



DEPARTEMENT DES SCIENCES DU SPORT

Laboratoire « Mouvement Action et Performance »

ANALYSE CINÉTIQUE ET CINÉMATIQUE :

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

Rapport de recherche
- 2^{ème} et 3^{ème} parties -

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 2001

: Le départ en starting-blocks, résultats et discussion

Introduction

Cette étude porte sur la caractérisation du mouvement du sprinter de haut-niveau. Il s'agit donc davantage d'une étude de cas que d'une expérimentation scientifique, dans la mesure où les athlètes ne sont pas mis dans différentes conditions expérimentales et n'ont pas à répondre à un protocole de perturbations qui permettrait de problématiser leur organisation. Ceci pourrait faire l'objet d'une suite à ce travail. Néanmoins, l'étude est réalisée selon des critères scientifiques de contrôle d'enregistrement et de traitement des données.

Sur l'ensemble des expérimentations, onze sprinters et quatre sprinteuses ont donné lieu à des résultats complets. C'est-à-dire que nous avons enregistré à la fois des paramètres cinématiques et des paramètres dynamiques. L'analyse segmentaire porte sur le tronc et les membres inférieurs. L'étude des membres supérieurs ne sera entreprise que lorsque nous disposerons d'outils nous permettant une reconstruction en 3 dimensions du mouvement.

Cependant, nous n'avons pas introduit dans cette première étude, les résultats concernant les forces exercées sur les blocs, les temps de lever des mains, le temps électrique à 20 mètres et bien sur, les paramètres qui en découlent comme, par exemple, le temps de réaction. Le matériel n'ayant été fonctionnel que progressivement au cours des mois et parfois même vers la fin de ce travail. Par conséquent, les paramètres cités ci-dessus n'ont été enregistrés que pour peu d'athlètes et ne peuvent donner lieu à la publication de leurs résultats.

Ce travail portait essentiellement sur :

la mise au point d'un site et d'un protocole expérimental sur un lieu d'entraînement,
le choix de paramètres qui pouvaient permettre de différencier les sprinters ou d'assurer leur suivi à différents moments de leur carrière ou de leur saison.

Les données dynamiques sont filtrées à 100Hz et la précision des forces est de $\pm 4N$; les données cinématiques sont filtrées à 12.5Hz et la précision des distances est de $\pm 2cm$ avec une moyenne allant dans le sens d'une sous-estimation de 1cm. Cette dernière erreur est calculée pour l'ensemble du plan filmé et cumule donc les erreurs dues au glissement des mires, les erreurs de parallaxe, les erreurs dues aux rotations par rapport au plan en 2D, les erreurs de pointage des mires et les erreurs dues au système de calibration. Des outils d'enregistrement plus performants et permettant une reconstruction en 3D réduiraient considérablement cette erreur.

Les sprinters hommes seront scindés en deux sous-populations représentant une ébauche de différence de niveau. La première sera constituée de trois sprinters que nous appellerons «rapides» (performance au 100m = $10.28s \pm 0.07$), la seconde de huit sprinters que nous appellerons « autres » (performance au 100m = $10.73s \pm 0.35$). Pour les mêmes raisons que décrites précédemment, la population étudiée ne comporte pas assez de sujets femmes et de sprinters « rapides », pour nous permettre d'effectuer des traitements statistiques complets des résultats. Nous aurons donc une présentation basée sur des moyennes et écart-types qui mettra en rapport l'ensemble des quatre sprinteuses et des onze sprinters, sans toutefois commenter les résultats des femmes. Lorsque des différences seront constatées dans cette étude, nous nous contenterons de parler de tendance. Plus d'expérimentations et surtout plus de sprinters différents seraient nécessaires pour tester la significativité de ces tendances ou utiliser d'autres tests statistiques que nous envisageons si les travaux peuvent être poursuivis.

Sur l'ensemble de la population de sprinters hommes, nous effectuerons aussi une analyse des différents coefficients de corrélation présentant un seuil de significativité entre certains paramètres (* = $p < 0.05$; ** = $p < 0.02$; *** = $p < 0.01$) ce qui nous permettra d'aborder une discussion en terme d'organisation du sprinter, et de passer des valeurs quantitatives à une conception plus qualitative et fonctionnelle de la course de sprint. Dans le cas le plus général, lorsque le coefficient est positif, cela signifie que les deux paramètres varient dans le même sens. Mais, nous avons mesuré quelques paramètres dont les valeurs sont négatives en référence à la direction dans laquelle ils se mesurent (paramètres de freinage, $\alpha 4t_i$, $\alpha 1t_i$). Dans le cas où nous étudions la relation entre un paramètre de valeur négative et un autre de valeur positive, la valeur du coefficient de corrélation doit être négative pour indiquer que les deux paramètres varient dans le même sens.

Nous présenterons les résultats d'après les paramètres concernant les caractéristiques des sprinters qui constituent la population que nous avons étudiée, puis les caractéristiques générales de la première partie de la course. Ensuite, nous analyserons des paramètres plus locaux concernant tout d'abord la jambe d'appui, puis le retour de la jambe et enfin le départ et le redressement. Nous terminerons sur les paramètres globaux concernant le centre de masse de l'athlète au cours du premier appui en examinant la dynamique verticale et la dynamique antéro-postérieure. Au fur et à mesure de la présentation des résultats, nous serons amenées à les discuter et malgré un plan assez linéaire, les autres paramètres en relation avec celui qui est étudié seront évidemment

évoqués. Nous avons jugé cette présentation plus fonctionnelle qu'une série de résultats chiffrés suivie d'une discussion plus lointaine.

En annexe sera fourni l'ensemble des résultats individuels des quatorze sprinters et sprinteuses retenus.

Résultats et discussion

Caractéristiques des sprinters

● Résultats (tableau 2-1)

Notre échantillon de sprinters plus rapides se trouve être plus grand, plus lourd, mais avec une longueur de jambe plus petite. L'âge de tous les sujets est comparable, avec cependant une variation plus importante pour les femmes.

Il est intéressant de noter qu'il n'existe aucune corrélation significative entre la taille et la longueur des foulées, mais que ces dernières présentent, en revanche, des corrélations dans le même sens avec la longueur des jambes ($r = 0.62^*$ entre L_j et $Ls1$, $r = 0.81^{***}$ entre L_j et $Ls3$).

La taille présente de fortes corrélations positives avec les paramètres dynamiques, le poids évidemment ($r = 0.87^{***}$ entre T et P), le pic de force verticale ($r = 0.64^*$ entre T et Rz_{max}), l'impulsion verticale ($r = 0.72^{**}$ entre T et $ImpRz$), mais aussi avec les paramètres de force antéro-postérieure : le pic de propulsion ($r = 0.70^{**}$ entre T et Rx^+), l'impulsion de propulsion ($r = 0.77^{***}$ entre T et $ImpRx^+$) et surtout l'impulsion de propulsion nette ($r = 0.79^{***}$ entre T et $ImpRx$) qui rend compte du gain d'accélération vers l'avant à l'issue du premier appui.

Le poids qui est fortement corrélé avec la taille ($r = 0.87^{***}$) présente les mêmes corrélations que celle-ci : avec le pic de force verticale ($r = 0.87^{***}$ entre P et Rz_{max}) et l'impulsion verticale ($r = 0.79^{***}$ entre P et $ImpRz$), mais aussi avec le pic de propulsion ($r = 0.88^{***}$ entre P et Rx^+), l'impulsion de propulsion ($r = 0.88^{***}$ entre P et $ImpRx^+$), l'impulsion de propulsion nette ($r = 0.90^{***}$ entre P et $ImpRx$) et le temps de passage du freinage à la propulsion ($r = 0.64^*$ entre P et t_{x-x^+}). Donc, plus un sprinter est lourd, plus il freine longtemps, mais ses capacités à augmenter sa propulsion sont telles qu'il finira par accélérer plus vers l'avant que des moins lourds.

La longueur des jambes, en proportion de la taille, représente 58% pour les hommes les plus rapides, 60% pour les femmes et 61% pour les autres hommes.

La longueur de jambe présente aussi des corrélations avec des paramètres dynamiques mais moins significatives, sauf avec l'impulsion verticale où le coefficient de corrélation est plus élevé qu'avec la taille ($r = 0.79^{***}$ entre L_j et $ImpRz$). Mais, ce paramètre présente également des corrélations significatives avec des paramètres cinématiques, les distances verticales du centre de masse au sol, au début et à la fin de l'appui (respectivement $r = 0.67^*$ entre L_j et dzt_1 , et $r = 0.75^{***}$ entre L_j et dzt_{-0}), ce qui est assez trivial (plus les jambes sont grandes, plus le centre de masse est loin du sol), ce qui l'est moins, c'est que nous n'en avons pas avec les distances horizontales, mais que nous en trouvons avec l'oscillation verticale du centre de masse ($r = 0.60^*$ entre L_j et $OSCz$) et avec le redressement au temps du deuxième appui ($r = 0.74^{***}$ entre L_j et rdt_2), ce qui signifie qu'au cours du premier appui, ils vont descendre plus pour ensuite remonter plus et que ce comportement est certainement lié à un redressement plus important du buste entre cet appui et le suivant.

	Femmes	Hommes	Rapides	Autres
Performance 100m (s)	11.56 ± 0.12	10.61 ± 0.36	10.28 ± 0.07	10.73 ± 0.35
Age (années)	23.75 ± 5.44	24.36 ± 3.83	24.00 ± 1.00	24.50 ± 4.54
Taille (m)	1.71 ± 0.02	1.82 ± 0.06	1.85 ± 0.04	1.81 ± 0.06
Poids (kg)	60.14 ± 5.23	77.21 ± 9.67	82.13 ± 6.86	75.36 ± 10.29
Longueur jambe (m)	1.03 ± 0.02	1.09 ± 0.04	1.08 ± 0.03	1.10 ± 0.05

Tableau 0-1: Caractéristiques des sujets

● Discussion

Les paramètres anthropométriques des sprinters ont des effets sur les paramètres mesurés pendant la course. La longueur des jambes est en relation avec la longueur des foulées plus que la taille, ce qui est connu de longue date (Hoffman, 1964), elle aura aussi un effet sur la hauteur générale du centre de masse et ses possibilités de

variation. La taille est en rapport avec le poids et donc ces deux paramètres ont une influence sur la plupart des valeurs de force et d'impulsion de force et ceci dans les deux directions, verticale et antéro-postérieure. Il devient dès lors intéressant de raisonner d'une part sur les valeurs brutes parce qu'elles expliciteront une partie de la performance et d'autre part sur les valeurs normalisées parce que, faisant abstraction des données morphologiques, nous pouvons comparer les athlètes entre eux et donc donner des informations en terme d'organisation.

Caractéristiques générales de la première partie de la course

• Résultats (tableau 2-3)

La vitesse moyenne du centre de masse au cours du premier appui est une vitesse sous-estimée car elle est calculée d'après le déplacement du centre de masse reconstruit avec le traitement vidéo (50Hz) et la durée de l'appui donnée par la plate-forme de forces (500Hz), le premier nombre est donc toujours inférieur à la réalité puisque le début et la fin de l'appui peuvent se trouver entre deux images. Nous l'avons quand même retenu comme un indicateur de la performance de l'essai. Les plus rapides sur 100 mètres présentent la plus grande vitesse moyenne au premier appui ($VmA = 3.32m/s \pm 0.35$ pour les « rapides » et $3.20m/s \pm 0.36$ pour les « autres ») (figure 2-1). Les plus rapides passent par un plus petit minimum de leur angle de la cheville au cours du premier appui que les autres ($r = -0.61^*$ entre VmA et $\alpha 3min$), ils présentent ensuite un pic de freinage normalisé plus petit ($r = -0.67^*$ entre VmA et $Rx\dot{n}$) mais une impulsion de freinage normalisée plus petite ($r = 0.70^{**}$ entre VmA et $ImpRx\dot{n}$), du fait de leur durée d'appui plus courte ($\Delta tA = 0.179s \pm 0.009$ pour les « rapides » et $0.192s \pm 0.032$ pour les « autres »).

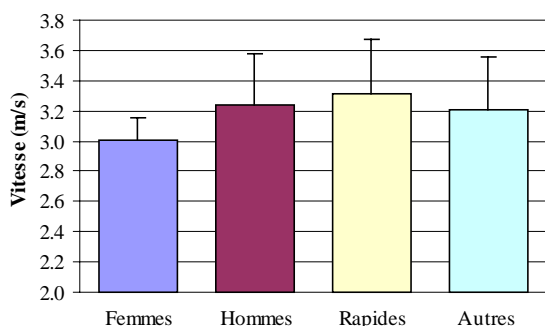


Figure 0-1 : Vitesse moyenne à l'appui

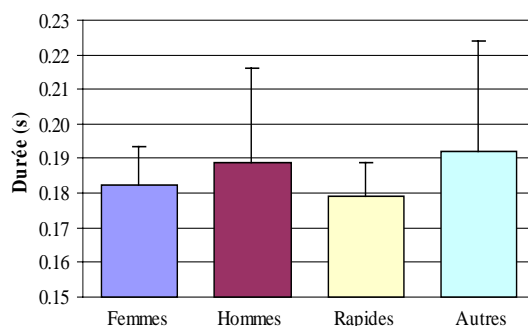


Figure 0-2 : Durée de l'appui

La durée d'appui (figure 2-2) présente des corrélations positives avec la longueur de la deuxième enjambée ($r = 0.71^{**}$ entre ΔtA et $Lc2$), ce qui est cohérent avec les données suivantes : les sprinters les plus rapides présentent des longueurs de foulées et des durées d'appui plus courtes. Au cours de cet appui, leur genou s'étend régulièrement dès la pose du pied ($r = -0.76^{***}$ entre ΔtA et $ind\alpha 2$), le redressement total de leur buste, des starting-blocks jusqu'à la fin de la troisième foulée est moins grand ($r = 0.62^*$ entre ΔtA et rdT), et leurs pics vertical et de propulsion apparaissent plus tôt ($r = 0.95^{***}$ entre ΔtA et t_{Rzmax} et $r = 0.94^{***}$ entre ΔtA et t_{Rx+}).

La longueur des trois premières foulées est plus grande pour les sprinters les moins rapides. Ceci est vrai en valeur absolue et en valeur normalisée, que ce soit en fonction de la taille ou de la longueur de jambe (figures 2-3, 2-4, 2-5).

Proportionnellement au total de la longueur des trois foulées, les femmes présentent une seconde foulée plus courte et une troisième foulée plus longue que les hommes (respectivement, 31.96% et 38.53% pour les femmes ; 33.53% et 37.77% pour les hommes).

La normalisation par la taille tend à rapprocher les valeurs des femmes et des hommes les plus rapides. La normalisation par la longueur de jambe tend à rapprocher les valeurs de tous pour les première et troisième foulées.

Quelle que soit la manière de présenter les résultats, c'est la longueur de la seconde foulée qui discrimine le plus les individus.

Lorsque la première foulée est petite, le sprinter pose son premier appui avec une position du centre de masse qui est basse ($r = 0.70^{**}$ entre $Ls1$ et dzt_1) et plus en avant du pied ($r = -0.71^{**}$ entre $Ls1$ et dxt_1) et il reste bas au moment où son pied quitte le sol ($r = 0.79^{***}$ entre $Ls1$ et dzt_{t_0}).

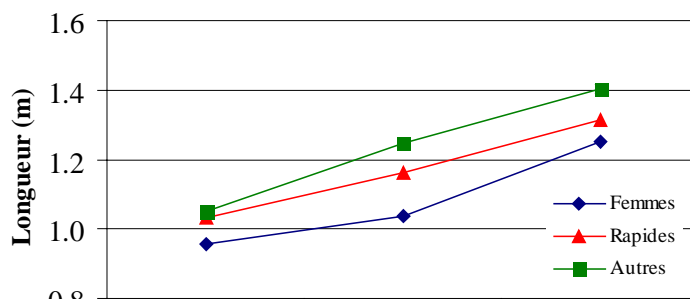


Figure 0-3 : Longueur des trois premières foulées

Avec la longueur de la seconde foulée, il existe uniquement une corrélation significative entre Ls2 et dxt_{t-o} avec un coefficient de $r = 0.82^{***}$, ce qui signifie que lorsque l'athlète quitte le premier appui avec le centre de masse plus au-dessus du pied, la foulée à venir va être plus courte.

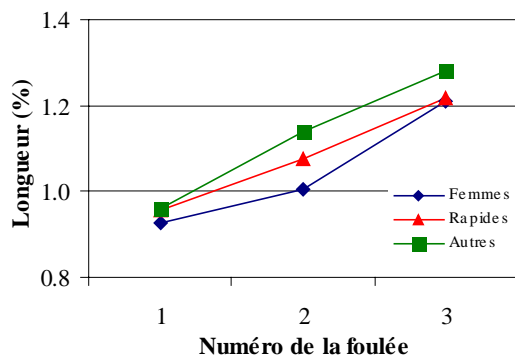


Figure 0-4 : Longueur foulées/taille

Figure 0-5 : Longueur foulées/longueur jambes

Pour la troisième foulée, des corrélations significatives existent seulement avec les distances verticales au moment du poser et du quitter (respectivement, $r = 0.79^{***}$ entre Ls3 et dzt_j ; $r = 0.75^{***}$ entre Ls3 et dzt_{t-o}), donc si l'athlète est bas au début et à la fin du premier appui, sa troisième foulée sera courte aussi.

La longueur de la sortie du bloc arrière (première enjambée) est corrélée significativement avec la longueur de la troisième foulée ($r = 0.86^{***}$ entre Lc1 et Ls3), donc si le pied arrière parcourt une courte distance pour se poser, ceci déterminerait qu'il se pose à nouveau près à la troisième foulée. La longueur de la deuxième enjambée est corrélée positivement avec les temps du pic vertical et du pic de propulsion (respectivement, $r = 0.60^*$ entre Lc2 et t_{Rzmax} , $r = 0.68^{**}$ entre Lc2 et t_{Rx+}), ce qui tendrait à supposer que plus les pics de forces surviennent tôt, plus la deuxième enjambée est courte.

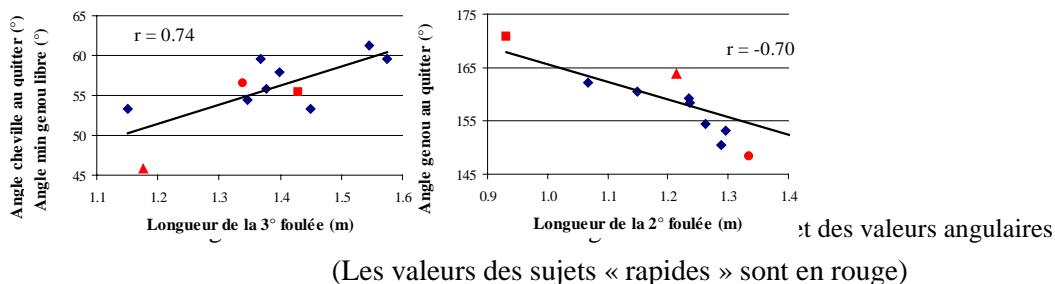
	Genou	Cheville	Force verticale	Force horizontale
Ls1	$\alpha 2_{min}$ ($r = -0.64^*$)	$\alpha 3_{t-o}$ ($r = -0.71^{**}$)	ImpRzn ($r = 0.69^{**}$)	Rx^+_n ($r = -0.73^{**}$)
Ls2	$\alpha 2_{t-o}$ ($r = -0.70^{**}$) ind $\alpha 2$ ($r = -0.61^*$)	ext $\alpha 3$ ($r = -0.65^*$)		
Ls3	$\alpha' 2_{min}$ ($r = 0.74^{***}$)		ImpRz et ImpRzn ($r = 0.70^{**}$)	

Tableau 0-1 : Corrélations entre les longueurs de foulée et les valeurs d'angles ou de forces

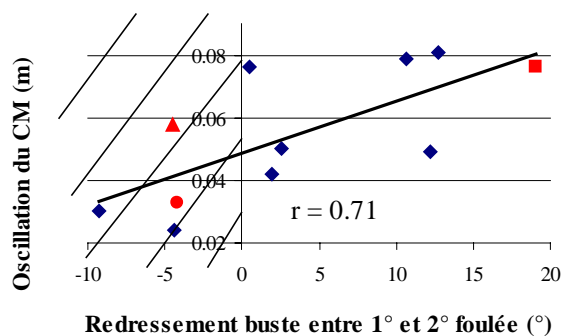
Le tableau 2-2 montre les autres corrélations significatives qui existent avec les longueurs des trois premières foulées :

- en règle générale, lorsque la première foulée est courte, le sprinter fléchit moins sa jambe avant de venir la poser, il a un angle de cheville plus ouvert au quitter (figure 2-6a), son impulsion verticale sera plus petite au cours de l'appui et son pic de propulsion plus important,

- lorsque la seconde foulée est courte, le sprinter aura étendu plus son genou dès la première partie du premier appui et il quittera le sol la jambe plus tendue (figure 2-6b) et avec plus d'extension de la cheville,
- lorsque la troisième foulée est courte, le sprinter aura fléchi plus sa jambe libre au cours du premier appui (figure 2-6c) et son impulsion verticale aura été plus petite.



L'oscillation verticale du centre de masse est un peu plus grande pour les plus rapides. Si nous regardons cette valeur en la normalisant par rapport à la taille, nous trouvons qu'elle est de 6.02% pour les femmes, de 4.95% pour l'ensemble des hommes, mais se répartissant en 5.19% pour les plus rapides et 4.91% pour les autres. Une plus grande oscillation signifie une plus grande différence verticale du centre de masse entre le point le plus bas à l'appui et le point le plus haut au temps de suspension qui suit. Les corrélations significatives avec ce paramètre tendent à montrer que si cette oscillation est grande, l'angle de la cheville était plus fermé à l'appui ($r = -0.68^{**}$ entre $OSCz$ et α_{3t_1}), ce qui confirme ce que nous avons trouvé avec une vitesse moyenne plus grande au cours de l'appui. L'extension de la hanche d'appui, au cours de l'appui, sera aussi plus grande ($r = 0.66^*$ entre $OSCz$ et $ext\alpha_1$). La jambe quittera l'appui avec un angle du genou plus ouvert ($r = 0.72^{**}$ entre $OSCz$ et $\alpha_{2t_{-o}}$), ce qui confirme ce que nous avons déjà vu avec une longueur de deuxième foulée plus petite. La distance verticale du centre de masse au quitter sera aussi plus grande ($r = 0.66^*$ entre $OSCz$ et $dz_{t_{-o}}$), il faut noter que cette dernière relation générale est en contradiction avec la tendance du groupe des plus rapides qui présentent à la fois une oscillation verticale du centre de masse plus grande que les autres, mais aussi une hauteur verticale au moment du quitter qui est plus petite.



Enfin, ce paramètre est corrélé positivement avec deux autres qui concernent le redressement : la différence entre deux minimums successifs de la trajectoire du centre de masse, c'est-à-dire au point bas des deux premiers appuis ($r = 0.84^{***}$ entre $OSCz$ et ΔGz), ce qui signifie que si l'oscillation est grande, l'ensemble du corps va être plus haut à la foulée suivante. Et ceci parce que le buste se redresse davantage pour les sprinters concernés entre le premier appui et le second ($r = 0.71^{**}$ entre $OSCz$ et rdt_2), ceux qui présentent une petite oscillation, sont des sprinters qui peuvent aller jusqu'à laisser retomber le buste entre les appuis des deux premières foulées (ceux-ci sont représentés dans la partie hachurée de la figure 2-7).

