminines de haut niveau. *Science & Sports* 199, 12 (Suppl 1), 27s, 1997.
Natta, F., Brenière, Y., Rega, C. Le départ du sprint en starting-blocks : analyse des mouvements anticipateurs de la course. *Arch int Physiol Bioch* 99, 6, C121-C122, 1990.
Payne, A. H. Foot to ground contact forces of elite runners. *Matsui H. & Kabayashi K. (Eds). Biomechanics VIII-B, Human Kinetics Publishers, Champaign ILL*, 746-753, 1983.

Payne, A. H., Blader, The mechanics of the sprint start. *Medecine and Sport* 6 : *Biomechanics II*, 225-231 .(Karger, Basel 1971), 1971.
Payne, A.H., Slater, W.J., Telford, T. The use of force platforms in the study of physical activities. A preliminary investigation. *Ergonomics* 11, 123-143, 1968.
Piacenta, J. L'éducation athlétique. *Collection entraînement INSEP*, 1988.
Plamondon, A., Roy, B. Cinématique et cinétique de la course accélérée. *Can. J. Appl. Spt. Sci*., 9, 1, 42-52, 1984.
Rodgers, M. M. Biomechanics of the foot during locomotion. *In M.D. Grabiner (Ed.), Current Issues in Biomechanics, Champaign, IL : Human Kinetics Publishers*, 33-52, 1993.
Roy, B. Caractéristiques biomécaniques de la course d'endurance. *Can. J. Appl. Spt. Sci*., 7, 2, 104-115, 1982.
Schnauber, H., Singer, R. Recherches sur la structure temporelle de la force dans le départ accroupi. *Leistunsport* 1975-6, 433. Traduction INSEP, 1975.
Simonsen, E.B. Thomsen, L., Klausen, K. Activity of mono-and biarticular leg muscles during sprint running. *Eur. J. Appl. Physiol*., 54, 524-532, 1985.

Sprague, P., Mann, R. The effects of muscular fatigue on the kinetics of sprint running. *Research Quarterly for Exercice and Sport*, 54, 1, 60-48, 1983.
Thys, H. Elasticité et rendement musculaire. *Science et motricité*, 1, 22-26, 1987.
Tjupa, V.V., Gusejnov, F. A., Mironenko, I. N. Modification de la technique de sprint sous l'influence de la fatigue. *Teorija I Praktika*, 2, 33-35. traduction INSEP n° 678, 1989.
Van Coppenolle, H., Goris, M., Bohets, W., Van den Broeke, C. Analysis of some stride, velocity and anthropometric characteristics of Belgian female 100 metres runners. *Women's track and field athletics, The official Report of the First IAAF Congress on Women's Athletics, Mainz, F R Germany*, 9-11 December 1983, 429-445, 1983.
Vardaxis, V., Hoshizaki, B. Power patterns of the leg during the recovery phase of the sprinting stride for advanced and intermediate sprinters. *Internat. Journal of Sport Biomechanics*, 5, 332-349, 1989.
Vignerot, V., Duboy, J., Lacouture, P. Mise au point d'une analyse mécanique en translation des différentes modalités de départs de sprint. *Science et motricité*, 34, 26-36, 1997.
Volkov, N.I., Lapin, V.I. Analysis of the velocity curve in sprint running. *Medicine and science in sports*, 11, 4, 332-337, 1979.
Williams, K. R., Cavanagh, P. R., Ziff, J. L. Biomechanical studies of elite female distance runners. *Int. J. Sports med. 8, Supplement*, 107-118, 1987.
Williams, K. R. Biomechanics of running. *Ex. Sports Sciences Review*, 13, 389-441, 1985.
Wood, G. Biomechanical limitations to sprint running. *Med. Sport Sci*., 25, 58-71 (Karger, Basel 1987), 1987.
Yokoi, T., Shibukawa, K., Ae, M., Hashihara, Y. Effects of stature difference on sprint running motion. *International Series on Biomechanics, volume 68. Biomechanics X-B*, 881-885, 1987.