	Femmes		Hommes		Rapides		Autres	
	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET
Durée de l'appui (Δt_A) en seconde	0.183	0.011	0.189	0.028	0.179	0.009	0.192	0.032
Longueur de sortie pied AR (Lc_1) en mètre	1.22	0.03	1.33	0.12	1.31	0.12	1.34	0.13
Longueur de 1° foulée (Ls_1) en mètre	0.96	0.06	1.05	0.13	1.03	0.18	1.05	0.12
Longueur de 2° foulée (Ls_2) en mètre	1.04	0.09	1.22	0.14	1.16	0.21	1.25	0.11

Longueur de 3° foulée (Ls3) en mètre	1.25	0.07	1.38	0.13	1.32	0.13	1.40	0.13
Longueur de 2° enjambée (Lc2) en mètre (Ls2+ Ls3)	2.29	0.13	2.60	0.22	2.48	0.17	2.65	0.22
Vitesse du CM (VmA) en mètre/seconde	3.00	0.15	3.23	0.34	3.32	0.35	3.20	0.36
Oscillation du CM (OSCz) en mètre	0.06	0.01	0.05	0.02	0.06	0.02	0.05	0.02

Tableau 0-2 : Valeurs des paramètres généraux de la course (moy : moyenne, ET : écart-type)

• Discussion

Les « rapides » présentent une longueur des trois premières foulées inférieure aux « autres ». Les foulées plus courtes semblent dues à la position globale du corps : le centre de masse est plus bas au début et à la fin de l'appui et plus en avant du pied au poser ; il présente une plus grande variation verticale entre la « descente » au cours de l'appui et la « montée » au cours de la suspension. Les « rapides » conservent donc un couple de déséquilibre plus grand que les « autres » au cours du premier appui. Ces résultats sont compatibles avec nos travaux précédents portant sur l'analyse des forces développées sur les starting-blocks (Natta et Brenière, 1997). Au niveau segmentaire, nous constatons que ces paramètres généraux s'obtiennent, pour les « rapides », par des angles de la jambe plus fermés au poser et plus ouverts au quitter.

Les relations générales qui sont mises en avant par les coefficients de corrélation ne s'appliquent pas toujours aux « rapides ». Ce qui témoignerait d'une organisation différente, en rupture avec l'organisation des « autres ». Notamment, les « rapides » présentent une première foulée plus courte mais leur angle minimum du genou est plus petit avant le poser. Nous pouvons donc supposer, qu'une foulée courte s'obtient pour les moins performants par un pied qui va chercher le sol plus tôt et plus directement (en terme de trajectoire), alors que pour les plus performants, il s'agirait d'un retour vers l'avant plus actif de la jambe qui mettrait en jeu les fléchisseurs de la jambe et de la hanche. Cette activité des fléchisseurs avant l'appui était relevée par Korneljuk (1982) et par Guissard et Duchateau (1990).

Le couple de déséquilibre et l'activation musculaire avant le contact au sol permettraient d'expliquer la durée d'appui qui est plus courte et la vitesse moyenne du centre de masse au cours du premier appui qui est plus grande pour les « rapides ».

La jambe d'appui

Nous nous intéressons à la jambe qui se situe dans le bloc arrière au départ et qui effectue le premier appui de course.

• Résultats (tableau 2-5)

Quatre paramètres concernent à la fois la jambe d'appui et le centre de masse, ce sont les distances verticales (dz) et horizontales (dx) du pied au centre de masse, au poser (t_i) et au quitter (t_{i-0}).

La tendance pour les plus rapides est de produire des distances horizontales plus longues et des distances verticales plus courtes que les autres hommes, les femmes présentant la tendance exactement inverse.

Pour tous les hommes, les corrélations montrent que ces deux distances varient en sens inverse à l'instant du poser ($r = -0.68^{**}$ entre dxt_i et dzt_i) et entre la distance horizontale au poser et la distance verticale au quitter ($r = -0.79^{***}$ entre dxt_i et dzt_{i-0}). Les deux distances verticales présentent une forte corrélation entre elles ($r = 0.82^{***}$ entre dzt_i et dzt_{i-0}).

Ces paramètres présentent des corrélations significatives avec les paramètres angulaires de la cheville comme présentées dans le tableau 2-4 :

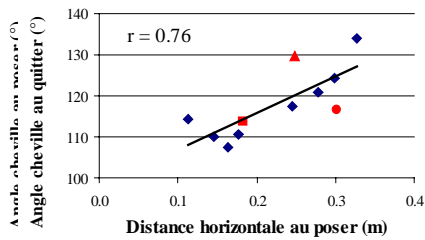
	$\alpha 3t_i$	$\alpha 3min$	$\alpha 3t_{i-0}$
dxt_i	$r = 0.74^{***}$	$r = 0.71^{**}$	$r = 0.76^{***}$
dzt_i			$r = -0.79^{***}$
dzt_{i-0}	$r = -0.63^*$	$r = -0.66^*$	$r = -0.74^{***}$

Tableau 0-1 : Corrélations entre la position du centre de masse et les angles de la cheville

Les corrélations qui concernent l'angle de la cheville à l'instant du poser ($\alpha 3t_i$) sont intéressantes parce qu'elles mettent en valeur une relation générale qui ne s'applique pas à la moyenne des « rapides » :

- la tendance générale de la relation entre la distance horizontale du centre de masse et l'angle de la cheville au poser est qu'ils varient dans le même sens (si le centre de masse est plus éloigné du pied au poser, l'angle de la cheville est plus ouvert) ($r = 0.74^{***}$ entre dxt_i et $\alpha 3t_i$) (figure 2-8), mais la moyenne des « rapides » montre un centre de masse plus en avant du pied au poser et un angle de la cheville plus petit.

- la tendance générale de la relation entre l'angle de la cheville au poser et la distance verticale du centre de masse au quitter est qu'ils varient en sens contraire ($r = -0.63^*$ entre dz_{t_0} et $\alpha 3t_1$), (si l'angle de la cheville est plus fermé au poser, le centre de masse est plus loin du sol au quitter), mais la moyenne des « rapides » montre un centre de masse plus près du sol au quitter.



Distance horizontale du CM au poser et valeurs angulaires de la cheville

On remarque la même chose pour l'angle minimum de la cheville au cours de l'appui, les variations vont dans le même sens que la distance horizontale du centre de masse au poser ($r = 0.71^{**}$ entre $\alpha 3_{\min}$ et dxt_1) (figure 2-8) et dans le sens contraire que la distance verticale au quitter ($r = -0.66^*$ entre $\alpha 3_{\min}$ et dz_{t_0}). Or, pour les plus rapides l'angle minimum de la cheville au cours de l'appui est plus petit que pour les autres alors que leur distance verticale est aussi plus petite.

Par contre, les corrélations avec l'angle de la cheville au quitter vont dans le même sens pour tous les hommes, si la distance horizontale au poser est grande, l'angle sera plus ouvert au quitter ($r = 0.76^{***}$ entre $\alpha 3_{t_0}$ et dxt_1) (figure 2-8) ; et les distances verticales au poser et au quitter seront plus petites (respectivement, $r = -0.79^{***}$ entre $\alpha 3_{t_0}$ et dz_{t_1} ; $r = -0.74^{***}$ entre $\alpha 3_{t_0}$ et dz_{t_0}).

Ces distances du centre de masse au pied sont corrélées significativement avec d'autres paramètres. Un angle petit entre les cuisses au moment du poser semblerait favoriser une distance du centre de masse loin du pied au quitter ($r = -0.65^*$ entre dxt_{t_0} et $\alpha 4t_1$). Un angle entre les cuisses qui est petit au poser serait le témoin d'un retour rapide de la jambe qui pourrait favoriser une projection vers l'avant de l'ensemble du corps. Un faible redressement du buste à l'instant où le pied arrière quitte le bloc favorise le même éloignement ($r = -0.85^{***}$ entre dxt_{t_0} et rdt_{br}), par contre le redressement s'accroît au moment où le pied avant quitte le bloc ($r = 0.67^*$ entre dxt_{t_0} et rdt_{bf}). Néanmoins, les plus rapides semblent résister plus longtemps en restant penchés puisque leur moyenne de redressement à cet instant est plus petite (tableau 2-8). Les sprinters qui se redressent le moins au total des trois premiers appuis posent leur pied au premier appui plus en arrière du centre de masse ($r = -0.65^*$ entre dxt_1 et rdT). Mais ces sprinters placent leur buste plus près de l'horizontale dans les starting-blocks ($r = -0.66^*$ entre dxt_1 et $\alpha 6t_0$).

Ces distances sont également corrélées significativement avec des paramètres dynamiques : l'impulsion verticale et le pic de propulsion horizontale, essentiellement lorsque ces derniers sont normalisés. Ceci signifie que ces relations concernent la direction de la force et non pas le poids du sujet. L'impulsion verticale est plus petite lorsque les deux distances verticales sont réduites au poser et au quitter (respectivement, $r = 0.66^*$ entre dz_{t_1} et $ImpRzn$; $r = 0.69^{**}$ entre dz_{t_0} et $ImpRzn$) et aussi lorsque la distance horizontale est plus importante au poser ($r = -0.76^{***}$ entre dxt_1 et $ImpRzn$). Les mêmes caractéristiques de ces distances induisent à l'inverse un pic de propulsion horizontale plus grand ($r = -0.64^*$ entre dz_{t_1} et Rx^+n ; $r = -0.72^{**}$ entre dz_{t_0} et Rx^+n ; $r = 0.82^{***}$ entre dxt_1 et Rx^+n).

L'angle de la cuisse par rapport à la verticale est donné en valeurs négatives au poser et en valeurs positives au quitter parce que la jambe ne se trouve pas du même côté de la verticale à ces deux instants.

Cet angle présente des corrélations avec différentes valeurs d'angle du genou et de la cheville (figures 2-24 et 2-25). Plus la cuisse est en avant de la verticale au poser et plus le genou est fermé ($r = 0.62^*$ entre $\alpha 1t_1$ et $\alpha 2t_1$), plus le choc d'impact va être atténué ($r = 0.68^{**}$ entre $\alpha 1t_1$ et $Rz1$) et plus la cheville va être fléchie au cours de l'appui ($r = 0.65^*$ entre $\alpha 1t_1$ et $\alpha 3_{\min}$). Plus la cuisse est en arrière de la verticale au quitter et plus le genou s'est étendu au cours de l'appui, mais la cheville aussi ($r = 0.66^*$ entre $\alpha 1_{t_0}$ et $ext\alpha 3$). Quant à l'extension de cet angle, qui représente une extension de hanche et donc le trajet parcouru par la cuisse de l'avant au poser jusqu'à l'arrière au quitter, elle présente une corrélation négative avec l'angle minimum du genou lors du retour de la jambe avant qu'elle ne se pose, ce qui signifie que plus le genou s'est fermé pendant le retour et plus la cuisse va balayer un grand trajet au cours de l'appui qui va suivre ($r = -0.62^*$ entre $ext\alpha 1$ et $\alpha 2_{\min}$). Toute cette organisation est caractéristique du comportement de la moyenne des « rapides ».

Les corrélations significatives avec l'angle du genou de la jambe d'appui laissent à penser que si l'athlète quitte le bloc avant sans étendre complètement l'autre jambe cela facilitera une extension de la jambe au cours du premier appui ($r = -0.71^{**}$ entre $\alpha' 2_{\max}$ et $ext\alpha 2$), ce qui semble favorable. Par contre, une ouverture plus grande du genou à la sortie du bloc arrière favoriserait que cette même jambe soit aussi plus ouverte au poser ($r = 0.78^{***}$ entre $\alpha 2t_1$ et $\alpha 2_{br}$), et une grande ouverture au poser semble elle-même concomitante à un moindre redressement du buste à cet instant ($r = -0.80^{***}$ entre $\alpha 2t_1$ et rdt_1). Mais, certains athlètes vont jusqu'à redescendre lorsque cette ouverture est très importante (zone hachurée de la figure 2-9). De plus, cette ouverture est également

concomitante d'un pic de freinage plus élevé ($r = -0.76^{***}$ entre $\alpha 2t_1$ et Rx^-). Cette dernière corrélation (figure 2-10), ainsi que la remarque sur les sprinters qui « chutent » au niveau du buste laisseraient à penser qu'il existerait sûrement un optimum de la valeur de l'angle du genou au poser qui pourrait se situer autour de 100° .

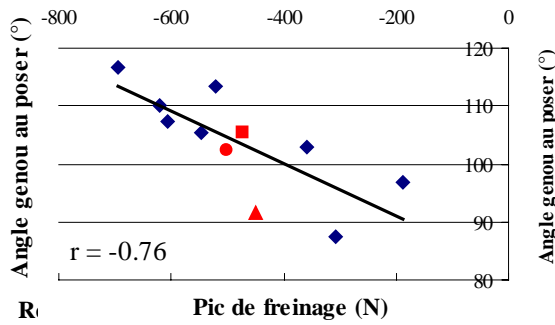


Figure 0-3 : Corrélation entre Rx^- et $\alpha 2t_1$

Un indice d'extension a été introduit pour rendre compte de l'évolution de l'extension de la jambe d'appui au cours de l'appui. Un indice égale à 1 signifie que le sprinter étend la jambe de manière régulière tout au long de l'appui (figure 2-11, courbe rose). Un indice inférieur à 1 signifie que son extension est plus importante dans les deux derniers tiers de l'appui que dans le premier (figure 2-11, courbe bleu). Un indice supérieur à 1 signifie que son extension est plus importante dans le premier tiers de l'appui que dans les deux suivants (figure 2-11, courbe rouge).

Cet indice se trouve principalement corrélé négativement à deux valeurs de temps. Ce qui signifie que plus cet indice est grand et plus les événements surviennent tôt. Ces temps sont la date d'apparition du pic vertical et la date du pic de propulsion, (respectivement : $r = -0.71^{**}$ entre $\text{ind}\alpha 2$ et $t_{Rz\text{max}}$; $r = -0.71^{**}$ entre $\text{ind}\alpha 2$ et t_{Rx+}). L'indice d'extension présente également une corrélation positive avec la flexion de la cheville au cours de l'appui, donc plus l'extension du genou est marquée et régulière au début de l'appui et plus la cheville se fléchit dans le même laps de temps ($r = 0.68^{**}$ entre $\text{ind}\alpha 2$ et $\text{flex}\alpha 3$), (figure 2-17).

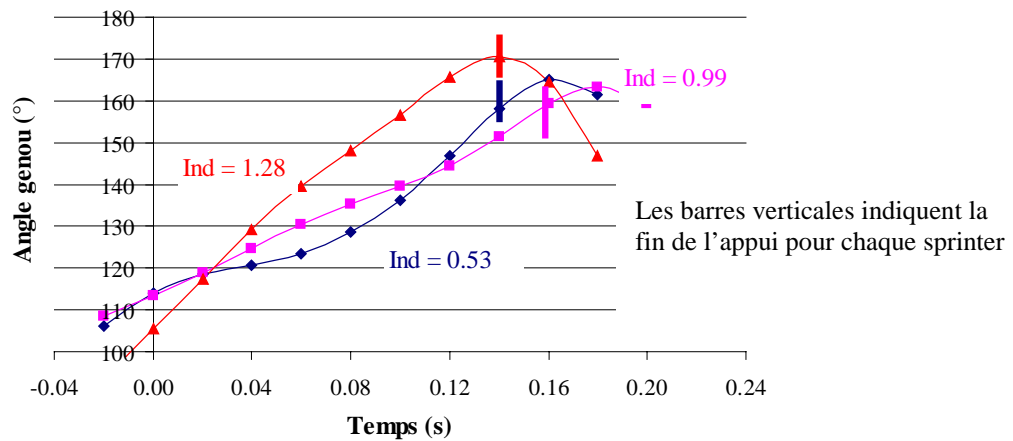


Figure 0-4 : Courbes d'extension du genou à l'appui et indices d'extension pour trois sprinters

Les angles de la cheville présentent de nombreuses corrélations significatives avec d'autres paramètres. Certaines d'entre-elles ont déjà été citées à propos des distances verticales et horizontales du centre de masse. L'angle au poser présente une corrélation, positive avec le temps auquel survient le pic de choc vertical (figure 2-12) et négative avec la variation verticale du centre de masse (tableau 2-8), (figure 2-13), (respectivement : $r = 0.71^{**}$ entre $\alpha 3t_1$ et t_{Rz1} ; $r = -0.82^{***}$ entre $\alpha 3t_1$ et ΔGz). Donc, si l'angle de la cheville est relativement fermé au poser du pied, le choc d'impact survient plus tôt et le redressement global du corps entre cet appui et le suivant sera plus important. Nous avons vu à propos de l'angle du buste avec la verticale qu'un redressement plus important à cet instant ne constituait pas un aspect négatif.

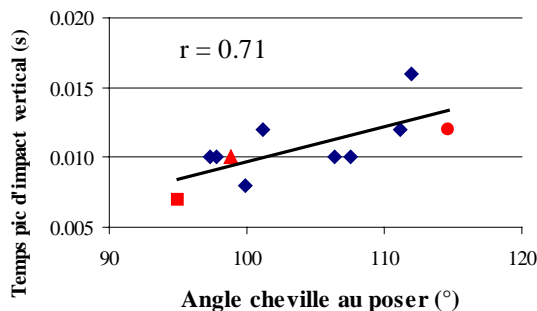


Figure 0-5 : Corrélation entre $\alpha 3t_i$ et t_{Rz1}

Figure 0-6 : Corrélation entre $\alpha 3t_i$ et ΔGz

L'angle au quitter présente une corrélation positive avec le pic de propulsion normalisé (figure 2-14) et négative avec l'impulsion verticale (figure 2-15) (respectivement : $r = 0.71^{**}$ entre $\alpha 3t_{t-o}$ et Rx^+n ; $r = -0.71^{**}$ entre $\alpha 3t_{t-o}$ et $ImpRz$). Par conséquent, si l'angle de la cheville est plus ouvert lorsque le pied quitte le sol, le corps aura produit une impulsion verticale plus petite et un pic de propulsion plus grand. L'action se trouve dirigée plus vers l'avant et moins vers le haut. Ces résultats vont dans le même sens que ceux que nous avons trouvés d'après les distances verticales et horizontales du centre de masse.

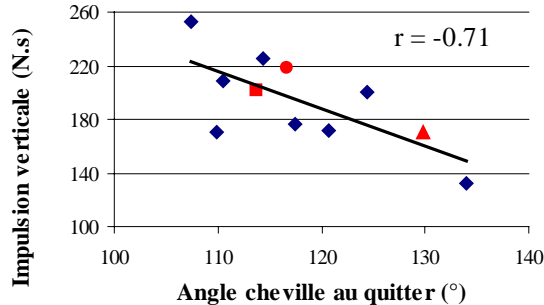


Figure 0-7 : Corrélation entre $\alpha 3t_{t-o}$ et Rx^+n

Figure 0-8 : Corrélation entre $\alpha 3t_{t-o}$ et $ImpRz$

La flexion de la cheville présente des corrélations qui vont en sens inverse de tous les paramètres de freinage, notamment avec l'impulsion de freinage normalisée ($r = 0.81^{***}$ entre $flex\alpha 3$ et $ImpRx^+n$), (figure 2-16). Si l'on se réfère aux résultats précédents, en particulier, plus de flexion de cheville allait dans le sens d'une extension plus grande et plus régulière du genou au début de l'appui (figure 2-17), on peut supposer, qu'au départ, la flexion de la cheville au cours du premier appui est à rechercher puisqu'elle faciliterait l'extension du genou et limiterait le freinage. Là aussi, il existe certainement un optimum que l'on peut situer autour de 10° mais qui pourrait être affiné avec plus de sujets.

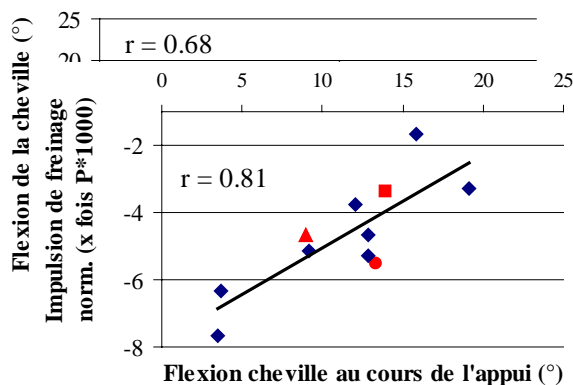


Figure 0-10 : Corrélation entre $flex\alpha 3$ et $Ind\alpha 2$

L'extension de la cheville présente de nombreuses corrélations significatives avec des paramètres qui concernent à la fois la jambe d'appui, la jambe libre et la longueur des foulées. Néanmoins, leur degré de signification n'est qu'à $p < 0.05$. Il est pourtant intéressant de noter qu'une plus grande extension au cours de l'appui semble favorisée si l'autre jambe ne s'est pas étendue jusqu'à l'extension complète en quittant le bloc avant et si elle passe par un plus petit minimum (respectivement, $r = -0.60^*$ entre $ext\alpha 3$ et $\alpha'2max$; $r = -0.63^*$ entre $ext\alpha 3$ et $\alpha'2min$), cette organisation pourrait être le signe d'un retour plus actif de la jambe libre.

L'angle entre les cuisses au poser (donné en valeur négative) présente des corrélations significatives avec le redressement du buste à différents instants (figure 2-34), (respectivement, $r = -0.71^{**}$ entre $\alpha 4t_i$ et rdt_{bf} ; $r = -0.71^{**}$ entre $\alpha 4t_i$ et rdt_j). Mais, la corrélation la plus forte concerne le redressement total du buste (figure 2-18), entre la position « prêt » et la pose du troisième appui ($r = -0.80^{***}$ entre $\alpha 4t_i$ et rdT). C'est à dire, que pour maintenir un buste penché, il serait nécessaire de ne pas arriver au premier appui avec un grand écart de jambes, c'est-à-dire de chercher à ramener vite la jambe libre. Ce résultat confirme ce qui a été dit précédemment.

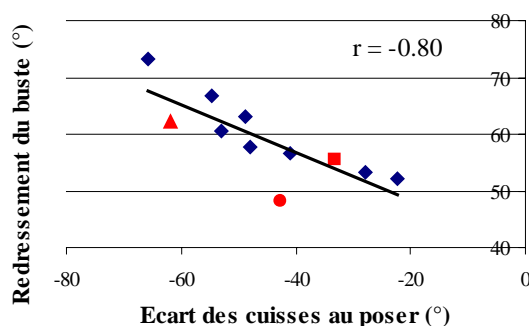


Figure 0-11 : Corrélation entre $\alpha 4t_i$ et rdT

	Femmes		Hommes		Rapides		Autres	
	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET
Hauteur de CM au poser (dzt_i) en mètre	0.79	0.07	0.77	0.04	0.75	0.03	0.77	0.04
Distance horiz. de CM au poser (dxt_i) en mètre	0.18	0.03	0.23	0.07	0.25	0.06	0.22	0.08
Hauteur de CM au quitter (dzt_{t-o}) en mètre	0.82	0.05	0.79	0.05	0.76	0.05	0.81	0.04
Distance horiz. de CM au quitter (dxt_{t-o}) en mètre	0.73	0.06	0.84	0.05	0.84	0.07	0.84	0.04
Angle cuisse/verticale au poser ($\alpha 1t_i$) en degré	-21.15	7.08	-27.30	5.43	-28.00	2.40	-27.04	6.34
Angle cuisse/verticale au quitter ($\alpha 1t_{t-o}$) en degré	34.75	2.89	36.41	4.61	38.92	7.18	35.46	3.45
Extension de hanche à l'appui ($ext\alpha 1$) en degré	55.90	7.84	63.71	8.41	66.92	9.58	62.50	8.30
Angle du genou au poser ($\alpha 2t_i$) en degré	115.18	7.71	103.55	8.83	99.74	7.26	104.98	9.37
Angle du genou au quitter ($\alpha 2t_{t-o}$) en degré	164.38	6.40	158.32	6.41	161.04	11.43	157.30	4.14
Extension du genou à l'appui ($ext\alpha 2$) en degré	49.19	7.74	54.77	11.11	61.30	13.54	52.32	9.95
Indice d'extension ($ind\alpha 2$) en unité arbitraire	0.81	0.25	0.84	0.25	0.99	0.26	0.79	0.24
Angle de la cheville au poser ($\alpha 3t_i$) en degré	101.87	5.45	103.82	6.79	102.85	10.41	104.18	5.86
Angle minimum de la cheville à l'appui ($\alpha 3min$) en degré	90.29	11.50	92.43	8.20	90.78	10.14	93.05	8.07
Angle de la cheville au quitter ($\alpha 3t_{t-o}$) en degré	127.82	16.87	118.08	8.45	120.04	8.62	117.34	8.86
Flexion de la cheville à l'appui ($flex\alpha 3$) en degré	11.58	6.41	11.39	4.76	12.08	2.69	11.13	5.48
Extension de la cheville à l'appui ($ext\alpha 3$) en degré	37.53	6.65	25.65	7.01	29.27	12.69	24.29	4.05
Angle entre les cuisses au poser ($\alpha 4t_i$) en degré	-34.93	9.91	-45.37	13.66	-45.91	14.73	-45.16	14.30

Tableau 0-2 : Valeurs des paramètres concernant la jambe d'appui

•

Discussion

La figure 2-19 représente l'évolution de l'angle du genou et de la cheville, du début du mouvement visible dans les starting-blocks jusqu'à la pose du deuxième appui (qui s'effectue avec la jambe gauche pour ces sprinters). A gauche, il s'agit d'un « rapide » et à droite, d'un « autre ». La partie des courbes concernant le premier appui résume bien les différences entre les deux, en particulier au niveau de la durée de l'appui et la régularité de l'extension du genou.

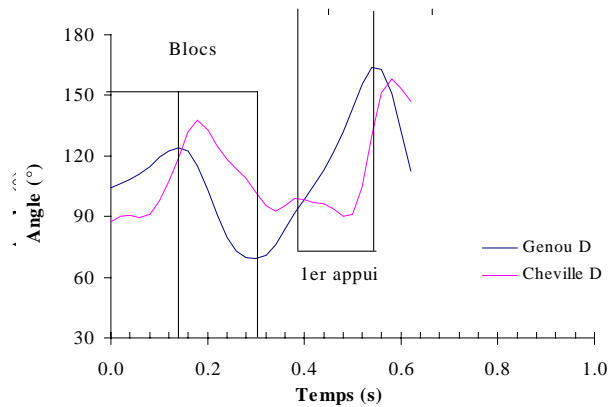


Figure 0-1 : Exemples de l'évolution des angles du genou et de la cheville de la jambe du premier appui

Les relations entre les distances horizontales et verticales du centre de masse au pied d'appui avec d'autres paramètres et entre elles confirment la recherche d'une gestion optimum du couple de déséquilibre, celui-ci étant plus grand pour les plus rapides.

L'organisation des « rapides », en moyenne, est différente du cas général : le centre de masse est plus éloigné vers l'avant et plus proche du sol, mais la cheville aborde l'appui plus fermée et le genou est aussi moins étendu, puis la cheville se fléchit encore nettement avant de s'étendre plus que pour les « autres » tandis que le genou s'étend régulièrement jusqu'au quitter. Ces résultats sont compatibles avec les activités musculaires relevées par les différents auteurs (Méro et coll., 1983 ; Simonsen et coll., 1985 ; Guissard et Duchateau, 1990). Cette organisation segmentaire au poser à pour effet de réduire le choc d'impact et l'impulsion de freinage. Le genou qui s'étend régulièrement dès le début de l'appui permet d'atteindre plus tôt les valeurs maximales de forces dans les deux directions. Il est important de développer rapidement des valeurs de forces importantes pour que la réduction du temps d'appui ne soit pas obtenue au détriment des valeurs d'accélération.

L'articulation de la cheville joue un rôle très important dans ce premier appui. C'est elle qui amortit le choc d'impact, puisque le genou ne se fléchit pas. Cet amorti semble même être une condition à une extension franche et régulière du genou.

Le retour de la jambe

● Résultats (tableau 2-6)

Certains paramètres sont relevés sur la jambe libre, ils sont alors notés d'un (') après α . D'autres sont relevés sur la jambe d'appui lorsque celle-ci se trouve libre, avant ou après l'appui étudié, ils sont notés d'un (') à la fin de la nomenclature du paramètre.

○

La jambe libre

Cette jambe se situe sur le bloc avant au départ.

L'angle minimum du genou de la jambe libre qui survient au cours de l'appui, présente une corrélation en sens contraire avec l'angle maximum entre les cuisses qui survient après l'appui ($r = -0.69^{**}$ entre α'_{2min} et α'_{4max}), (figure 2-20). Ce qui laisserait à penser que fléchir plus le genou de la jambe libre pendant le retour favoriserait l'écart entre les jambes ensuite, et donc la montée du genou vers l'avant. Ce paramètre se trouvait

déjà en relation avec l'extension de la cheville, qui peut être à l'origine d'une partie de l'écart entre les jambes en fin d'appui.

Il présente aussi une corrélation positive avec l'angle que forme le tronc avec la verticale au départ, lorsque l'athlète se trouve dans les starting-blocks, ($r = 0.68^{**}$ entre $\alpha'2_{min}$ et $\alpha6t_0$) (figures 2-21 et 2-26). Ce qui peut signifier que si l'athlète se penche beaucoup au départ, il peut se trouver dans un déséquilibre tel que ses pieds doivent rechercher rapidement le sol, expliquant ainsi que le genou ne peut passer par une flexion importante. La majorité des « autres » se comportent ainsi.

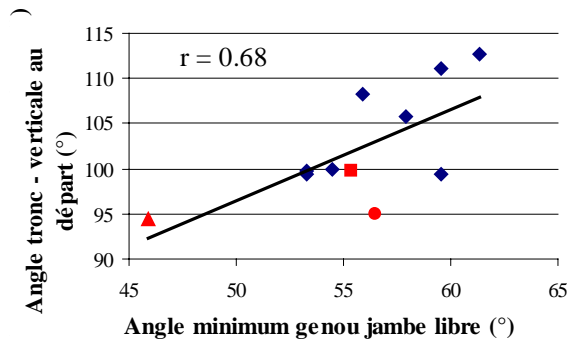


Figure 0-1 : corrélation entre $\alpha'2_{min}$ et $\alpha4_{max}$

Figure 0-2 : corrélation entre $\alpha'2_{min}$ et $\alpha6t_0$

L'angle maximal de la cuisse par rapport à la verticale de la jambe libre est le seul de cette catégorie de paramètres qui présente des corrélations significatives avec les paramètres dynamiques. Ce paramètre est relevé en général au cours du temps de suspension suivant l'appui étudié. Il présente des corrélations en sens inverse avec le pic de choc vertical et le pic de freinage. La significativité de ces corrélations est augmentée avec les paramètres normalisés ($r = -0.66^*$ entre $\alpha'1_{max}$ et $Rz1n$; $r = -0.63^*$ entre $\alpha'1_{max}$ et $Rx'n$). C'est-à-dire que plus ces pics, qui apparaissent au début de l'appui, sont petits et plus le genou de la jambe libre va monter après l'appui. Si nous rapprochons ces résultats de ceux qui concernaient l'angle de la cheville et la distance horizontale du centre de masse à l'instant du poser, nous pouvons supposer que le pied se pose près du bloc (première foulée courte), plus sur la pointe (angle de cheville plus ouvert, mais plus fermé pour les plus rapides), le corps restant penché (distance horizontale grande et distance verticale petite). Cette manière de poser le pied réduit le choc vertical et le pic de freinage et favorise la montée du genou vers l'avant de la jambe libre, ce qui semble donc souhaitable. Néanmoins, les corrélations sont par contre positives avec les temps : le temps du pic d'impact et le temps du passage du freinage à la propulsion (respectivement, $r = 0.62^*$ entre $\alpha'1_{max}$ et t_{Rz1} ; $r = 0.61^*$ entre $\alpha'1_{max}$ et t_{x-x+}). Contrairement aux relations citées au début du paragraphe, ces corrélations incitent à limiter la montée du genou libre vers l'avant dans les premières foulées du sprint pour ne pas augmenter la durée de freinage. Nous pouvons voir dans le tableau 2-6 que la moyenne des deux populations est identique (65°).

o

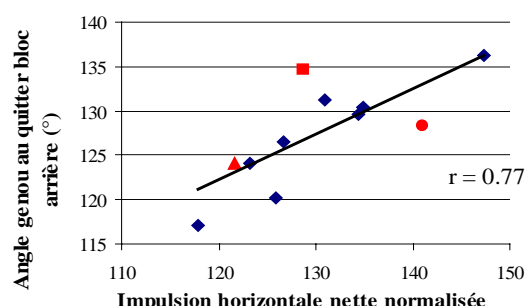
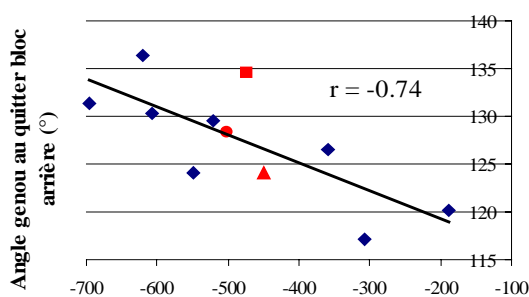
La jambe du premier appui hors appui

L'angle du genou au quitter du bloc arrière est un paramètre cinématique qui est fortement corrélé à de nombreux paramètres dynamiques.

- Dans la première partie de l'appui au sol : le temps auquel survient le pic d'impact vertical ainsi que le pic de freinage sont en relation inverse avec cet angle. Donc, plus le genou s'est étendu en quittant le bloc arrière et plus il sera ouvert au poser (corrélation citée plus haut avec $\alpha2t_i$), cette position semblant entraîner un choc précoce ($r = -0.75^{***}$ entre $\alpha2t_{br}$ et t_{Rz1}) et un pic de freinage important ($r = -0.74^{***}$ entre $\alpha2t_{br}$ et Rx') (figure 2-22). Ces corrélations restent vraies avec les valeurs normalisées, c'est-à-dire quels que soient la durée de l'appui et le poids du sprinter.

- Dans la seconde partie de l'appui : l'impulsion de propulsion et l'impulsion horizontale nette (différence entre l'impulsion de freinage et l'impulsion de propulsion), en valeurs normalisées uniquement (sans tenir compte du poids respectif des athlètes), présentent des corrélations positives avec ce même angle du genou à la sortie du bloc arrière (respectivement, $r = 0.79^{***}$ entre $\alpha2t_{br}$ et $ImpRx'n$; $r = 0.77^{***}$ entre $\alpha2t_{br}$ et $ImpRxn$) (figure 2-23).

Si nous illustrons ces résultats en prenant les relations par le même côté que précédemment, nous pouvons supposer que quitter le bloc arrière avec une grande ouverture favoriserait la propulsion horizontale du coureur au premier appui, ce qui semble souhaitable pour améliorer la performance, mais favoriserait également un pic de freinage important, ce qui peut sembler préjudiciable à la performance. Donc, ici encore, il existe sûrement un optimum de l'ouverture du genou à la sortie du bloc arrière qui pourrait se situer autour de 130° si l'on se réfère à la dispersion des trois sprinters les plus rapides.



Angle genou à la sortie du bloc arrière ($\alpha_{2t_{br}}$)	128.34	11.91	127.48	5.85	128.96	5.32	126.93	6.28
Angle minimum du genou (α_{2min})	66.38	4.62	64.91	14.52	60.61	23.83	66.52	11.32
Angle maximum entre les cuisses (α_{4max})	89.43	9.54	100.66	6.79	102.43	10.15	100.00	5.88

Tableau 0-1 : Valeurs des paramètres concernant la jambe libre (angles en degré)

Chronologiquement, le sprinter moins incliné au départ (figure 2-27) subirait une contrainte moins forte à la sortie des blocs qui lui permettrait ensuite de mieux gérer le maintien d'un certain déséquilibre. Il quitterait les blocs les jambes moins tendues, ce qui lui permettrait d'augmenter leur vitesse de retour, en passant à la fois par une plus grande fermeture du genou et une plus grande hauteur du genou vers l'avant. La fermeture du genou serait en partie conservée au moment du poser, ce qui pourrait à la fois augmenter la rigidité de la jambe par fixation de l'articulation du genou et permettre au pied de se poser plus en arrière du centre de masse entretenant alors un certain niveau du couple de déséquilibre.

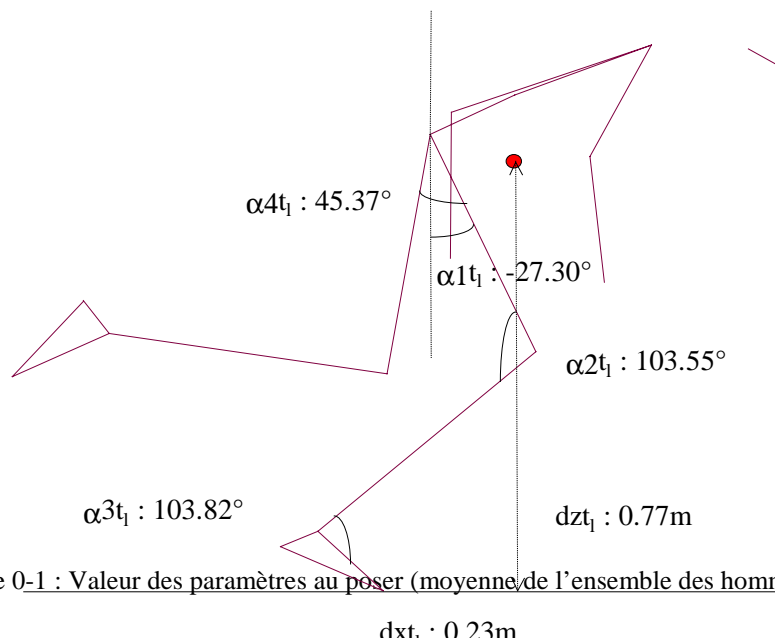


Figure 0-1 : Valeur des paramètres au poser (moyenne de l'ensemble des hommes)

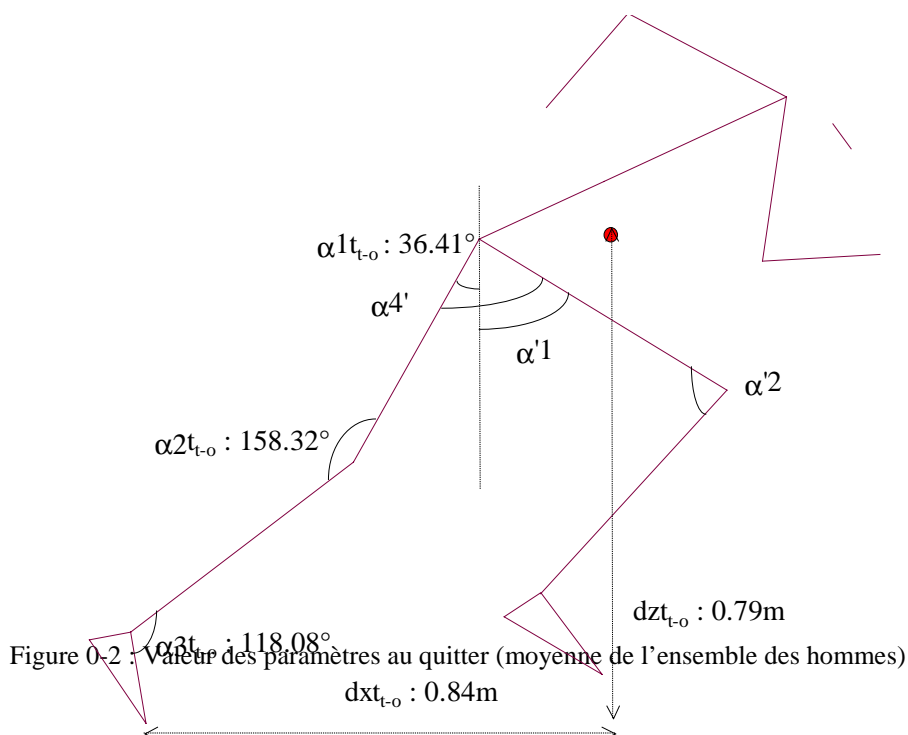
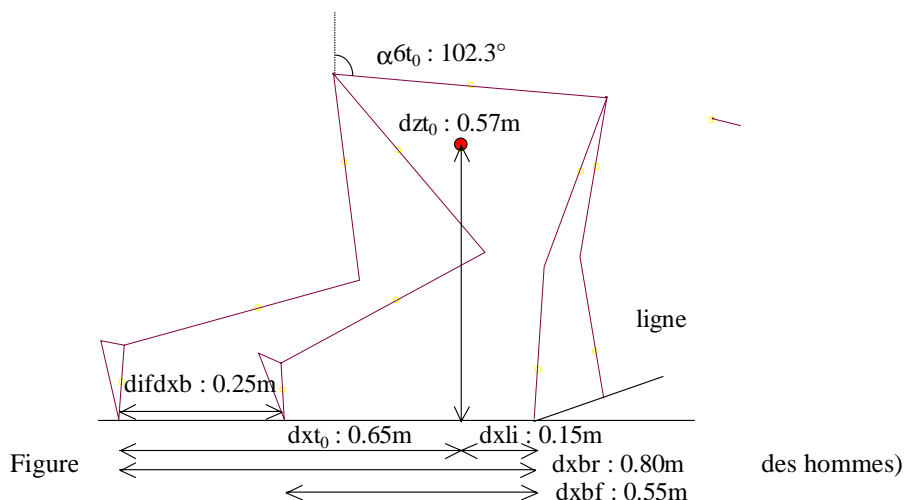


Figure 0-2 : Valeur des paramètres au quitter (moyenne de l'ensemble des hommes)

Le départ et le redressement

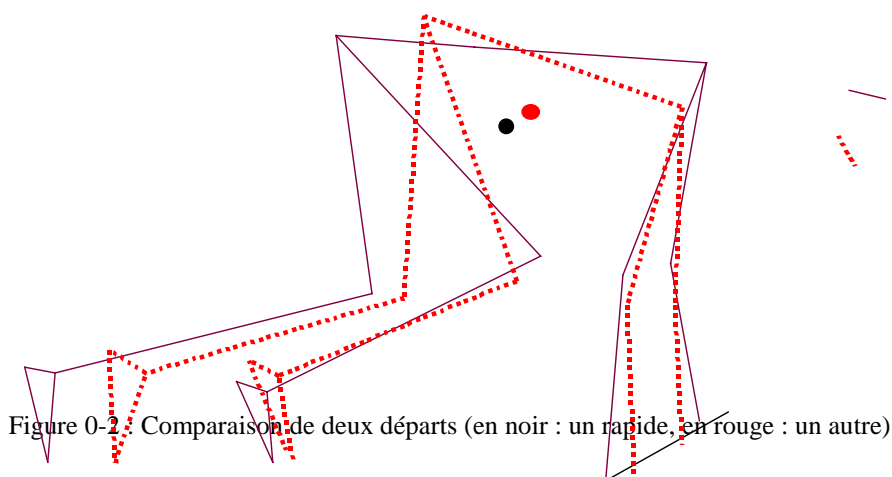
Résultats (tableaux 2-7 et 2-8)

La position en starting-blocks (figure 2-26)



Les plus rapides placent leur buste moins incliné que les autres. Ils placent leurs blocs plus loin de la ligne de départ, même si en moyenne, l'écart entre les deux blocs est identique pour tous les sprinters. Cela reste vrai si les valeurs sont normalisées par rapport à la taille ou par rapport à la longueur de jambe.

D'une part, en raison de leur bassin plus bas et donc des jambes plus fléchies, les plus rapides placent leur centre de masse plus près du sol. D'autre part, en raison de l'éloignement des blocs par rapport à la ligne, le centre de masse se trouve aussi plus en arrière de la ligne (figure 2-27).



L'angle que forme le buste avec la verticale présente une forte corrélation significative avec le redressement total au cours des trois premiers appuis ($r = 0.80^{***}$ entre α_{6t_0} et rdT). Nous serions tentés de penser que c'est un résultat évident en disant que si le coureur part plus penché, il devra bien se redresser plus pour finir dans la même attitude que les autres. Mais, nous verrons plus loin que ce redressement est rattrapé de manière très précoce et risque donc de s'effectuer au détriment de l'objectif de la course. Les corrélations qui existent entre ce paramètre et des paramètres dynamiques confortent l'idée qu'il ne serait pas souhaitable d'incliner trop le buste ($r = 0.61^*$ entre α_{6t_0} et $impRzn$; $r = -0.69^{**}$ entre α_{6t_0} et Rx^+). En effet une forte inclinaison dans les blocs irait dans le sens d'une grande impulsion verticale et d'un faible pic de propulsion lors du premier appui.

	Femmes		Hommes		Rapides		Autres	
	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET
Angle à "prêt" (α_{6t_0})	106.67	7.85	102.30	6.20	96.37	2.92	104.53	5.63
Distance horiz. de CM - pied AR à « prêt » (dxt_0)	0.59	0.03	0.65	0.05	0.65	0.05	0.65	0.06
Distance verticale de CM - sol à "prêt" (dzt_0)	0.57	0.01	0.57	0.04	0.54	0.05	0.58	0.03

Distance pied AR - ligne (dxbr)	0.75	0.07	0.80	0.06	0.86	0.02	0.78	0.06
Distance pied AV - ligne (dxbf)	0.48	0.05	0.55	0.06	0.60	0.02	0.52	0.06
Distance entre les blocs (difdxb)	0.28	0.05	0.25	0.03	0.25	0.02	0.25	0.03
Distance horizontale de CM - ligne (dxli)	0.15	0.06	0.15	0.08	0.21	0.03	0.13	0.08

Tableau 0-1 : valeurs des paramètres de la posture initiale

Deux distances sont égales, en moyenne, entre les deux populations. Il s'agit de la différence entre les blocs (difdxb) et de la distance horizontale du centre de masse au bloc arrière (dxt_0). Pour le premier, même s'il existe de petites différences individuelles, on ne peut établir aucune corrélation, pas même avec la taille ou la longueur de jambe. En revanche, pour le second, les résultats individuels sont différents et montrent de fortes corrélations, (figure 2-28) négative d'une part avec le redressement du buste entre le départ et la sortie du bloc arrière ($r = -0.84^{***}$ entre dxt_0 et rdt_{br}), (figure 2-29), positive d'autre part avec la distance horizontale du centre de masse au pied à l'instant du quitter du premier appui ($r = 0.83^{***}$ entre dxt_0 et dxt_{t_0}).