Sommaire

Introduction 2
Etat de la littérature 2
Course à pleine vitesse 2
Départ du sprint 9
Nos travaux antérieurs 14
Première partie : Mise en place d'un site et d'un protocole expérimentaux 15
Site et Techniques 15
Partie dynamique 15
La plate-forme de forces 15
Autre outil pour l'analyse des forces 17
Partie cinématique 18
La vidéo 18
Outils servant spécifiquement à dater et à stocker les informations 20
Les outils de traitements 22
Protocole et population étudiée 24
Protocole 24
La population étudiée 25
Les paramètres étudiés 26
Nomenclature 26
Présentation des paramètres 28
Annexes 33
Fiche technique 33
Fiche d'expérimentation 33
Fiche de résultats sur les données dynamiques du premier appui 34
Fiche de résultats sur les données cinématiques du premier appui 36
Fiche de résultats sur les données dynamiques de l'appui à pleine vitesse 36
Fiche de résultats sur les données cinématiques de l'appui à pleine vitesse 36
Bibliographie 37

Table des figures et tableaux

Figure 1-1: Schémas de la plate-forme de forces AMTI 15
Figure 1-2 : Forces de réaction mesurées au cours d'un appui à 40m de course 17
Figure 1-3 : Starting-blocks et contacteurs mains 18
Figure 1-4 : Calibration de la plate-forme, calibration de l'espace et emplacement des mires 19
Figure 1-5 : Plan métrique de l'espace d'expérimentation 20
Figure 1-6 : Cellule pour l'arrêt du chronomètre 21
Figure 1-7 : Schéma de liaison entre les différents appareils 22
Figure 1-8 : Installation dans le starting-block 24
Figure 1-9 : Sortie des blocs et pose du premier appui sur la plate-forme 25
Figure 1-10 : Schéma des phases de course étudiées 28
Figure 1-11 : Paramètres du tracé de la courbe Rx 29
Figure 1-12 : Paramètres du tracé de la courbe Rz 30
Figure 1-13 : Déplacement vertical du CM au départ 30
Figure 1-14 : Angles à la sortie du bloc avant 31
Figure 1-15 : Paramètres cinématiques au début de l'appui 31
Figure 1-16 : Paramètres cinématiques au décollement du pied 31
Figure 1-17 : Paramètres cinématiques supplémentaires à l'appui à pleine vitesse 32
Figure 1-18 : Les paramètres de la Poulaine 32

Tableau 1-1 : Précautions méthodologiques pour l'analyse cinématique 22
Tableau 1-2 : Sprinters ayant participé aux tests 26
Tableau 1-3 : Caractéristiques des sprinters 26

Résumé

Ce rapport de recherche portant sur la course de vitesse comporte deux parties. La première partie, constituée de ce document, concerne l'étude bibliographique et la mise en place du site et du protocole expérimentaux. La seconde partie qui fait l'objet d'un autre document, présente les résultats obtenus dans les conditions décrites ici.

Cette étude vise à apporter notre contribution à la connaissance de cette spécialité, mais surtout à aider les entraîneurs dans leur prise de décision pour faire progresser leurs athlètes :

- d'une part, en mettant à leur disposition une revue de questions, afin de leur apporter des éléments de réflexion et de comparaison avec nos propres données ;
- d'autre part, en installant des outils permettant de suivre l'évolution des sprinters à différents moments de leur préparation et cela, sans perturber leurs habitudes d'entraînement.

L'étude bibliographique montre que de nombreux auteurs se sont intéressés au départ en starting-blocks et à la course de vitesse elle-même, aussi bien en conditions expérimentales qu'au cours de compétitions sportives. Ici, nous avons tenté de rendre compatible ces deux situations en installant un lieu d'expérimentation au sein d'un stade couvert. Ce lieu est suffisamment contrôlé pour répondre aux critères de fiabilité et de reproductibilité d'une étude scientifique. Mais une activité réelle des sportifs reste possible car le site est aussi suffisamment grand et les outils de mesure sont les plus discrets et intégrés possible.

Le protocole proposé se présente comme une séance de vitesse relativement classique et se déroule sur le lieu habituel d'entraînement des athlètes. Les nombreux paramètres qui peuvent être recueillis concernent à la fois des données dynamiques et des données cinématiques. Les premières sont recueillies au moyen d'une plate-forme de forces intégrée dans un des couloirs et concernent les forces exercées dans les trois directions de l'espace ainsi que les impulsions. Les secondes sont enregistrées essentiellement par une caméra vidéo et concernent des variations angulaires, des déplacements et vitesses linéaires. Ces mesures sont effectuées à deux instants particuliers de la course : le départ suivi du redressement et un appui à pleine vitesse suivi d'un cycle de jambe complet.

Il conviendra pour les études ultérieures de ne retenir que les paramètres qui semblent les plus pertinents pour caractériser le comportement des athlètes et différents niveaux d'organisation, en rapport avec les niveaux d'expertise d'une même spécialité ou de différentes spécialités à base de sprint.