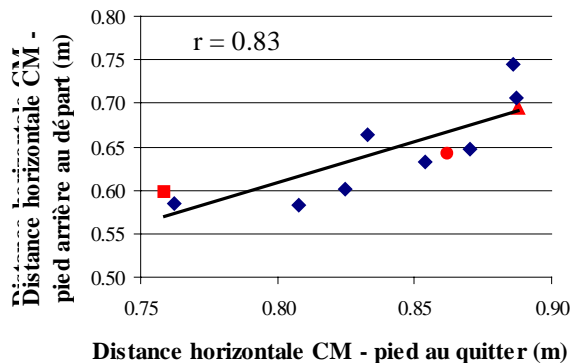


Figure 0-4 : corrélation entre dxt_0 et dxt_{t_0}

Les sprinters qui se déséquilibrent le plus au départ sont capables de le gérer puisque ce sont également ceux qui se redressent le moins lorsqu'ils quittent le bloc arrière. Ils conservent également un plus grand déséquilibre à la fin du premier appui puisqu'ils le quittent avec la plus grande distance du centre de masse en avant de leur pied. Nous voyons sur les figures 2-28 et 2-29 que les « rapides » ne se distinguent pas des autres puisque leurs valeurs se répartissent sur la droite de régression.

Nous avons vu que les sprinters semblaient garder un écart entre les blocs qui ne les distinguaient pas les uns des autres. En effet, les distances de chaque bloc à compter de la ligne de départ sont corrélées entre elles à $r = 0.90^{***}$. Ce qui signifie qu'un seul des deux est pris en compte dans les réglages et qu'il détermine entièrement l'autre. La distance du bloc avant semble plus déterminante dans le comportement de nos sprinters.

En effet, ce paramètre présente des corrélations significatives avec des paramètres qui concernent le genou et des paramètres qui concernent la hanche. D'après ces résultats, il semblerait préférable de positionner le bloc avant assez loin, vers 55% de la longueur de jambe ou de 33% de la taille, d'après la moyenne des trois plus rapides. En effet, une distance plus grande entre le bloc avant et la ligne de départ va dans le sens d'une plus petite ouverture maximum de la jambe avant lorsqu'elle quittera ce bloc ($r = -0.66^*$ entre dxbf et α_{2max}) et une plus grande extension de l'autre jambe au cours de l'appui ($r = 0.71^{**}$ entre dxbf et $ext\alpha_2$) (figure 2-30), que nous avons cité plus haut dans le texte comme étant plus favorables. Cette distance va aussi dans le sens d'une plus grande extension de la hanche au cours de l'appui ($r = 0.66^*$ entre dxbf et $ext\alpha_1$) (figure 2-31), ce qui fait que le sprinter quitte l'appui avec la cuisse plus éloignée de la verticale vers l'arrière ($r = 0.73^{**}$ entre dxbf et α_{1t_0}).

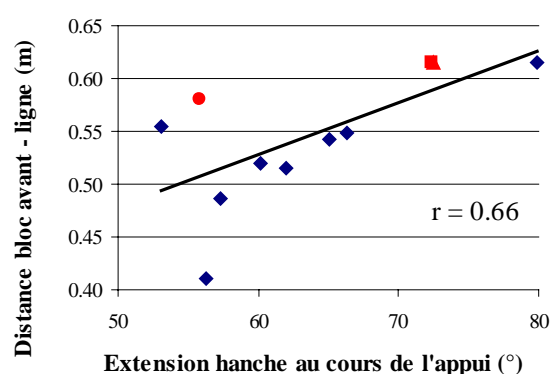
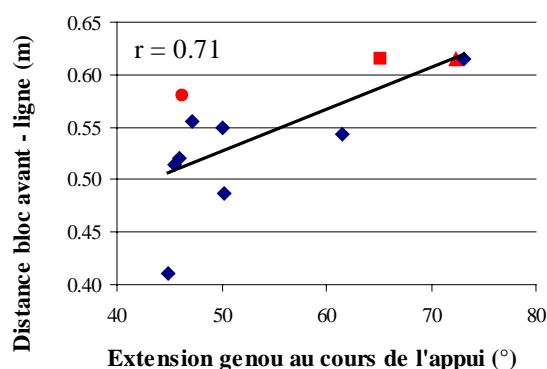
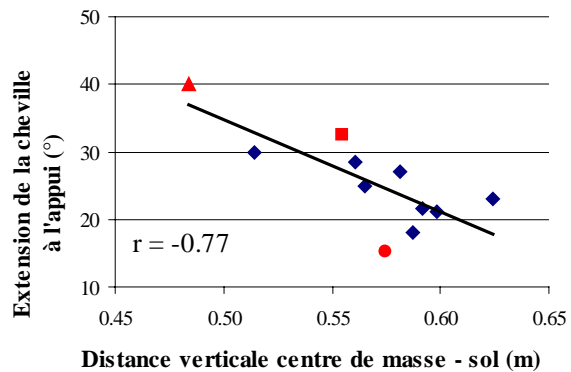
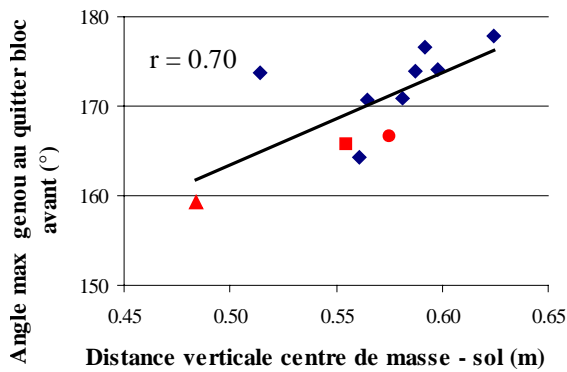


Figure 0-5 : corrélation entre dxbf et extα2

Figure 0-6 : corrélation entre dxbf et extα1

La valeur de la distance horizontale du centre de masse à la ligne présente des corrélations dans le même sens que le paramètre précédent avec l'extension du genou et de la hanche. Mais, il explicite aussi, en partie, la longueur de la deuxième foulée. Si le centre de masse est plus en arrière de la ligne de départ, la seconde foulée sera plus courte ($r = -0.66^*$ entre dxli et Ls2).

Tandis que la valeur de la distance verticale du centre de masse au sol détermine, elle, en partie, la longueur de la troisième foulée ($r = 0.73^{**}$ entre dzto et Ls3). Plus le centre de masse se trouve près du sol au départ et plus la troisième foulée sera courte (il existe aussi des corrélations significatives avec les deux premières enjambées, qui incluent donc les trois premières foulées). Cette distance verticale présente aussi une corrélation avec l'angle maximum de la jambe avant à la sortie du bloc ($r = 0.70^{**}$ entre dzto et α'2max) (figure 2-32). Donc, si la posture au départ est globalement plus basse, elle semblerait induire une moindre extension de la jambe avant à la sortie du bloc.



Ce paramètre est le seul concernant la posture initiale qui présente des corrélations significatives avec des paramètres concernant la cheville au cours du premier appui et elles sont négatives. La posture basse au départ semble donc entraîner une plus grande extension de la cheville au cours du premier appui ($r = -0.77^{***}$ entre dzto et extα3), (figure 2-33), et la cheville quitte cet appui avec une plus grande ouverture d'angle ($r = -0.68^{**}$ entre dzto et α3t_o).

o

Le redressement

Le redressement est évalué selon deux grands critères, un critère local représenté par la variation angulaire du buste avec la verticale entre deux instants et un critère global représenté par la variation verticale du centre de masse entre le point le plus bas de deux appuis successifs.

La variation angulaire a été relevée entre six instants successifs : entre la posture de départ et l'instant du quitter bloc arrière (rdt_{br}), entre l'instant du quitter bloc arrière et l'instant du quitter bloc avant (rdt_{bf}), entre l'instant du quitter bloc avant et l'instant du poser premier appui (rdt_i), entre l'instant du poser premier appui et l'instant du poser second appui (rdt_{i2}), entre l'instant du poser second appui et l'instant du poser troisième appui (rdt_{i3}). Nous avons aussi noté le redressement global entre les deux instants les plus éloignés, soit entre le départ et le poser du troisième appui (rdT), (figure 2-34).

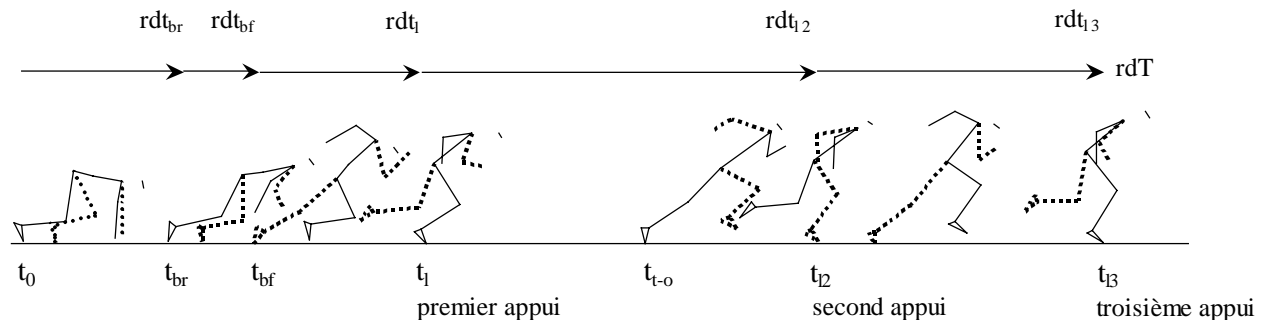
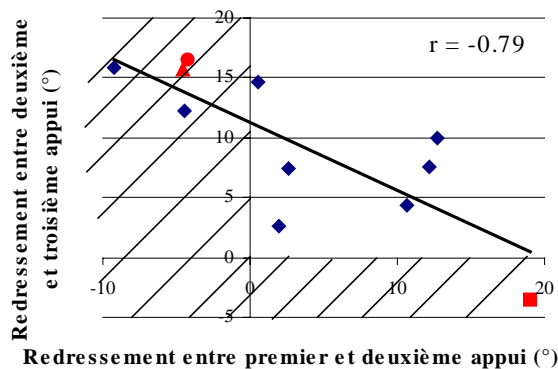


Figure 0-1 : Paramètres de redressement

Il existe deux couples de redressement qui semblent agir en compensation l'un de l'autre, c'est-à-dire lorsque l'un est petit, l'autre est grand. Le premier couple est constitué de rdt_{br} et de rdt_{bf}, ($r = -0.65^*$), le second de rdt_{i2}



et de rdt_{13} ($r = -0.79^{***}$), (figure 2-35). La gestion régulière du redressement ne semble pas contrôlée dans notre population de sprinters. Ainsi, trois seulement sur les onze ne présentent aucune variation angulaire négative sur l'ensemble des cinq valeurs relevées (par exemple, les valeurs négatives de rdt_{12} et de rdt_{13} sont matérialisées par les parties hachurées de la figure 2-35). Nous avons vu plus haut dans le texte que le redressement total, que nous pensons devoir être modéré, présentait une corrélation positive avec l'inclinaison du buste en posture initiale. Il présente aussi une corrélation positive avec le redressement entre le quitter du bloc arrière et le quitter du bloc avant ($r = 0.79^{***}$ entre rdT et rdt_{bf}), (figure 2-36). Il apparaît donc que la position dans les blocs d'une part, et la modération du redressement pendant la sortie des starting-blocks (puisque c'est entre ces deux instants que la variation angulaire est la plus forte) sont déterminantes pour conserver encore un certain déséquilibre au moment du troisième appui de course.

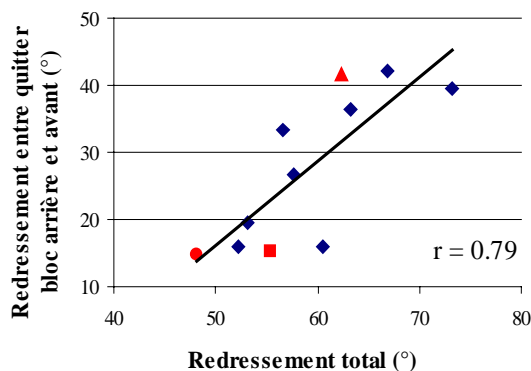


Figure 0-2 : Corrélation entre rdt_{12} et rdt_{13}

Figure 0-3 : Corrélation entre rdT et rdt_{bf}

Ces paramètres de redressement présentent d'autres corrélations que nous avons déjà évoquées. Pour ne rappeler que les plus fortes qui concernaient le redressement total et le redressement au cours de la sortie des blocs, nous avons vu que les deux présentaient une tendance inverse à l'écart entre les cuisses au poser ($r = -0.71$ entre rdt_{bf} et $\alpha 4t_1$ et $r = -0.80$ entre rdT et $\alpha 4t_1$).

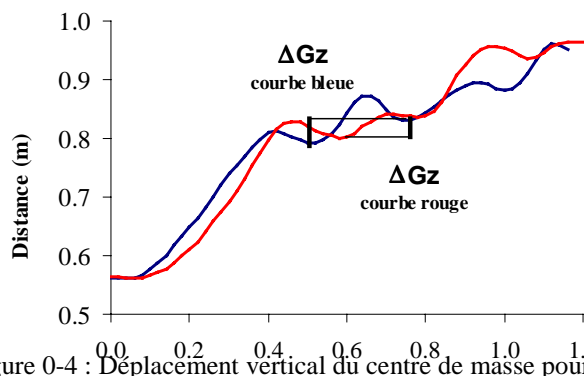


Figure 0-4 : Déplacement vertical du centre de masse pour deux sprinters

Le paramètre global qui rend compte du redressement est la variation verticale du centre de masse entre deux minimums successifs (situés au cours du premier et du second appui). Il présente l'avantage d'être le résultat de l'ensemble des actions segmentaires. Il confirme néanmoins que le redressement du buste est un indice fiable puisque cette variation verticale du centre de masse présente une corrélation positive avec le redressement du buste mesuré entre les deux même instants ($r = 0.60^*$ entre ΔGz et rdt_{12}).

Ce paramètre était le plus fortement corrélé négativement avec l'angle de la cheville au poser ($r = -0.82^{***}$ entre ΔGz et $\alpha 3t_1$), (figure 2-13), il l'est également dans une moindre mesure avec le minimum de la cheville au cours

de l'appui ($r = -0.69^*$ entre ΔGz et α_{3min}). Ces résultats renforcent l'idée de l'importance de la cheville dans la dynamique générale du premier appui.

	Femmes		Hommes		Rapides		Autres	
	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET
Redressement départ 1 (rdt _{br}) en degré	12.63	4.51	17.07	7.43	14.11	9.27	18.18	7.01
Redressement départ 2 (rdt _{bf}) en degré	31.29	8.36	27.38	11.48	23.88	15.44	28.69	10.63
Redressement 1° appui (rdt ₁) en degré	3.49	1.73	1.79	4.91	4.25	2.16	0.87	5.44
Redressement 2° appui (rdt ₂) en degré	8.14	5.21	3.39	9.02	3.45	13.52	3.36	8.00
Redressement 3° appui (rdt ₃) en degré	4.68	6.92	9.39	6.46	9.58	11.40	9.32	4.74
Redressement total (rdT) en degré	56.50	6.91	59.02	7.18	55.27	7.07	60.43	7.15
Augmentation verticale du CM entre 1° et 2° appui (ΔGz)	0.04	0.01	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03

Tableau 0-1 : Valeurs des paramètres de redressement

Discussion

Tous nos sprinters se placent dans une position qualifiée de groupée dans la littérature qui semblent privilégier un temps de sortie plus court par rapport à une poussée plus puissante (Desipres, 1972 ; Gagnon, 1977 ; Vignerot et coll., 1997). Le départ est assez agenouillé puisque les plus rapides limitent l'inclinaison du buste au départ bien que leur bloc avant soit plus éloigné de la ligne de départ que les autres, ce qui semble favoriser l'action d'extension du genou et de la hanche au premier appui. Néanmoins, ils limitent aussi l'extension de chaque jambe au moment où elles quittent les blocs et les résultats semblent montrer que cette organisation est favorable à un retour dynamique de la jambe libre. Sur un plan global, leur centre de masse est positionné plus prêt du sol, mais aussi plus loin de la ligne de départ, que ce soit en valeur réelle ou normalisée, ce qui n'est pas conforme à la littérature, ni même à nos travaux antérieurs dans lesquels les sprinters les plus performants placent leur centre de masse plus au-dessus des mains.

Un point nous semble mériter l'attention des entraîneurs. Nos résultats ne montrent aucune adaptation individuelle de la distance du bloc arrière par rapport au bloc avant, nous avons trouvé que la seconde déterminait entièrement la première. Ce résultat nous semble relever plus d'un placement routinier ou mécaniste que d'une constante universelle. Il serait sûrement souhaitable de rechercher autour de cette valeur moyenne, une distance individualisée qui tiendrait compte des autres caractéristiques du sprinter.

Le tableau 2-9 montre que les rapides ne se comportent pas de la même manière que les autres dans l'organisation de leur redressement au cours des trois premiers appuis. C'est au cours des deux phases qui se situent entre la posture de départ et la sortie des blocs que tous les sprinters se redressent le plus, mais les plus rapides limitent ce redressement plus que les autres (respectivement 69% et 77.5%). En revanche, entre la sortie des blocs et le premier appui, la moyenne de redressement des « autres » est inférieure à celle des « rapides », en grande partie parce que plusieurs sprinters redescendent leur buste dans cette phase. Ce qui signifie que bien que le redressement semble traité prioritairement par tous les sprinters avant la projection du corps vers l'avant, les rapides semblent pouvoir le limiter et maintenir plus de déséquilibre jusqu'au premier appui, tandis que les autres, qui pourtant se redressent davantage, se trouvent néanmoins en difficulté pour gérer le déséquilibre qu'ils ont conservé. Ce qui est conforme à nos précédents résultats traités selon une méthode d'analyse globale (Natta et Brenière, 1997).

Au cours des deux appuis suivants, les moyennes de redressement ne distinguent pas les deux populations, d'autant plus que certains sprinters parmi chacune des phases sont susceptibles de redescendre, ce qui constitue sûrement un point sur lequel la plupart des sprinters de notre population pourraient travailler à l'entraînement.

	Rapides	Autres
Redressement départ 1 (rdt _{br})	25.52%	30.09%

Redressement départ 2 (rdt _{bf})	43.21%	47.48%
Redressement 1° appui (rdt ₁)	7.69%	1.44%
Redressement 2° appui (rdt ₁₂)	6.25%	5.56%
Redressement 3° appui (rdt ₁₃)	17.34%	15.43%

Tableau 0-1 : Redressement au cours des différentes phases en pourcentage du total

Dynamique verticale

● Résultats (tableau 2-10)

La date du pic d'impact vertical est en relation avec la date du pic de freinage, mais aussi avec la valeur de ce pic (respectivement, $r = 0.80^{***}$ entre t_{Rz1n} et $t_{Rx.n}$; $r = 0.72^{**}$ entre t_{Rz1} et Rx') (figure 2-38). La population des « rapides » présente des valeurs pour ces trois paramètres inférieures aux autres, que ce soit en valeurs réelles ou en valeurs normalisées. Le pic d'impact vertical et le pic de freinage sont les deux aspects d'un même événement : la collision du pied avec le sol. Cet événement est de moindre amplitude et survient plus tôt pour les rapides.

Cette date présente une relation moindre avec la durée de freinage et uniquement en valeurs normalisées ($r = 0.65^*$ entre t_{Rz1n} et t_{x-x+n}). Cette relation tend disparaître pour les rapides qui présentent à la fois un temps du pic d'impact plus court en moyenne et une moyenne de la durée de freinage plus grande, ce qui est d'autant plus vrai en valeur normalisée puisque leur appui est plus court (figure 2-39).

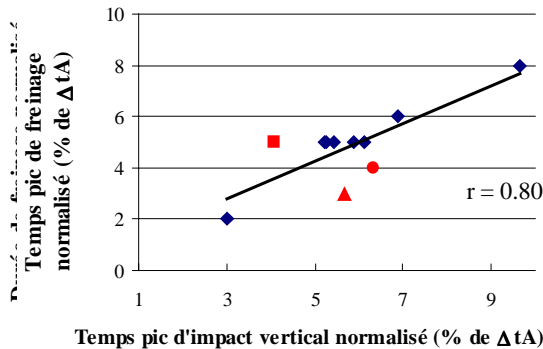


Figure 0-2 : Corrélation t_{Rz1n} et t_{x-x+n}

Cette date est aussi en relation inverse avec la date du pic vertical maximal ($r = -0.61^*$ entre t_{Rz1n} et t_{Rzmaxn}). Donc plus le choc survient tôt, plus l'accélération verticale maximale est tardive (rappelons que le pattern de la courbe de force verticale est le même que le pattern de la courbe d'accélération verticale, figure 2-40). Nous voyons sur la figure 2-41 que la relation générale ne s'applique pas aux « rapides », elle tendrait même vers une relation dans le même sens entre les deux paramètres.

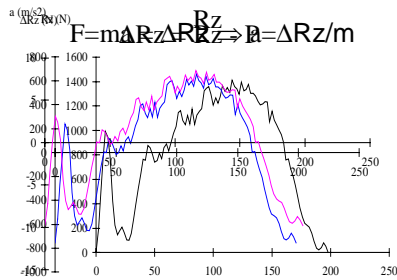
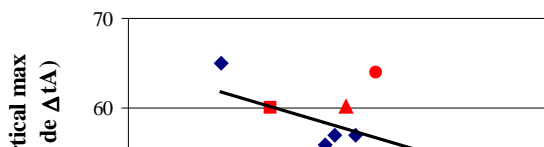


Figure 0-3 : Calcul de l'accélération verticale à partir de la réaction verticale

Ce temps est également corrélé avec des valeurs angulaires, l'angle du genou à la sortie du bloc arrière ($r = -0.75^{***}$ entre t_{Rz1} et $\alpha 2t_{br}$) (figure 2-42) et l'angle de la cheville au poser ($r = 0.71^{**}$ entre t_{Rz1} et $\alpha 3t_l$) (figure 2-12). Ainsi, le pic d'impact vertical survient plus tôt si la jambe s'est tendue davantage en quittant le bloc arrière et si la cheville se pose plus fermée.



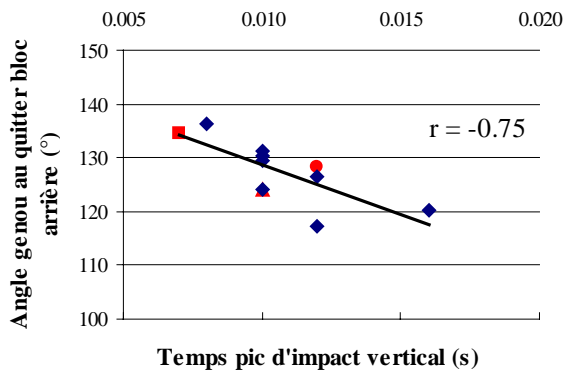


Figure 0-5 : Corrélation entre t_{Rz1} et $\alpha_{2t_{br}}$

L'amplitude de ce pic d'impact n'est en relation avec aucun autre paramètre dynamique et présente des corrélations significatives uniquement avec des valeurs angulaires de la hanche, l'angle cuisse-verticale de la jambe d'appui au poser et l'angle cuisse-verticale maximum de la jambe libre après l'appui (respectivement, $r = 0.68^*$ entre $Rz1$ et α_{1t_1} ; $r = -0.60^*$ entre $Rz1$ et α_{1max}). Ces deux corrélations vont dans le même sens : l'amplitude du choc est atténuée lorsque la hanche est plus fermée (ou autrement dit, l'angle cuisse-verticale de la jambe d'appui plus ouvert au poser et le genou de la jambe libre plus haut après le quitter).

Le pic vertical maximum, en valeur réelle, présente sa plus forte relation avec le pic maximum de propulsion ($r = 0.78^{***}$ entre $Rzmax$ et Rx^+) et les valeurs pour ces deux paramètres sont plus grandes pour les rapides. Cette forte relation entre les deux paramètres donne des éléments en faveur de l'hypothèse suivante : si l'amplitude de la résultante entre ces deux composantes de force se modifie, l'angle qu'elle forme avec le sol tendrait à rester constant.

D'une manière générale, ce pic présente des corrélations significatives avec tous les paramètres de propulsion, y compris la propulsion nette (différence entre l'impulsion de propulsion et l'impulsion de freinage).

Il présente également une seule corrélation avec un paramètre cinématique qui est la flexion de la cheville au cours de l'appui ($r = 0.60^*$ entre $Rzmax$ et $flex\alpha_3$). La flexion survenant au début de l'appui et le pic vertical dans la seconde partie de l'appui, il semblerait qu'une grande flexion de cheville favorise un grand pic d'accélération verticale. Néanmoins, nous constatons sur la figure 2-43 que les « autres » sont plus dispersés que les « rapides » le long de cette relation, ce qui rend compte d'un comportement plus homogène des sprinters les plus rapides. Les plus rapides limitent la valeur du pic vertical en moyenne. Ce groupe étant aussi plus lourd en moyenne, la valeur du pic normalisée va être plus petite pour eux.

Le temps auquel survient le pic vertical est le même pour tous les sprinters en moyenne, mais la durée d'appui des « rapides » étant plus courte, il survient plus tard en pourcentage de l'appui, c'est pourquoi la valeur normalisée de ce temps est plus grande pour ce groupe ($61.41\% \pm 2.25$ pour les « rapides » et $56.23\% \pm 3.93$ pour les autres). Comme pour l'amplitude, la plus forte corrélation relevée est celle qui le lie à son homologue de la propulsion (le temps d'apparition du pic de propulsion), ($r = 0.94^{***}$ entre t_{Rzmax} et t_{Rx^+}). Mais, il est assez remarquable de constater que la relation devient non significative entre les valeurs normalisées de ces temps. Nous voyons sur la figure 2-44 que seuls quelques sprinters dont font partie les « rapides » présentent une relation entre ces deux paramètres. Ceci pourrait être un élément en faveur d'une organisation plus élaborée. En effet, non seulement ces deux pics surviennent à un moment particulier l'un par rapport à l'autre, mais pour les « rapides », ils surviendraient aussi à un moment particulier de l'appui.

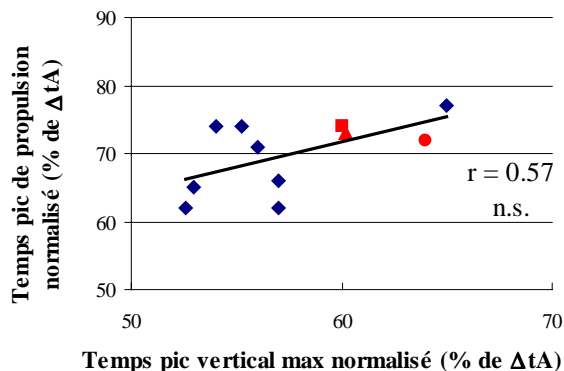


Figure 0-7 : Corrélation entre t_{Rzmax_n} et t_{Rx^+n}

Ce temps présente aussi une corrélation significative avec le temps du pic de freinage, le coefficient de corrélation est plus fort avec les deux valeurs de temps normalisées ($r = -0.79^{***}$ entre t_{Rzmax} et t_{Rx^-}). Donc, tous les sprinters présentent une organisation qui concerne la survenue des pics de freinage et vertical en rapport avec leur durée d'appui. Les plus rapides présentant un pic de freinage plus précoce au cours de leur appui et un pic vertical plus tardif.

Une relation existant entre le temps de survenue du pic vertical normalisé et un paramètre cinématique, qui est l'angle du genou au quitter du bloc arrière, permet de voir que plus la jambe se tend à la sortie du bloc et plus le pic

surviendra tard au cours de l'appui qui suit ($r = 0.66^*$ entre t_{Rzmaxn} et $\alpha 2t_{br}$). Chercher une plus grande extension de la jambe sur le bloc n'a donc pas d'incidence sur la valeur de l'action verticale exercée à l'appui, mais a un effet sur le décalage dans le temps de cette action. Les plus rapides sont situés dans la partie haute de cette relation.

	• Femmes		Hommes		Rapides		Autres	
	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET
Poids (P) en Newton	590.00	51.32	758.05	94.98	805.73	67.32	740.18	101.25
Pic d'impact vertical (Rz1) en Newton	562.89	320.17	948.03	240.95	937.57	191.73	951.96	269.02
Pic d'impact vertical normalisé (Rz1n) en x fois P	0.934	0.481	1.273	0.366	1.162	0.214	1.314	0.413
Temps à Rz1 (t_{Rz1}) en seconde	0.011	0.002	0.011	0.002	0.010	0.003	0.011	0.002
Temps à Rz1 normalisé (t_{Rz1n}) en % de ΔtA	5.68	1.53	5.77	1.67	5.36	1.16	5.93	1.87
Pic maximum de force verticale (Rzmax) en Newton	1125.59	206.47	1590.14	284.13	1634.47	127.68	1573.51	330.92
Pic maximum de force verticale normalisé (Rzmaxn) en x fois P	1.91	0.29	2.09	0.18	2.03	0.07	2.11	0.21
Temps à Rzmax (t_{Rzmax}) en seconde	0.108	0.009	0.110	0.023	0.110	0.009	0.110	0.027
Temps à Rzmax normalisé (t_{Rzmaxn}) en % de ΔtA	58.50	2.89	57.64	4.20	61.41	2.25	56.23	3.93
Impulsion verticale (ImpRz) en Newton.seconde	137.26	27.21	193.44	33.20	196.95	24.41	192.12	37.38
Impulsion verticale normalisée (ImpRzn) en x fois P * 1000	232.75	42.33	254.85	29.20	244.08	16.55	258.89	32.73

Tableau 0-1 : Valeurs des paramètres de la dynamique verticale

L'impulsion verticale présente aussi des relations très fortes avec ses équivalents selon l'axe horizontal : l'impulsion de propulsion et l'impulsion de propulsion nette (respectivement, $r = 0.85^{***}$ entre ImpRz et ImpRx⁺ ; $r = 0.86^{***}$ entre ImpRz et ImpRx).

C'est le paramètre de la dynamique verticale qui présente le plus de relations significatives avec les paramètres cinématiques. Cet indice global pourrait donc résumer l'organisation segmentaire qui est à son origine. Sa valeur brute est plus importante pour les rapides, mais sa valeur normalisée est plus petite (les rapides étant en moyenne plus lourds). Nous nous intéressons surtout à rappeler (la plupart ayant déjà été présentées plus haut dans le document) les relations existant avec la valeur normalisée. Celle-ci nous semble plus susceptible de faire émerger les organisations gestuelles. Une impulsion verticale normalisée plus petite est en relation avec un angle du tronc moins incliné dans les starting-blocks, des distances verticales du centre de masse au poser et au quitter plus petites, une distance horizontale du centre de masse au poser plus grande et une extension de cheville au quitter plus grande.

Dynamique antéro-postérieure

• Résultats (tableau 2-11)

Les paramètres de freinage sont de valeurs très réduites au premier appui. Néanmoins, il existe de nombreuses relations avec les autres paramètres qui tendent à montrer qu'ils jouent un rôle qualitatif à prendre en compte. Pour les plus rapides, le temps de survenu du pic et son amplitude sont plus petits mais la durée du freinage est plus grande, si bien que l'impulsion de freinage se trouve plus importante en valeur brute mais plus petite en valeur normalisée car ils sont plus lourds.

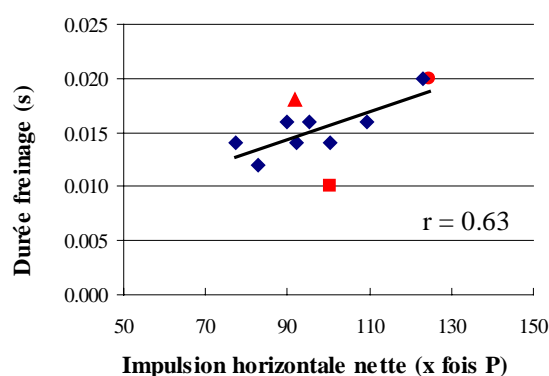
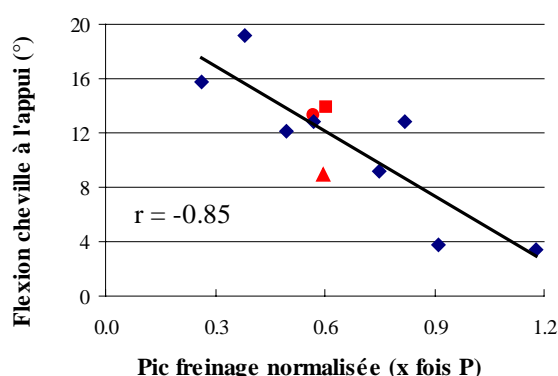
Le pic de freinage en valeur normalisée est en relation inverse avec la flexion de la cheville qui se produit dans le même temps ($r = -0.85^{***}$ entre Rx_n et $flex\alpha_3$) (figure 2-45), ce qui incite à penser que c'est bien la cheville qui amortit le choc dans le premier appui de course. Nous avons déjà vu que le pic de freinage était aussi en relation inverse avec la vitesse moyenne du centre de masse à l'appui et de nombreux autres paramètres cinématiques (voir page 4). Toutes ces relations incitent à préconiser de limiter l'amplitude de ce pic.

Le temps de survenue du pic de freinage est très lié, d'une part dans le même sens au temps du pic d'impact vertical et, d'autre part en sens inverse au temps du pic maximum vertical. Les « rapides » se situent plutôt d'un côté de ces relations : un choc précoce et un pic maximum de force verticale tardif.

La durée de freinage est en relation avec l'impulsion horizontale nette qui rend compte de l'accélération obtenue au cours de l'appui ($r = 0.63^*$ entre t_{x-x+} et $ImpRx$) (figure 2-46).

Sa valeur normalisée est en relation inverse avec l'angle du tronc en posture initiale dans les starting-blocks ($r = -0.66^*$ entre t_{x-x+n} et α_6t_0). Un buste peu incliné au départ serait en relation avec une durée de freinage augmentée. Or, il avait déjà été signalé comme souhaitable de limiter l'inclinaison du buste dans les starting-blocks. Par voie de conséquence de ces deux relations, la durée de freinage ne devrait pas être trop réduite.

En résumé, l'impulsion de freinage doit être limitée mais surtout en limitant le choc initial et non en réduisant la durée du freinage qui pourrait créer les conditions nécessaires à la propulsion.



La propulsion est prédominante dans les premiers appuis de la course. Le freinage occupant moins de 10% de l'appui, la propulsion en occupe plus de 90%. Comme pour le freinage, l'impulsion ne discrimine pas les deux populations en valeur normalisée. Le pic survient tardivement au cours de l'appui (dans le dernier tiers) et il est postérieur au pic de force verticale. Son amplitude est égale à un peu plus d'une fois le poids du corps. Les valeurs sont légèrement supérieures pour les « rapides » sans présenter de franches tendances.

Le pic de propulsion présente une forte corrélation avec la durée de freinage, que les deux valeurs soient vraies ou normalisées ($r = 0.80^{***}$ entre t_{x-x+} et Rx^+). Il est aussi en relation avec le pic vertical, ainsi qu'avec de nombreux paramètres cinématiques. Certaines corrélations ont déjà été mentionnées : un pic élevé va dans le sens d'un buste moins incliné dans les starting-blocks, d'un genou moins fléchi pendant le retour de la jambe avant l'appui, d'un centre de masse plus bas et plus en avant du pied au premier appui.

Ce pic, lorsqu'il est élevé, est aussi en relation avec un redressement total du buste moins important sur l'ensemble des trois premières foulées ($r = -0.65^*$ entre rdT et Rx^+) (figure 2-47). La valeur normalisée du pic présente des corrélations positives avec des paramètres de la cheville, notamment l'angle au quitter ($r = 0.71^{**}$ entre α_3t_{-o} et Rx_n) (figure 2-48). Les « rapides » ne sont pas bien groupés dans les deux relations présentées sur les figures 2-47 et 2-48, c'est pourquoi les moyennes des deux populations sont peu différentes.

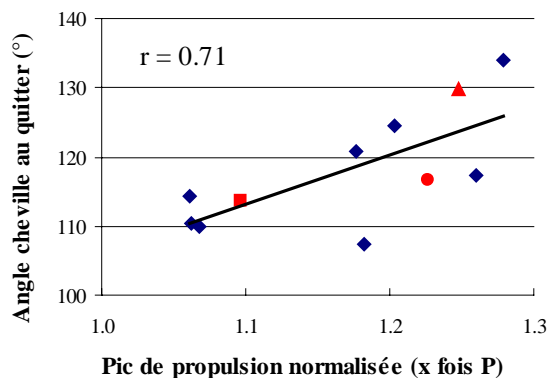
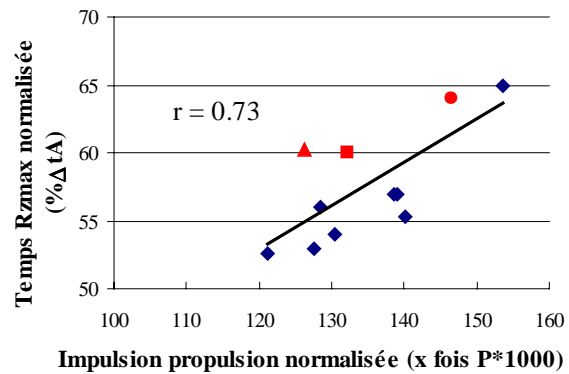
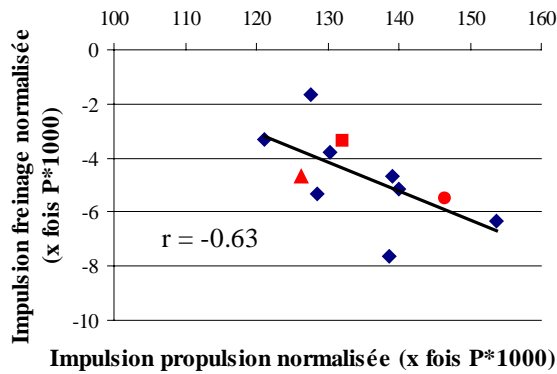


Figure 0-4 : Corrélation entre α_3t_{-o} et Rx_n^+

Le temps de survenue du pic de propulsion n'est pas corrélé avec le temps de survenue du pic de freinage. Néanmoins, si nous observons les valeurs normalisées pour les rapides, nous constatons que ces deux temps sont liés en sens inverse. Plus le pic de freinage est précoce, plus le pic de propulsion est tardif. Ceci pourrait être un indicateur d'un niveau d'organisation lié à une forte expertise.



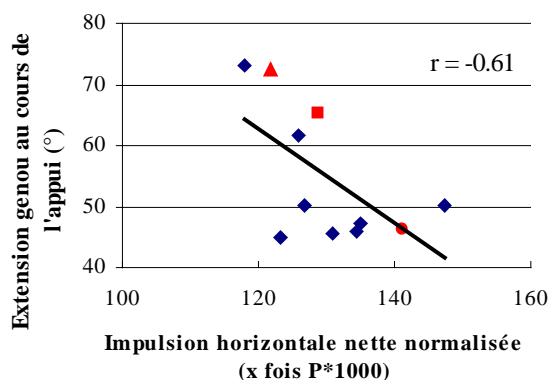
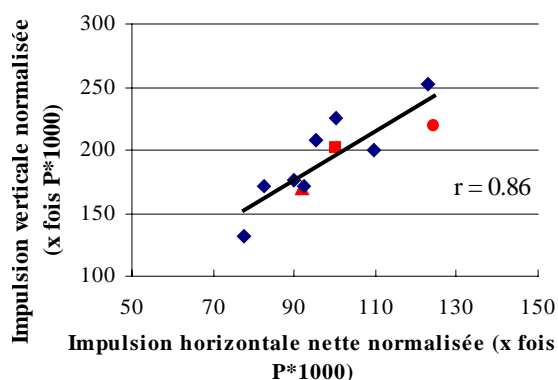
L'impulsion de propulsion tend à être identique en moyenne pour les deux populations en valeurs normalisées. Comme l'impulsion de freinage est très petite au premier appui, l'impulsion de propulsion est évidemment très fortement corrélée avec l'impulsion horizontale nette, mais elle l'est aussi avec l'impulsion de freinage ($r = -0.63^*$ entre ImpRx^+ et ImpRx^-) (figure 2-49), ainsi qu'avec le temps du pic de force verticale maximum ($r = 0.73^{**}$ entre ImpRx^+ et $t_{Rz\max}$) (figure 2-50). Ces relations et toutes celles qui existent avec des paramètres cinématiques sont vraies aussi en considérant l'impulsion horizontale nette. Nous allons donc les reprendre ci-dessous.

	Femmes		Hommes		Rapides		Autres	
	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET
Pic maximum de force de freinage (Rx^-) en Newton	-271.24	313.79	-479.23	148.05	-474.98	26.12	-480.82	176.38
Pic max. de freinage normalisé (Rx^-n) en x fois P	0.45	0.50	0.65	0.25	0.59	0.02	0.67	0.30
Temps à Rx^- (t_{Rx^-}) en seconde	0.009	0.001	0.009	0.002	0.007	0.001	0.010	0.002
Temps à t_{Rx^-} normalisé (tRx^-n) en % de ΔtA	4.75	0.96	4.82	1.54	4.00	1.00	5.13	1.64
Impulsion de freinage (ImpRx^-) en Newton.seconde	-1.67	1.80	-3.50	1.09	-3.67	1.12	-3.43	1.15
Impulsion de freinage normalisée (ImpRx^-n) en x fois P*1000	-2.79	2.85	-4.67	1.62	-4.52	1.08	-4.73	1.85
Temps passage frein./propul. (t_{x^-,x^+}) en seconde	0.013	0.002	0.015	0.003	0.016	0.005	0.015	0.002
t_{x^-,x^+} normalisé (t_{x^-,x^+n}) en % de ΔtA	7.25	1.50	8.64	1.57	9.33	2.08	8.38	1.41
Pic maximum de force de propulsion (Rx^+) en Newton	528.47	65.07	886.30	127.70	960.19	114.45	858.59	127.82
Pic max. de propulsion normalisé (Rx^+n) en x fois P	0.898	0.105	1.169	0.084	1.191	0.082	1.162	0.088
Temps à Rx^+ (t_{Rx^+}) en seconde	0.132	0.008	0.132	0.026	0.131	0.005	0.133	0.031
Temps à t_{Rx^+} normalisé (t_{Rx^+n}) en % de ΔtA	72.50	2.38	70.00	5.29	73.00	1.00	68.88	5.87
Impulsion de propulsion (ImpRx^+) en Newton.seconde	64.79	10.15	102.32	15.50	109.26	17.79	99.72	14.98
Impul. de propul. Normalisée (ImpRx^+n) en x fois P*1000	109.98	15.95	134.91	9.65	135.02	10.44	134.87	10.09
Impulsion horizontale nette (ImpRx) en Newton.seconde	63.12	9.36	98.82	15.03	105.58	16.90	96.29	14.63

Impulsion horiz. nette normalisée (ImpRx _n) en x fois P*1000	107.19	15.02	130.24	8.71	130.50	9.83	130.15	8.99
--	--------	-------	--------	------	--------	------	--------	------

Tableau 0-1 : Valeurs des paramètres de la dynamique horizontale

L'impulsion horizontale nette est la différence entre l'impulsion de propulsion et l'impulsion de freinage. Elle rend compte de l'acquisition de la vitesse finale vers l'avant à la fin du premier appui. Pourtant, elle ne distingue pas les deux populations. Les relations qui existent avec les autres paramètres dynamiques, ainsi qu'avec les paramètres cinématiques incitent plutôt à préconiser de limiter sa valeur. En effet, plus d'impulsion horizontale nette va dans le sens de plus d'extension de la jambe à la sortie du bloc arrière qui semblait un comportement intéressant, mais elle va aussi dans le sens de plus d'impulsion verticale ($r = 0.86$ entre ImpRz et ImpRx⁺) (figure 2-51), d'un angle du genou plus ouvert au début de l'appui, de moins d'extension du genou ($r = -0.61$ entre ImpRx⁺ et extα3) (figure 2-52) et de la cheville au cours de l'appui. Or, toutes ces dernières tendances n'avaient pas semblé souhaitables à l'étude d'autres résultats présentés plus haut dans le document. Ce qui relativise l'intérêt d'une très grande impulsion horizontale au début de la course. Il semblerait souhaitable de rechercher un grand pic de propulsion mais sur une durée d'appui plus courte, donc privilégier l'accélération.



Discussion générale sur la dynamique

Temps (%ΔtA)	t _{Rx-n}	t _{Rz1n}	t _{x-,x+}	t _{Rzmaxn}	t _{Rx+n}
Rapides	4.00	5.36	9.33	61.41	73.00
Autres	5.13	5.93	8.38	56.23	68.88

Amplitude (x fois P)	Rx-n	Rz1n	Rzmaxn	Rx+n
Rapides	0.59	1.162	2.03	1.191
Autres	0.67	1.314	2.11	1.162

Impulsions (x fois P*1000)	ImpRx-n	ImpRzn	ImpRx+n	ImpRx
Rapides	4.52	244.08	135.02	130.50
Autres	4.73	258.89	134.87	130.15

Tableau 0-1 : Comparaison des valeurs des paramètres dynamiques

Les valeurs en rouge présentent 10% et plus de différence entre les deux populations et celles en bleu présentent 5% et plus de différence. Toutes ces valeurs sont normalisées. Elles permettent donc de comparer les sujets entre eux, quelle que soit leur valeur de poids, pour les pics et impulsions. Les temps normalisés permettent de comparer à quel pourcentage de la durée d'appui surviennent les autres phénomènes.

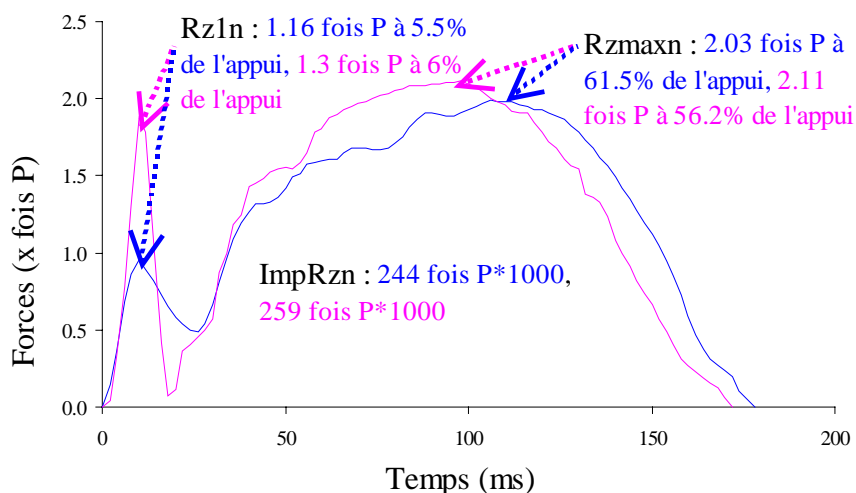
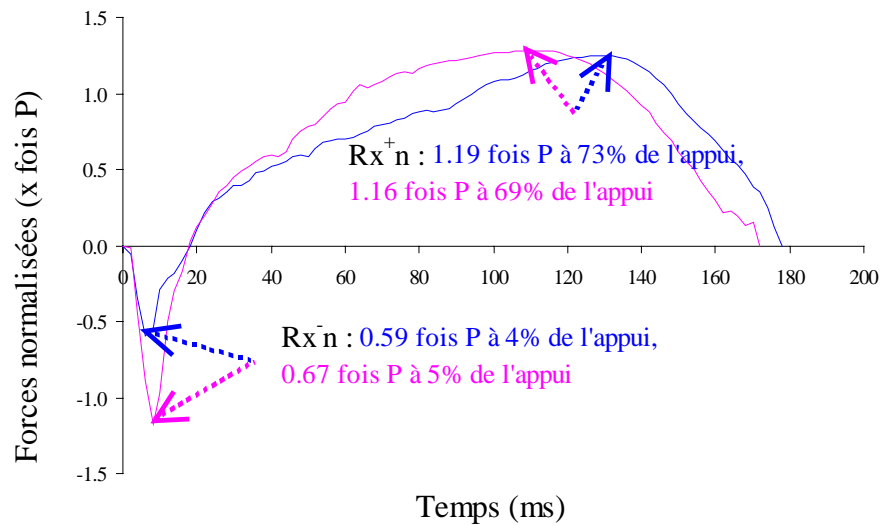


Figure 0-1 : Courbes de force verticale

Amplitude et temps normalisés, en bleu pour la moyenne des rapides, en rose pour la moyenne des autres sur deux exemples individuels typiques d'un rapide (courbe bleue) et d'un autre (courbe rose).



Les temps relatifs au choc d'impact ($t_{Rx,n}$ et $t_{Rz1,n}$) sont plus courts chez les rapides et tous les autres temps sont plus longs, y compris la durée du freinage. Les amplitudes des pics relatifs au choc sont aussi plus petites pour les rapides. Donc, le choc en tant que phénomène général est minimisé pour les « rapides », plus que l'ensemble du phénomène de freinage qui est dans tous les cas très limité au premier appui mais reste nécessaire au développement des forces propulsives. L'amorti de la cheville pourrait jouer un rôle essentiel dans cette limitation. La fermeture de la hanche interviendrait également.

Les valeurs d'impulsion sont semblables, sauf l'impulsion verticale qui est un peu moindre pour les « rapides » ainsi que la valeur du pic. On peut donc supposer que le vecteur résultant des forces verticale et horizontale va être orienté un peu plus vers l'avant pour les rapides. Ainsi, avec des valeurs de composante d'accélération horizontale comparable, l'orientation de la force résultante va être telle que les plus rapides progressent plus vers l'avant que les autres.

Hafez et collaborateurs (1985) donnaient des résultats comparables dès la sortie des starting-blocks et conseillaient de chercher, au quitter du bloc avant, une inclinaison de la force résultante plus proche de l'horizontale, plutôt qu'une grande amplitude de sa composante horizontale. Jacobs et Van Ingen Schenau (1992) identifiaient une contrainte spécifique au sprint qui serait le contrôle de la direction de la force de réaction au sol et qui expliquerait une activité prononcée des muscles à double attache. Ces hypothèses sont aussi tout à fait compatibles avec les résultats de Chang et collaborateurs (2000), bien que ces auteurs étudiaient des courses à petites vitesses (3m/s), avec des charges additionnelles. Ces auteurs montraient 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. Ils trouvaient que le vecteur force résultant étudié à trois instants différents changeait de norme mais pas la direction pour le même instant, quelles que soient les conditions de charge, ce qui signifiait que les changements de grandeur de la force verticale étaient 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.

Enfin, c'est bien une forte accélération qu'il faut privilégier au premier appui et non une grande vitesse obtenue par une durée d'appui plus longue. Ceci confirme l'étude antérieure que nous avons effectuée d'après les forces exercées sur les starting-blocks pour une population féminine de niveau national et international (Natta et coll., 1990).

Conclusion

Ce travail met en valeur les relations existantes entre différents paramètres cinématiques et dynamiques, globaux ou locaux. Ces mises en correspondance visent à faire émerger les organisations comportementales qui concernent le dialogue posture-mouvement. Elles permettent d'appréhender les synergies motrices mises en œuvre par le sprinter. Sur un plan pratique, ces résultats fournissent à l'entraîneur des indications sur les facteurs

susceptibles d'être modifiés indirectement lorsqu'il intervient sur un autre facteur. Ainsi, il pourra rechercher la meilleure optimisation possible de la gestuelle de l'athlète.

Les résultats permettent également d'objectiver par des fourchettes de valeurs un grand nombre d'indices propres au départ du sprint, des starting-blocks jusqu'au troisième appui. Ils permettent aussi de comparer, au sein d'une population de haut-niveau, des sprinters qui sont reconnus comme étant plus performants d'après leur record chronométrique et des sprinters qui se situent dans une gamme de temps un peu en dessous. Cette comparaison amène plusieurs remarques :

- Parfois, les plus rapides respectent la même organisation que l'ensemble des sprinters mais ils se situent dans un ensemble groupé le long de la relation mise en évidence. On peut penser que dans ce cas, ils constituent un sous-ensemble homogène qui a optimisé un aspect du comportement.
- Parfois, ils suivent également la même organisation, mais leurs valeurs individuelles sont dispersées le long de la relation. Il est alors difficile de trancher. Soit, l'un d'entre eux présente un problème. Soit, l'ensemble de la fourchette de valeurs est acceptable dans la recherche de la performance et la dispersion est seulement le reflet des adaptations individuelles. Ces dernières restant nécessaires pour tenir compte des différences morphologiques ou physiologiques... Dans ce cas, seule l'augmentation du nombre d'athlètes et notamment des « rapides » permettra d'en décider.
- Parfois, ils s'écartent de la relation. Soit, parce qu'une de leur valeur tend vers une constante et pas l'autre. Soit, parce que leurs valeurs présentent une tendance à une relation inverse. Dans ce cas, nous pouvons émettre l'hypothèse d'un comportement qui diffère des autres sprinters et qui pourrait être le révélateur d'un niveau d'expertise supérieur.

Les résultats des athlètes féminines ne sont donnés qu'à titre indicatif, la population représentant trop peu de sprinteuses et d'un niveau hétérogène. C'est pourquoi, ils n'ont pas été discutés et que nous ne présentons pas les résultats individuels en annexe.

Ce travail constitue une base de données importante pour tous ceux qui s'intéressent de près au sprint. Mais, il pourrait aussi constituer une référence pour d'autres études. Soit, par comparaison, pour d'autres activités sportives qui utilisent la course de vitesse (haies, perche, saut en longueur...). Soit, en utilisant des protocoles qui varient les conditions initiales, ceci afin de confirmer et de préciser certains points présentés dans ce document. Enfin, il pourrait être enrichi par une analyse en trois dimensions qui permettraient d'étudier tous les mouvements en rotation par rapport au plan du déplacement, ceux-ci n'étant sûrement pas négligeables. Disposer d'outils possédant une fréquence d'échantillonnage supérieure aux caméras vidéo nous permettraient également d'obtenir des résultats plus précis et notamment en terme de vitesse et de forces exercées au niveau articulaire. Tous calculs que nous ne nous sommes pas autorisés à faire ici en raison d'outils d'acquisition de l'image trop rudimentaires. Néanmoins, l'analyse en deux dimensions qui a été faite nous a permis de fournir de nombreux résultats qui ont pu être discutés et qui ne sont pas contradictoires avec ceux qui sont fournis dans la littérature, lorsque les mêmes paramètres ont été analysés.

: La foulée à pleine vitesse, résultats et discussion

Notre objectif étant de participer à l'amélioration de la performance du sprinter et d'aider l'entraîneur dans sa prise de décision, nous nous proposons d'analyser les paramètres qui caractérisent l'appui de course à pleine vitesse et le retour de cette jambe d'appui.

Pour cela, nous mettrons en relation les données cinématiques et dynamiques recueillies au moyen d'un enregistrement vidéo et d'une plate-forme de forces intégrée dans une piste d'athlétisme, selon les techniques décrites dans la première partie de ce rapport.

La population étudiée se compose de 11 sujets masculins et de 6 sujets féminins.

La population des « Hommes » a été répartie en deux sous-groupes. Celui que nous qualifions de « Rapides » comprend trois sprinters et présente une moyenne de performance de 10.28s (± 0.07). Le sous-groupe nommé les « Autres » comprend huit sprinters avec une moyenne de performance de 10.73s (± 0.35). Pour former les deux groupes, nous avons également pris en compte le temps réalisé au cours de l'épreuve de 50m car il est indicateur du niveau de performance au moment des tests.

Les résultats présentés concernent les quatre groupes suivants, tels qu'ils apparaissent dans le tableau 3-1 : Femmes (n = 6), Hommes (n = 11) dont Rapides (n = 3) et Autres (n = 8). La discussion des résultats portera essentiellement sur la population masculine.

	Femmes	Hommes	Rapides	Autres
Performance sur 100m (s)	11.70 \pm 0.17	10.61 \pm 0.36	10.28 \pm 0.07	10.73 \pm 0.35
Age (années)	21.83 \pm 4.88	24.36 \pm 3.83	24.00 \pm 1.00	24.50 \pm 4.54
Taille (m)	1.70 \pm 0.04	1.82 \pm 0.06	1.85 \pm 0.04	1.81 \pm 0.06
Poids (kg)	59.57 \pm 3.49	77.21 \pm 9.67	82.13 \pm 6.86	75.36 \pm 10.29
Longueur jambe (m)	1.03 \pm 0.04	1.09 \pm 0.04	1.08 \pm 0.03	1.10 \pm 0.05

Tableau 0-1 : Caractéristiques des sujets.

Pour décrire la foulée du sprinter à pleine vitesse, nous préciserons au préalable les caractéristiques générales de la course. Nous présenterons ensuite les paramètres dynamiques mesurés au cours de l'appui, puis les variables cinématiques caractéristiques de l'appui de course et du retour de la jambe. Nous mettrons en relation les différentes données recueillies afin de dégager les paramètres qui semblent les plus significatifs de l'organisation motrice du sprinter expert.

Nous présentons les moyennes et les écart-types pour chacun des groupes considérés.

Le nombre trop restreint de sujets dans chaque groupe ne nous permet pas de réaliser un traitement statistique complet, et nous appuierons notre discussion sur l'analyse des coefficients de corrélation issus de la mise en relation des différents paramètres. La relation entre deux variables est considérée comme significative aux seuils $p < 0.05$ (*), $p < 0.02$ (**) et $p < 0.01$ (***). Sur les figures montrant les relations entre les variables, les sujets du groupe « Rapides » sont représentés par des motifs de forme et de couleur différentes.

Pour le traitement des données, se référer à l'introduction de la première partie.

Nous avons retenu un essai pour chaque sujet. L'essai choisi est la course la plus rapide à 50m. Cependant, courir à vitesse maximale en posant le pied sur une plate-forme de forces sans modifier sa foulée de course ne s'obtient pas systématiquement à tous les essais. Dans ce cas, nous retenons celui pour lequel nous avons pu relever des résultats cinématiques et dynamiques complets.

Les résultats individuels sont présentés en annexe.

Les caractéristiques générales de la course

Résultats

Comme nous l'avons déjà précisé pour la population masculine, les coureurs du groupe « Rapides » ont été classés dans cette catégorie par leurs performances au 100m ainsi qu'aux 50m effectués au cours des épreuves de mesures. Les courses ont été chronométrées afin d'inciter les sprinters à atteindre leur vitesse maximale, mais dans cette série de tests, le chronométrage étant manuel, les temps réalisés ne sont pas exploités dans les résultats. Ils témoignent juste de l'état de forme des sujets au moment de la passation des épreuves.

A titre indicatif, la moyenne des temps au 50m est de 6.32s (± 0.22) pour les « Femmes », 5.51s (± 0.05) pour les « Rapides » et 5.85s (± 0.08) pour les « Autres ».

Les résultats portant sur les caractéristiques générales de la course sont présentés dans le tableau 3-2.

Au bout de 40m de course, la population des « Hommes » comme celle des « Femmes » présentent des durées d'appui au sol qui sont, en moyenne, identiques. La valeur moyenne de la durée de l'appui des sprinters est de 0.098s (± 0.009). Au sujet de la population des « Hommes », le sous-groupe des « Rapides » tend à se distinguer des « Autres » par une durée d'appui au sol légèrement plus courte (figure 3-1).

La population masculine atteint une vitesse moyenne supérieure au groupe féminin. Pour la population masculine, la vitesse moyenne à l'appui est légèrement supérieure, en moyenne, dans le groupe « Rapides ». Nous pouvons remarquer que parmi les « Rapides », le sprinter qui présente la durée d'appui la plus brève, produit aussi une vitesse supérieure aux autres.

Dans le souci d'obtenir des résultats plus précis, nous avons calculé la vitesse du centre de masse au cours de l'appui en prenant en compte la valeur enregistrée par la plate-forme de forces. Ce choix tend à sous-estimer la vitesse ainsi que la fréquence moyenne car dans l'enregistrement vidéo l'appui peut se produire entre 2 images. Par contre, afin de comparer nos résultats aux données de la littérature, nous avons présenté dans les tableaux 3-21 et 3-22, non pas la vitesse au cours de l'appui, mais la vitesse qui peut être qualifiée de cyclique, calculée d'après l'enregistrement vidéo, en divisant la distance parcourue par le centre de masse pendant deux foulées par le temps mis pour les parcourir. La fréquence a également été recalculée sur cette base.

	Femmes		Hommes		Rapides		Autres	
	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET
Durée de l'appui (Δt_A) (s)	0.097	0.009	0.098	0.009	0.090	0.007	0.102	0.007
Vitesse moyenne du CM (V_{mA}) (m/s)	7.96	1.17	8.70	0.70	8.98	0.65	8.60	0.73
Amplitude moyenne ($L/2c$) (m)	2.04	0.08	2.29	0.08	2.27	0.11	2.30	0.08
Amplitude/taille	1.20	0.06	1.26	0.05	1.23	0.04	1.28	0.05
Amplitude/longueur de jambe	1.99	0.07	2.11	0.05	2.11	0.08	2.11	0.05
Fréquence moyenne (f) (Hz)	3.91	0.64	3.80	0.29	3.96	0.37	3.74	0.26
Oscillations du CM (Oscz) (m)	0.07	0.01	0.07	0.02	0.08	0.01	0.06	0.02

Tableau 0-1 : Caractéristiques générales de la course.

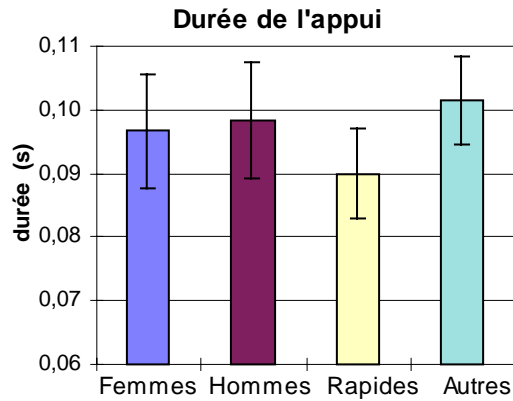
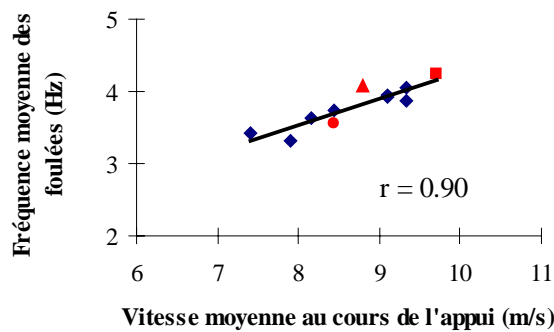


Figure 0-1 : Valeurs de ΔtA.

Les sprinteuses présentent une amplitude moyenne de foulée ($2.04\text{m} \pm 0.08$) qui est inférieure à celle des hommes ($2.29\text{m} \pm 0.08$), et qui le reste en valeurs normalisées. Mais elles sont capables d'atteindre une fréquence de foulées aussi élevée voire supérieure à celle des sprinters, avec cependant de très grandes variations entre les sujets, comme le montrent la valeur des écart-types (tableau 3-1).

L'amplitude moyenne des sprinters varie peu d'un groupe à l'autre et les valeurs relatives sont en moyenne identiques, à tel point que nous n'avons pas noté de relation significative entre la vitesse et l'amplitude moyennes, alors que la corrélation est fortement significative entre les paramètres vitesse et fréquence ($r = 0.90^{***}$). Cette relation, illustrée par la figure 3-2, indique que les coureurs qui ont la plus grande vitesse après 40m de course sont ceux qui présentent la fréquence de foulées la plus importante. Notre mode de calcul met en rapport la distance parcourue par le centre de masse tant que le pied est au sol, et la durée de l'appui. Les valeurs obtenues illustrent la capacité du coureur à quitter rapidement l'appui et donc à effectuer un nombre élevé de foulées par unité de temps. Sur cette figure, nous voyons que deux sprinters du groupe « Rapides » présentent les fréquences les plus élevées de la population masculine.



Les oscillations pic à pic du centre de masse s'élèvent en moyenne à $0.07\text{m} (\pm 0.02)$ et sont peu différentes d'un groupe à l'autre. La figure 3-3 montre que la course est essentiellement une succession de bonds rasants qui décrivent une trajectoire parabolique. Chaque phase d'appui au sol a pour effet de freiner la descente du centre de masse et d'inverser son mouvement pour le placer sur une nouvelle trajectoire.

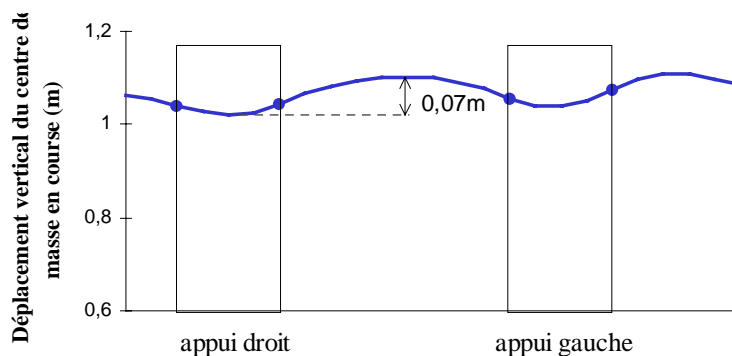


Figure 0-3 : Oscillations verticales du centre de masse en course de vitesse (Oscz).

•

Discussion

Dans notre population de sprinters, le groupe des « Rapides » se distinguent par un appui au sol, en moyenne, légèrement plus court. Le nombre de sujets constituant ce groupe étant restreint, ce résultat n'est pas significatif mais témoigne d'une tendance, qui est en accord avec la plupart des auteurs. En effet, ces derniers mentionnent que les meilleurs sprinters se caractérisent par la brièveté de leur appui au sol (Mero et Komi, 1986 ; Mero et coll., 1982 ; Kunz et Kaufmann, 1981).

Le tableau 3-21 présente les résultats cinématiques de certaines études effectuées avec des sprinters. Nos sujets atteignent une vitesse moyenne (cyclique) supérieure à celle des autres sprinters étudiés, ce qui est cohérent avec le niveau de performance supérieur de nos sujets, hormis les 3 sprinters observés en compétition olympique (Mann et Herman, 1985).

L'amplitude moyenne mesurée dans notre étude est de 2.29m (± 0.08) et elle est supérieure à celle qui est relevée dans les autres études, pour des courses à vitesse maximale sur distance courte. Elle est toutefois inférieure à l'amplitude des foulées que les coureurs peuvent atteindre dans une compétition de sprint, car l'amplitude continue à augmenter après 40m de course. Par exemple, une valeur moyenne de 2.55m (± 0.12) a été mesurée dans les 10 derniers mètres de la finale du 100m des Championnats du Monde de Tokyo en 1991. Au cours de cette épreuve, les sprinters présentaient entre 40 et 50m de course, une amplitude moyenne de 2.47m (± 0.12) et une fréquence de 4.67Hz (± 0.22) (Ae et coll., 1992).

Dans notre étude, la fréquence moyenne des foulées est proche des résultats mesurés par Mero et ses collaborateurs (1982). Les auteurs montrent que les sprinters de niveau de performance différent se distinguent non par leur amplitude de foulée mais par leur fréquence. Nos mesures tendent à confirmer ces résultats puisque, l'amplitude moyenne des foulées n'est pas différente d'un groupe à l'autre, et que les sprinters qui vont le plus vite après 40m de course sont ceux qui présentent la plus grande fréquence, comme le montre la relation significative qui lie la vitesse à l'appui et la fréquence des foulées ($r = 0.90^{***}$). Nous noterons également que 2 sprinters du groupe « Rapides » présentent les fréquences les plus élevées tout en ayant une amplitude relative parmi les plus petites. D'autre part, la relation avec la fréquence reste significative quand nous prenons en considération la vitesse cyclique ($r = 0.64^*$).

Le tableau 3-22 montre que les athlètes féminines de notre étude ont une amplitude de foulée identique à celle des sprinteuses de haut niveau de Cöh et coll. (1999). Pour la même épreuve de course les valeurs sont d'environ 2m avec un rapport de 1.20 en fonction de la taille.

La comparaison entre sprinters et sprinteuses confirme que la différence de vitesse entre les sexes s'explique par une différence d'amplitude des foulées et non de fréquence. Une force musculaire supérieure chez les hommes leur permettrait de se propulser sur une plus grande distance tout en ayant la même durée d'appui au sol que les sprinteuses. Dans leur étude, Mero et Komi (1986) ont relevé une différence d'amplitude de 10.6% entre les deux sexes et ont attribué cette différence à une force de réaction au sol supérieure chez les hommes.

En sprint, les oscillations verticales du centre de masse sont de faible amplitude et nos résultats compris entre 0.04m et 0.09m pour les sprinters, sont conformes aux valeurs de 4.6cm à 8.5cm rapportées par Cöh et coll. (1999) pour une population de sprinteuses. Notre groupe de « Rapides » ne présente pas de comportement différent des autres sprinters, alors que certains auteurs mesurent des variations pic à pic significativement inférieures chez les athlètes les plus performants, par rapport au groupe le moins rapide (Mero et coll., 1982). Dans notre étude, la vitesse d'enregistrement présente ici une limite, pour la mesure avec une plus grande précision des déplacements verticaux du centre de masse.

Les paramètres dynamiques

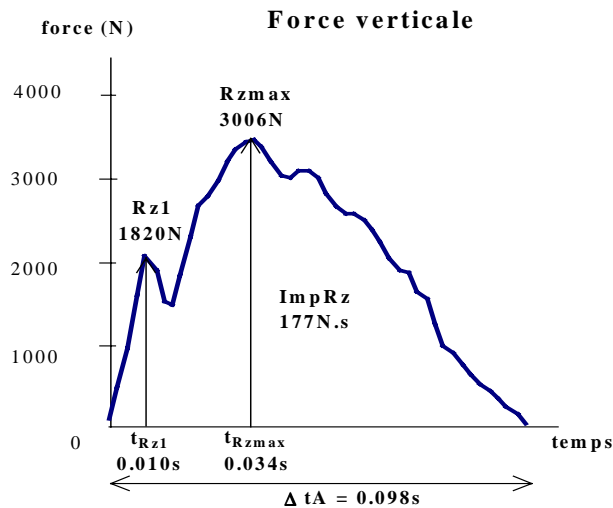
• Résultats

Les variables dynamiques concernent les forces qui s'exercent au niveau du centre de masse du corps (CM).

○ Description des courbes de force de réaction du sol.

La figure 3-4 montre l'évolution typique en fonction du temps, des composantes verticale et horizontale des forces de réaction du sol. Les valeurs moyennes pour la population masculine sont inscrites sur ces courbes et se retrouvent dans les tableaux 3-3 et 3-6.

Dès que le pied du coureur entre en contact avec le sol, la force de réaction verticale s'élève et atteint un premier pic d'une valeur moyenne de 1820.08N (± 505.19) pour les sprinters, ce qui représente près de 2 fois et demie le poids du corps.



Force antéro-postérieure

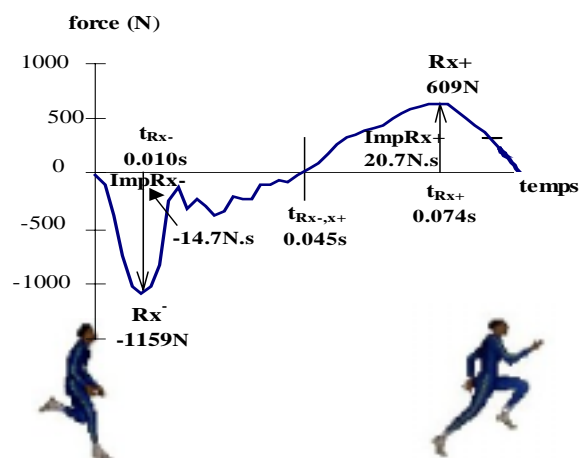


Figure 0-1 : Courbes verticale et antéro-postérieure de réaction du sol au cours de l'appui de sprint.

Le pic initial appelé également pic d'impact ou force verticale passive, est le résultat d'une collision passive du pied avec le sol. Il se produit à 0.010s (± 0.006) en moyenne chez les sujets masculins et coïncide avec l'apparition du pic de freinage horizontal (R_x^-). Après le premier pic, la force verticale active augmente progressivement pour atteindre une valeur maximale (3006.17N ± 422.49) proche de 4 fois le poids du corps, 0.034s après le contact au sol, donc dans la première moitié de l'appui.

Puis, alors que le centre de masse s'élève et que la jambe se tend, la force verticale diminue progressivement pour atteindre zéro quand le pied quitte le sol.

Selon l'axe antéro-postérieur, les forces exercées sont moins élevées que selon l'axe vertical. La force horizontale est d'abord négative dans la première partie de l'appui et elle décélère le mouvement vers l'avant du centre de masse, en même temps que la jambe se fléchit et que le centre de masse s'abaisse. Les valeurs moyennes de force et d'impulsion de freinage atteignent respectivement pour l'ensemble des sprinters – 1158.99N (± 207.45) et -14.67N.s (± 3.81). La force horizontale est égale à zéro, avant le milieu de l'appui, alors que la force verticale est encore proche de son maximum. Cette transition entre la force horizontale de freinage et la force horizontale de propulsion se fait en moyenne à 0.045s (± 0.006).

Dans la seconde partie de l'appui, la force de réaction horizontale est positive et elle accélère le déplacement vers l'avant du centre de masse. Les valeurs de force et d'impulsion de propulsion sont en moyenne, respectivement de 609.11N et de 20.65 N.s.

L'impulsion horizontale nette, égale à la différence entre les impulsions de freinage et de propulsion, est positive (5.98N.s ± 2.11), indiquant que l'impulsion de propulsion est supérieure à l'impulsion de freinage et que les sprinters sont encore en phase d'augmentation de vitesse après 40m de course.

On trouve des corrélations significatives entre l'impulsion et le pic de force correspondant et ceci dans les deux directions. De plus, nous trouvons une relation directe entre l'impulsion normalisée et le temps au pic de freinage ($r = -0.60$ entre $ImpR_x^-$ et $t_{R_x^-}$). La corrélation indique que l'impulsion de freinage normalisée est d'autant plus petite que le temps d'apparition du pic de freinage est précoce.

(ImpRz)	128.06	6.51	177.09	29.12	178.65	34.90	176.50	29.35
Impulsion verticale normalisée en x fois P (*1000) (ImpRzn)	219.52	14.42	233.09	16.99	220.52	25.34	237.80	11.66

Tableau 0-1 : Valeur des paramètres de la dynamique verticale.

Le pic vertical est atteint en moyenne à 0.034s (± 0.006), ce qui représente, pour le groupe masculin 34.84 % (± 5.90) de la durée totale de l'appui. Ce paramètre présente un intérêt particulier car, pour certains auteurs, le pic vertical se produit en même temps que le centre de masse atteint son point le plus bas au cours de l'appui.

Dans le groupe « Rapides », le pic vertical apparaît en moyenne légèrement plus tard, c'est à dire à 40% (± 3.61) de la durée de l'appui (figure 3-7) ; soit dans un temps très proche du passage freinage-propulsion. Cette transition se faisant pour ce groupe à 45.33% (± 1.15) de la durée de l'appui. Ce qui n'est pas le cas pour les « Autres », le pic vertical se produisant à 32.90% (± 5.51) de l'appui et la transition à 45.72% (± 3.60).

Temps normalisé au pic de force verticale

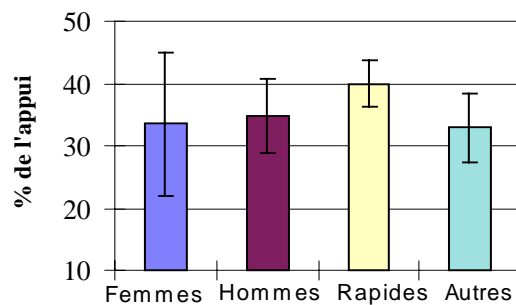
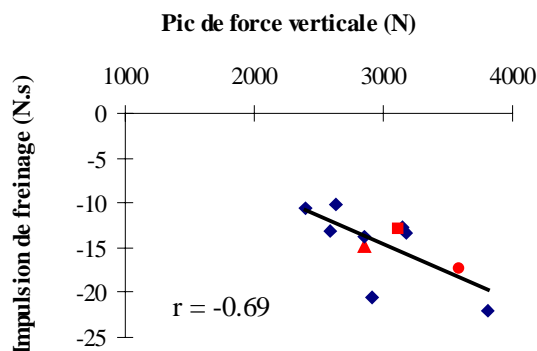


Figure 0-3 : Valeurs de t_{Rzmax} .



Le pic de force verticale semble être en relation avec le freinage horizontal, car nous avons mis en évidence des corrélations significatives entre la force verticale maximale et le pic de freinage ($r = -0.68^*$) et entre la force verticale maximale et l'impulsion de freinage ($r = -0.69^{**}$). Ce qui indiquerait que toute modification de l'une des composantes de force aurait un effet sur l'autre (tableau 3-4 et figure 3-8).

Figure 0-4 : Corrélation entre $Rzmax$ et $ImpRx$.

	P	ImpRz	Rx^-	$ImpRx^-$
$Rzmax$	$r = 0.90^{***}$	$r = 0.76^{***}$	$r = -0.68^*$	$r = -0.69^{**}$

Tableau 0-2 : Corrélations avec le pic de force verticale ($Rzmax$).

L'étude des corrélations montre également que, plus le pic vertical survient tard au cours de l'appui et plus, d'une part, l'impulsion horizontale nette est élevée ($r = 0.73^{***}$ entre t_{Rzmax} et $ImpRx$) plus, d'autre part, le pic de freinage est apparu tôt ($r = -0.69^{**}$ entre t_{Rzmax} et t_{Rx^-}). Ces deux corrélations sont représentées dans les figures 3-9 et 3-10.

La première indique que les coureurs qui atteignent tardivement leur force verticale maximale sont ceux dont l'impulsion nette est la plus élevée, donc ceux qui continuent encore à augmenter leur vitesse après 40m. La deuxième relation indique qu'un pic vertical apparaissant tard au cours de l'appui est lié à un pic de freinage se produisant tôt. Ce comportement semble caractéristique du groupe « Rapides » car ceux-ci se situent d'un seul côté des figures.

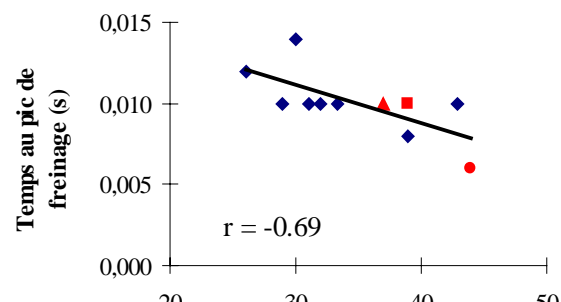
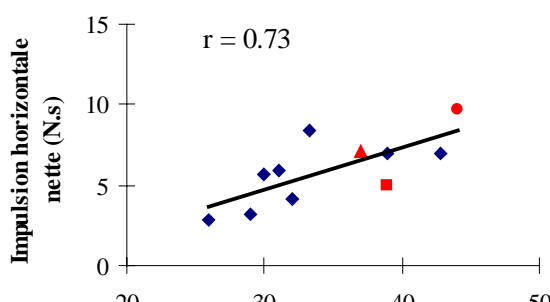
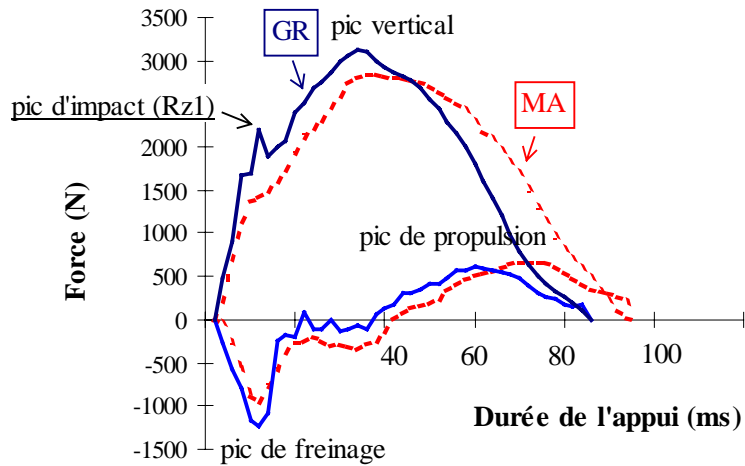


Figure 0-5 : Corrélation entre t_{Rzmax} et $ImpRx$.

Figure 0-6 : Corrélation entre t_{Rzmax} et t_{Rx} .

Le premier pic vertical correspondrait à un choc produit par le pied lors de son contact avec le sol. Il serait, selon certains auteurs, révélateur de la position et de la vitesse du pied au moment du contact. La figure 3-11 montre que l'allure des courbes de réaction du sol peut être différente d'un coureur à l'autre et riche d'enseignements. Le coureur GR effectue un appui plus bref au sol (0.082s) que le sujet MA (0.092s), mais produit un premier pic vertical de grande amplitude, ce qui témoigne d'un choc d'impact au moment du contact au sol. Nous voyons donc que si les courbes de réaction du sol enregistrées au cours de l'appui de course reflètent le comportement global du sprinter (centre de masse), certains des événements repérables sur ces courbes peuvent être mis en relation avec des adaptations segmentaires avant et pendant le contact au sol.



Chez un même coureur, l'allure des courbes de réaction du sol peuvent éventuellement se modifier en fonction de la réalisation des essais. La figure 3-12 présente pour un sujet féminin, les courbes enregistrées durant 2 essais effectués à des vitesses différentes. L'essai 1 correspond à une meilleure performance au 50m et il se traduit par un appui plus court et un pic d'impact nettement diminué. Le pic et l'impulsion de freinage sont également réduits par rapport à l'autre essai. Cet exemple montre que des vitesses différentes se traduisent par des patterns de courbes différents.

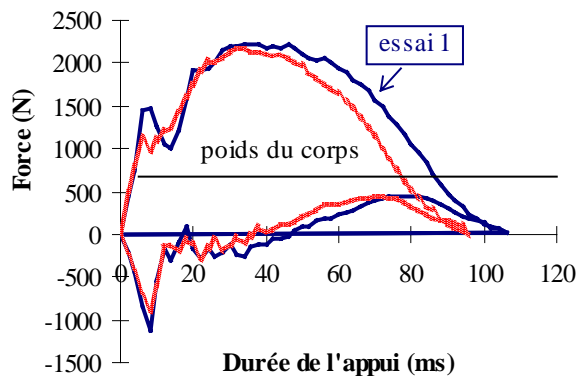


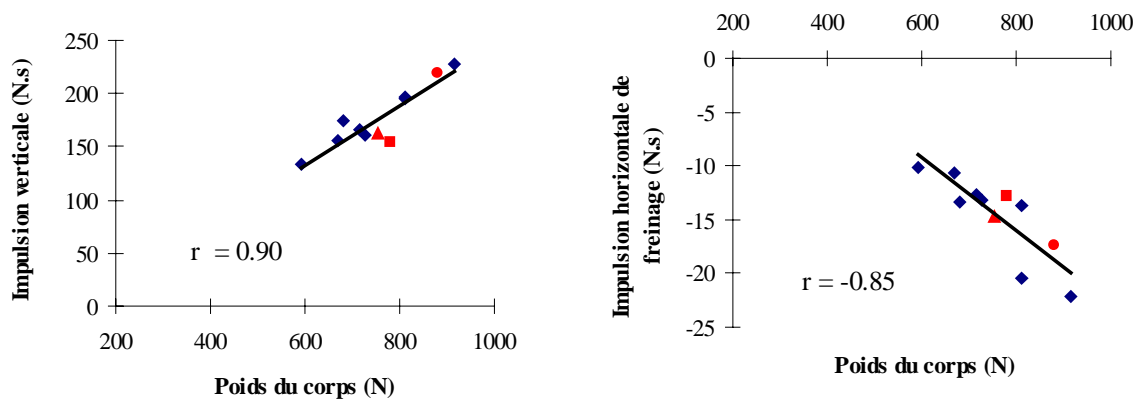
Figure 0-8 : Courbes de réaction du sol d'une sprinteuse au cours de 2 essais différents.

Le poids du corps, appelé force de gravité, est une force verticale dirigée vers le bas, qui reflète l'effet de l'attraction terrestre sur le sujet. Il est en moyenne de 758.05N (± 94.98) pour les sujets masculins et légèrement supérieur dans le groupe « Rapides » (805.73N ± 67.32).

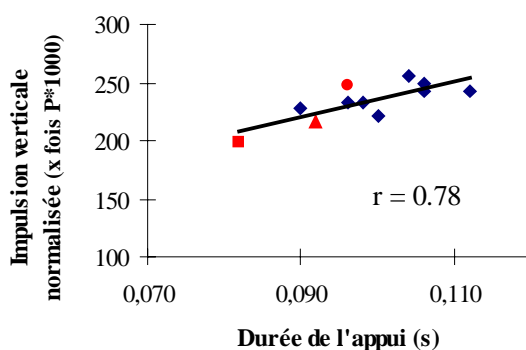
Le tableau 3-5 et les figures 3-13 et 3-14 présentent les corrélations significatives existant avec le poids du corps. Elles indiquent que la gravité est non seulement le principal déterminant de la force et de l'impulsion verticales générées pendant la course, mais qu'elle exerce également une influence majeure sur l'impulsion horizontale pour freiner et accélérer le coureur durant l'appui.

	Rz	Rx ⁺	ImpRz	ImpRx	ImpRx ⁻
P	$r = 0.74^{***}$	$r = 0.67^*$	$r = 0.90^{***}$	$r = 0.78^{***}$	$r = -0.85^{***}$

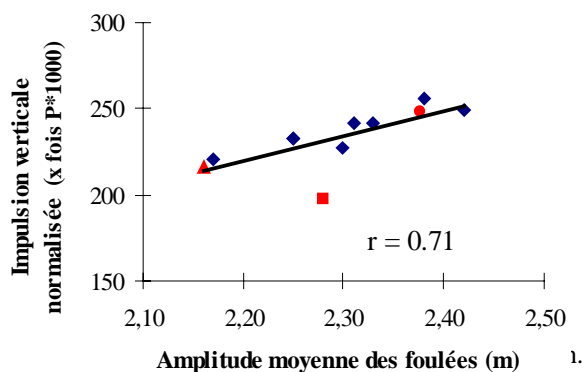
Tableau 0-3: Corrélations avec le poids du corps (P).



Dans notre étude, nous constatons que la durée de l'appui est liée de façon significative à l'impulsion verticale (figure 3-15), ($r = 0.61^*$ pour la valeur absolue et $r = 0.78^{***}$ pour la valeur normalisée). Ce qui est moins attendu, c'est qu'elle ne l'ai pas aux impulsions exercées dans le plan antéro-postérieur. Mais la valeur nettement moins élevée des impulsions horizontales par rapport à l'impulsion verticale pourrait expliquer ce résultat. D'autre part, comme nous l'avions précédemment indiqué, une augmentation de l'impulsion verticale a pour effet de prolonger la durée de freinage de l'appui en retardant la transition freinage-propulsion, et agit ainsi sur la durée de l'appui.



Nos résultats montrent que l'amplitude moyenne des foulées est corrélée positivement avec le pic de force verticale ($r = 0.71^{**}$) et avec l'impulsion verticale ($r = 0.67^*$). Ce qui laisse à penser que pour se projeter sur vers l'avant, le sprinter devrait également produire des forces vers le haut. La figure 3-16 présente la relation entre l'amplitude moyenne des foulées et la valeur normalisée de l'impulsion verticale ($r = 0.71^{**}$). Elle indique que pour développer une amplitude moyenne donnée, les sprinters doivent être capables de produire une impulsion verticale donnée, relative à leur poids de corps.



lisée (x fois P*1000) (ImpRx _n)	6.84	2.64	8.05	3.13	8.91	2.34	7.73	3.46
Temps au passage freinage-propulsion (s) (t _{x-,x+})	0.045	0.008	0.045	0.006	0.041	0.004	0.047	0.005
Temps à t _{x-,x+} normalisé en % du temps d'appui (t _{x-,x+} n)	45.93	4.51	45.62	3.07	45.33	1.15	45.72	3.60

Tableau 0-1: Valeur des paramètres de la dynamique horizontale.

La même remarque peut être faite pour la relation qui lie la durée de l'appui et le temps à la valeur maximale de propulsion (t_{Rx+}). La corrélation est significative avec la valeur absolue de t_{Rx+} (r = 0.81***) (tableau 3-7), et non significative avec sa valeur relative, indiquant que le temps pour atteindre le pic de propulsion horizontale est lié à la durée de l'appui et se produit donc toujours au même pourcentage de cette durée d'appui.

Ce résultat est à nuancer par les corrélations significatives relevées entre le temps à la valeur maximale de propulsion et le temps absolu et relatif au passage freinage-propulsion (r = 0.90*** avec t_{x-,x+} et r = 0.63* avec t_{x-,x+}n) (figure 3-17). Ces relations, et en particulier celle qui lie t_{Rx+} avec la valeur normalisée de t_{x-,x+}, indiquent que plus la part de freinage horizontal diminue au cours de l'appui, plus le coureur atteint sa valeur maximale de propulsion, dans un temps court. Ce qui est confirmé par la relation significative qui lie le temps au pic de propulsion et l'impulsion de freinage (r = -0.60* entre t_{Rx+} et ImpRx⁻ et r = -0.64* entre t_{Rx+} et ImpRx⁻n) (figure 3-18).

	ΔtA	t _{Rx+}
ΔtA		
t _{Rx+}	0.81***	
t _{x-,x+}	0.87***	0.90***
t _{x-,x+} n		0.63*

Tableau 0-2 : Corrélations entre ΔtA, t_{Rx+} et t_{x-,x+}.

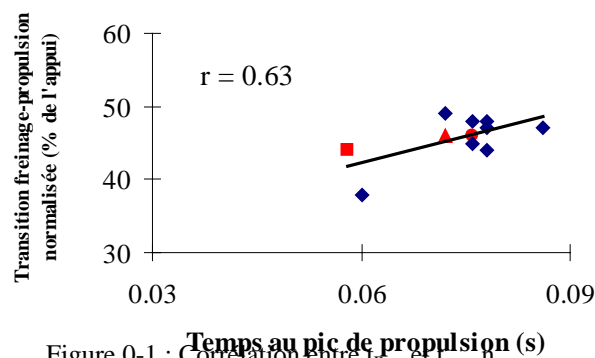


Figure 0-1 : Corrélation entre t_{Rx+} et t_{x-,x+}n.

Le temps au pic de propulsion est également corrélé avec l'impulsion verticale (r = 0.63* entre t_{Rx+} et ImpRz et r = 0.68* avec ImpRzn), comme le montre la figure 3-19. A la lumière des relations qui indiquent qu'un pic de propulsion précoce est lié à une impulsion de freinage et à une impulsion verticale réduites, il semblerait que ce comportement soit à privilégier chez le sprinter. Cette hypothèse est renforcée par un précédent résultat qui montre l'intérêt d'une impulsion verticale réduite afin de limiter la durée de freinage horizontal.

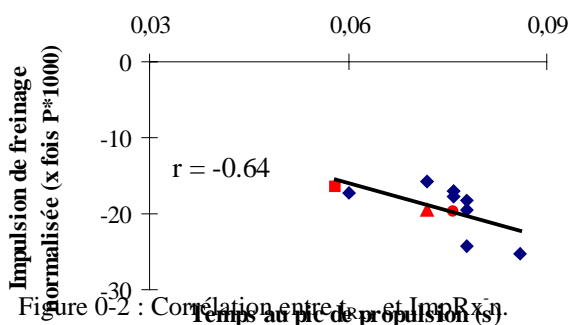


Figure 0-2 : Corrélation entre t_{Rx+} et ImpRx⁻n.

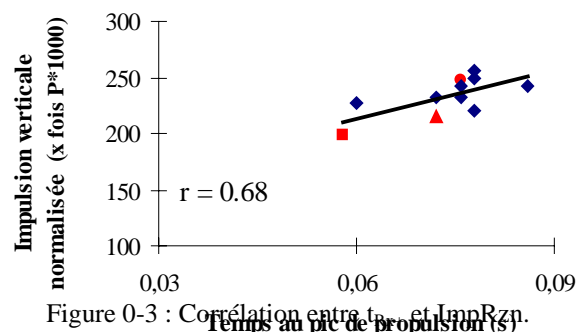


Figure 0-3 : Corrélation entre t_{Rx+} et ImpRzn.

L'impulsion horizontale nette correspond à la différence entre l'impulsion de freinage et l'impulsion de propulsion. Les valeurs positives indiquent que les coureurs sont encore en phase d'accélération. L'impulsion

horizontale nette s'élève en moyenne à 7.24N.s (± 2.36) pour le groupe des « Rapides » et à 5.51N.s (± 1.95) pour celui des « Autres ». La figure 3-20 présente les valeurs normalisées. Dans le groupe « Rapides », 2 sprinters présentent une impulsion nette supérieure à la moyenne des « Autres ». Ce qui montre qu'après 40m de course, leur vitesse augmente plus que celle des autres. Chez ces 2 sprinters, cette augmentation est principalement due à une impulsion de propulsion supérieure à la moyenne.

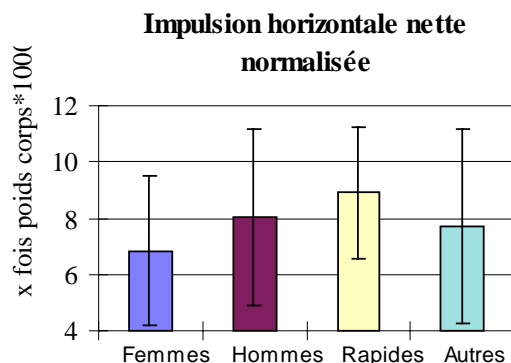


Figure 0-4 : Valeurs de ImpRxn.

Les relations liant les forces horizontales avec les autres paramètres dynamiques sont présentées dans le tableau 3-8. Elles montrent que les forces horizontales sont corrélées, d'une part avec les impulsions (de propulsion et de freinage), et d'autre part avec les forces ou impulsions s'exerçant dans le plan vertical (poids du corps, pic Rz et impulsion verticale).

	P	impRz	ImpRx ⁺	ImpRx ⁻		Rzmax	ImpRx ⁻
Rx ⁺	$r = 0.67^*$	$r = 0.60^*$	$r = 0.92^{***}$	$r = -0.76^{***}$	Rx ⁻	$r = -0.68^*$	$r = 0.63^*$

Tableau 0-3 : Corrélations avec les forces horizontales de propulsion (Rx⁺) et de freinage (Rx⁻).

L'étude des impulsions produites au cours de l'appui renforce ces résultats. En effet, l'impulsion verticale est corrélée de façon significative, d'une part positivement avec l'impulsion de propulsion ($r = 0.80^{***}$), et d'autre part négativement avec l'impulsion de freinage ($r = -0.86^{***}$). Ce qui montre que l'élévation d'une force influe sur une autre et que le rapport entre les forces verticale et horizontales tend à rester constant (tableau 3-9, figures 3-21 et 3-22).

	ImpRz	ImpRx ⁺
ImpRz		
ImpRx ⁺	$r = 0.80^{***}$	
ImpRx ⁻	$r = -0.86^{***}$	$r = -0.85^{***}$

Tableau 0-4 : Corrélations entre les impulsions

Le coureur doit donc trouver le juste compromis entre la production de forces dans le plan vertical et dans le plan horizontal. Ce qui confirme ce qui a été mentionné précédemment à propos de l'amplitude des foulées.

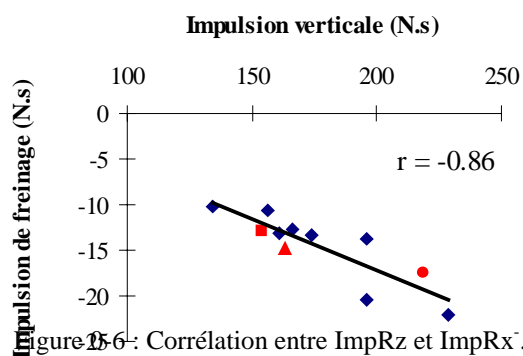
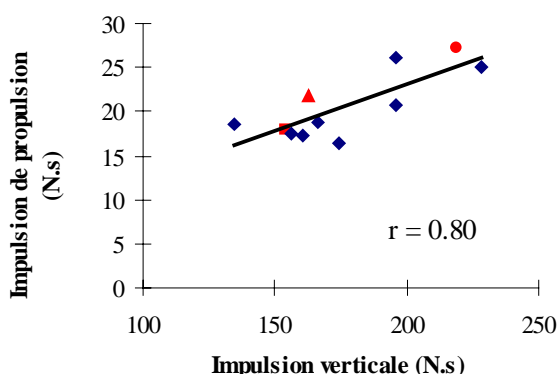


Figure 0-6 : Corrélation entre ImpRz et ImpRx⁻.

DISCUSSION

Au moment du contact au sol, en même temps que la jambe d'appui se fléchit et que le centre de masse descend, la force verticale exercée par le sprinter augmente jusqu'à une valeur maximale qui se produit au cours de la phase de freinage horizontal, légèrement avant le milieu de la phase d'appui. Ce qui est en accord avec les

résultats de Mero et coll. (1992) qui indiquent que le pic de force se produit entre 10 et 40 ms après le premier contact au sol.

Conformément aux données de la littérature, nous trouvons également qu'en sprint, les valeurs maximales de force sont produites au cours de la phase de freinage de l'appui.

Selon certains auteurs, le pic maximum de force verticale correspondrait au point le plus bas atteint par le centre de masse (Farley et Gonzalez, 1996 ; Chang et coll., 2000).

Il semblerait, en interprétant les corrélations que nous avons relevées, que le pic vertical et par conséquent le point le plus bas du centre de masse se produiraient d'autant plus tardivement au cours de l'appui, que les sprinters seraient encore en train d'accélérer.

En nous référant aux comportements des sprinters à la sortie des starting-blocks, lorsque l'accélération est très grande, nous constatons en effet, que le pic vertical se produit dans la deuxième moitié de l'appui, donc relativement tard par rapport à la phase de pleine vitesse. Dans le même temps, le pic de freinage se produit tôt au cours de l'appui et l'impulsion de freinage est faible. Quand le coureur atteint une vitesse élevée, nous relevons le même type de comportement pour le freinage, c'est à dire que plus le pic de freinage apparaît tôt, plus l'impulsion de freinage tend à être réduite.

Donc, à mesure que la vitesse tend à se stabiliser et que l'impulsion nette diminue, le pic vertical apparaîtrait plus tôt au cours de l'appui et le pic de freinage plus tard. Ces 2 indices pourraient être des repères permettant de vérifier l'atteinte par le sprinter de sa vitesse maximale. Il serait alors judicieux d'étudier si des paramètres cinématiques sont liés à ces variables dynamiques et permettraient de caractériser le comportement segmentaire du sprinter en phase de vitesse maximale.

Le premier pic de force vertical est le résultat d'une collision passive entre le pied et le sol au moment du contact. Dans notre étude, l'absence de corrélations entre le pic d'impact et les autres paramètres dynamiques tendrait à confirmer le caractère passif de cette force. Certains auteurs ont montré qu'un contact en plante de pied peut atténuer et même, faire disparaître le pic d'impact (Payne, 1983, Mero et coll., 1992 ; Farley et Gonzalez, 1996). Selon Hamill et coll. (1995), le contact avec le sol cause une onde de choc qui se propage à travers le système squelettique et atteint l'ensemble de l'appareil locomoteur. Des ajustements segmentaires seraient mis en place par le coureur pour atténuer le choc, comme une flexion au niveau de l'articulation du genou. L'atténuation du choc serait un élément important à prendre en considération pour optimiser l'entraînement.

En ce qui concerne le poids du corps, nos observations rejoignent celles que Chang et coll. (2000) ont faites dans leur étude réalisée à des vitesses sub-maximales. Nous constatons en effet, que la gravité exerce une influence majeure sur la production de force, autant dans le plan vertical que dans le plan horizontal. Les auteurs indiquent qu'il est préférable de considérer le vecteur force résultant plutôt que ses composantes prises comme des entités indépendantes. Dans notre étude, le fait que les différentes impulsions soient fortement corrélées entre elles, montre bien l'influence exercée par les différentes composantes, les unes sur les autres, et indique que le rapport entre les impulsions verticale et horizontale tend à rester constant. Ce qui appuie les propos de Chang et coll. (2000) qui montrent que les changements de grandeur de la composante verticale sont accompagnés de changements proportionnels de la composante horizontale afin de maintenir l'orientation du vecteur force résultant. Ce comportement aurait pour effet, selon les auteurs, de maintenir l'alignement du vecteur avec la jambe d'appui. Les coureurs aligneraient le vecteur force résultant avec le grand axe de la jambe, afin de réduire les moments de force à chaque articulation et donc la force nécessaire pour produire ces moments. Par voie de conséquence, le coût métabolique serait également réduit.

Par ailleurs, McMahon et coll. (1987) ont démontré qu'une flexion supplémentaire du genou au cours de l'appui d'environ 14% augmentait de 40% le coût métabolique de la course. Selon ce principe, une jambe relativement tendue au sol, donc plus raide, aurait une plus grande efficacité mécanique, puisque chaque articulation de la jambe serait plus près de la ligne d'action du vecteur force et les moments de force seraient réduits.

Le sprinter a donc tout intérêt à maintenir la raideur de la jambe d'appui en limitant sa flexion.

Par contre, comme une jambe relativement raide pourrait occasionner un choc, une prise de contact au sol par la plante de pied semble indispensable.

L'autre mécanisme à mettre en jeu par le sprinter pour atténuer le choc du contact est l'action de "griffé" qui précède l'appui et qui s'accompagne d'une activation musculaire précoce, nécessaire au maintien de la raideur de la jambe (Wood, 1987 ; Mero et coll., 1992 ; Cöh et coll., 1999).

L'impulsion correspond au produit de la force exercée par la durée d'application de cette force. L'étude des corrélations montre que dans les deux plans de l'espace, les impulsions sont principalement liées aux forces exercées. La force produite selon l'axe vertical étant nettement plus élevée que selon l'axe horizontal, l'impulsion verticale atteint également une plus grande valeur. Ce qui peut expliquer que la durée de l'appui soit plus en relation avec l'impulsion verticale qu'avec les autres impulsions.

La relation existant entre l'appui et l'impulsion verticale montre qu'il ne serait pas souhaitable d'atteindre des valeurs élevées d'impulsion verticale, car cela supposerait une durée d'appui plus longue au sol, ce qui n'est pas recherché par le sprinter. Cette hypothèse est soutenue par certains auteurs qui mentionnent que les meilleurs sprinters limitent leur impulsion verticale au cours de l'appui de course (Mann et Herman, 1985). Dans notre étude, la relation montrant que l'impulsion verticale augmente avec la durée du freinage horizontal, tend également à renforcer cette hypothèse.

Toutefois, pour obtenir une amplitude de foulées donnée, une impulsion dirigée verticalement est nécessaire. Le sprinter doit donc, pour optimiser l'amplitude de ses foulées, produire une certaine quantité d'impulsion verticale, sans que celle-ci soit excessive. En effet, cela pourrait nuire à la brièveté de l'appui et générer des forces de freinage élevées, puisque le pic vertical (se produisant en phase de freinage) est lié à l'impulsion verticale mais également au pic de freinage et à l'impulsion de freinage (figure 3-8). Mero et Komi (1986) ont montré que l'amplitude des foulées et la vitesse de course étaient corrélées de façon significative avec la force résultante nette moyenne. Les auteurs ont d'ailleurs proposé de retenir cette variable comme indicateur spécifique de force chez le sprinter.

Mero et coll. (1992) rappellent qu'en sprint, le pic de freinage et la durée de freinage horizontal devraient être aussi petits que possible afin de limiter la baisse de vitesse se produisant au début de l'appui au sol. Le but du sprinter devrait être d'orienter la force résultante le plus verticalement possible en phase de freinage (ce qui est le témoin d'une force de freinage réduite) et le plus horizontalement possible, en phase de propulsion.

Son but serait également de développer son maximum de force propulsive, tôt au cours de l'appui. En effet, selon Wood (1987), les meilleurs sprinters non seulement réduisent les forces de freinage lors du contact au sol, mais génèrent également des forces propulsives tôt au cours de l'appui, afin de quitter le sol sans délai. Nos résultats soutiennent les hypothèses de l'auteur, en montrant que l'atteinte dans un temps court du pic de propulsion était liée à une durée et à une impulsion de freinage horizontale réduites.

Les paramètres cinématiques

La représentation filaire du coureur est l'étape permettant le calcul des déplacements, angles et vitesses segmentaires. L'exemple d'un coureur est proposé dans la figure 3-23.

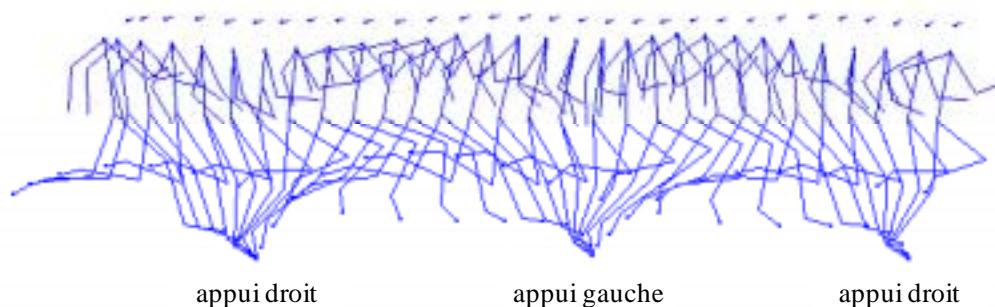


Figure 0-1 : Représentation filaire du coureur durant un cycle complet de course

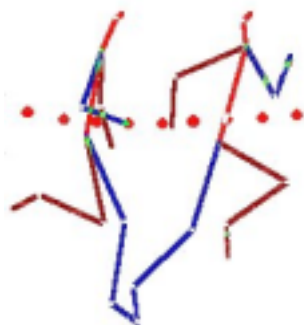


Figure 0-2 : Le centre de masse au cours de l'appui.

Au cours de l'appui, le centre de masse du coureur suit un trajet dirigé vers le bas, dans la première partie de l'appui quand la jambe se fléchit, puis vers le haut dans la deuxième partie, en même temps que la jambe d'appui se tend (figure 3-24).

La hauteur du centre de masse au poser (dzt_1) est de 1.04m (± 0.04) et ne varie pas en fonction des groupes. La valeur normalisée par rapport à la taille permet de comparer les coureurs et d'apprécier l'attitude plus ou moins haute du sprinter. Cette valeur est en moyenne de 57.27% (± 2.00) pour la population masculine.

La hauteur du centre de masse au poser (dzt_1) est de 1.04m (± 0.04) et ne varie pas en fonction des groupes. La valeur normalisée par rapport à la taille permet de comparer les coureurs et d'apprécier l'attitude plus ou moins haute du sprinter. Cette valeur est en moyenne de 57.27% (± 2.00) pour la population masculine.

•

La jambe d'appui

Le tableau 3-10 présente les valeurs angulaires moyennes des différents groupes de sujets et la figure 3-25 donne les résultats obtenus pour le groupe des « Hommes » au début et en fin de contact au sol.

	Femmes		Hommes		Rapides		Autres	
	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET
angle cuisse-verticale au poser ($\alpha 1_t$)	-34.17	3.13	-28.45	4.84	-30.00	7.00	-27.88	4.26
angle cuisse-verticale au quitter ($\alpha 1_{t-o}$)	15.00	9.36	17.91	6.73	9.67	3.79	21.00	4.54
extension de hanche à l'appui ($ext\alpha 1$)	49.17	8.64	46.36	6.19	39.67	3.51	48.88	4.97
angle du genou au poser ($\alpha 2_t$)	147.83	2.48	155.82	7.44	157.00	10.15	155.38	6.99
angle minimum du genou ($\alpha 2_{min}$)	134.33	6.19	141.91	6.83	143.67	9.07	141.25	6.43
angle du genou au quitter ($\alpha 2_{t-o}$)	150.00	7.40	154.55	7.20	149.00	6.93	156.63	6.50
flexion du genou à l'appui ($flex\alpha 2$)	13.50	5.50	13.91	3.70	13.33	2.08	14.13	4.26
extension du genou à l'appui ($ext\alpha 2$)	15.67	4.27	12.64	5.80	5.33	2.52	15.38	3.85
angle de la cheville au poser ($\alpha 3_t$)	123.83	16.06	128.09	10.18	129.67	8.08	127.50	11.31
angle minimum de la cheville ($\alpha 3_{min}$)	100.33	12.24	105.36	8.46	107.67	9.07	104.50	8.70
angle de la cheville au quitter ($\alpha 3_{t-o}$)	129.00	12.57	133.36	10.41	128.67	15.57	135.13	8.53
flexion de la cheville ($flex\alpha 3$)	23.50	9.85	22.73	4.86	22.00	1.73	23.00	5.71
extension de la cheville ($ext\alpha 3$)	28.67	9.97	28.00	8.07	21.00	7.21	30.63	7.03
angle entre les cuisses au poser ($\alpha 4_t$)	25.50	5.61	7.73	10.04	4.33	17.62	9.00	6.97
angle jambe-horizontale au poser ($\alpha 5_t$)	88.50	4.23	85.55	5.05	82.67	3.06	86.63	5.37

Tableau 0-1 : Résultats des angles articulaires au cours de l'appui (en degrés).

Au moment du contact avec le sol, le genou de la jambe d'appui forme un angle de $155.82^\circ (\pm 7.44)$ et au même instant, l'angle de la cheville est de $128.09^\circ (\pm 10.18)$. L'angle formé par la cuisse et la verticale permet d'exprimer les mouvements au niveau de la hanche. Au poser, cet angle est de $-28.45^\circ (\pm 4.84)$ et celui que forme la jambe avec l'horizontale s'élève à $85.55^\circ (\pm 5.05)$.

L'angle entre les 2 cuisses au moment du contact au sol est en moyenne de $7.73^\circ (\pm 10.04)$, mais cette valeur subit de grandes variations dans la population masculine, comme en témoigne la valeur des écart-types. En effet, pour certains coureurs, les cuisses sont presque parallèles lors du poser et l'un des sprinters du groupe « Rapides » présente une valeur négative, indiquant que la cuisse libre a dépassé la jambe d'appui au moment du contact. Les valeurs d'angle entre les 2 cuisses sont plus élevées pour la population féminine.

Pendant le contact au sol, pour amortir le choc, la jambe se fléchit en moyenne de $13.91^\circ (\pm 3.70)$ au niveau du genou et de $22.73^\circ (\pm 4.86)$ au niveau de la cheville. L'articulation de la hanche se tend tout au long de l'appui et l'angle couvert par la cuisse entre le poser et le quitter, témoigne de cette extension. Il atteint une valeur de $46.36^\circ (\pm 6.19)$. L'extension du genou au cours de l'appui est de $12.64^\circ (\pm 5.80)$, celle de la cheville est de plus du double, $28.00^\circ (\pm 8.07)$.

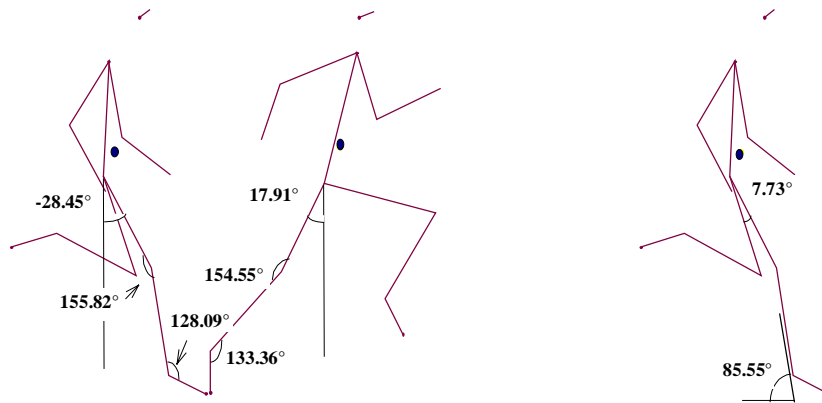


Figure 0-1: Angles articulaires au poser et au quitter (valeurs moyennes des hommes).

La figure 3-26 montre chez un sprinter les variations angulaires du genou et de la cheville pendant un cycle de jambe complet. Nous pouvons constater qu'au cours de l'appui au sol, les 2 articulations se fléchissent et s'étendent en même temps, avec de plus grandes variations angulaires au niveau de la cheville.

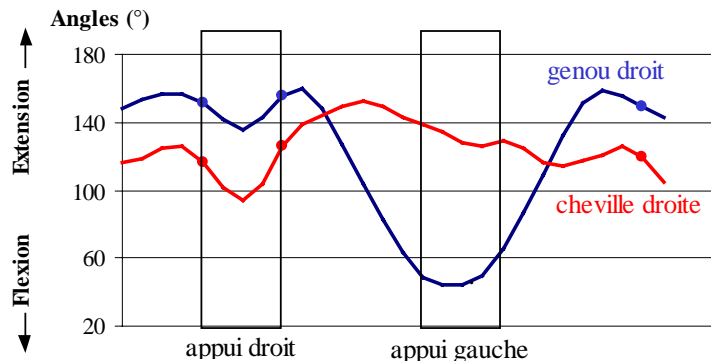


Figure 0-2 : Variations angulaires du genou et de la cheville lors du cycle de jambe.

Il est visible également que la flexion des 2 articulations précède le contact et que la jambe continue de s'étendre après le décollage du sol. Puis lors de son retour, la jambe se fléchit dans un premier temps et le genou atteint sa flexion maximale pendant l'appui opposé.

Au moment de quitter le sol, la jambe d'appui est loin de l'extension maximale, puisque l'angle du genou est en moyenne de 154.55° (± 7.20).

Les sprinters du groupe « Rapides » présente au niveau du genou comme de la hanche, une valeur d'extension inférieure aux « Autres » (figures 3-27 et 3-28). Ce qui peut s'expliquer par une durée d'appui au sol plus courte pour ce groupe.

Par rapport à la projection verticale du centre de masse, le contact se fait à une distance horizontale moyenne (d_{xt}) de 0.22m (± 0.05) pour la population masculine (tableau 3-11 ; figure 3-29).

Extension de la hanche

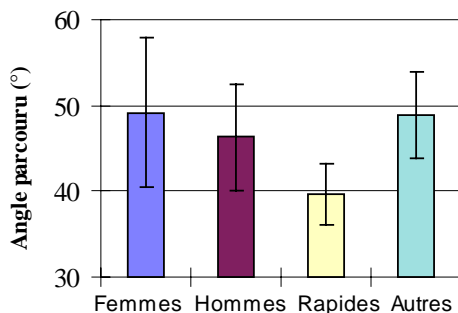


Figure 0-4 : extα1 au cours de l'appui.

Au cours de l'appui, le centre de masse se déplace horizontalement sur une distance (d_{GxA}) de 0.85m (± 0.10) chez les hommes et de 0.77m (± 0.13) chez les femmes. Celles-ci parcourent donc une distance inférieure à celle des hommes, pour une durée d'appui au sol à peu près identique. La capacité des sprinters à développer dans le même temps, des forces horizontales supérieures à celles des sprinteuses, explique qu'ils se propulsent sur une distance plus grande quand la jambe est en contact avec le sol. Et cela explique aussi que leur vitesse moyenne à l'appui soit plus élevée, puisque le calcul de la vitesse met en relation la distance parcourue et le temps pour le faire. Pour élever la vitesse moyenne à l'appui, une solution consiste à augmenter le déplacement horizontal du centre de masse pendant un temps donné, une autre nécessité de réduire la durée du contact avec le sol, ce qu'effectue le groupe « Rapides ».

	Femmes		Hommes		Rapides		Autres	
	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET
distance de contact (m) (d_{xt_1})	0.32	0.09	0.33	0.05	0.35	0.03	0.32	0.06
distance de décollage (m) (d_{xt_0})	0.45	0.07	0.51	0.07	0.44	0.03	0.54	0.06
amplitude de CM à l'appui (m) (d_{GxA})	0.77	0.13	0.85	0.10	0.81	0.01	0.87	0.11

Tableau 0-2: Le centre de masse au cours de l'appui.

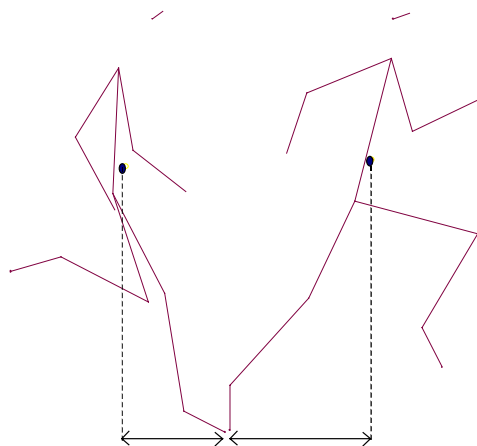
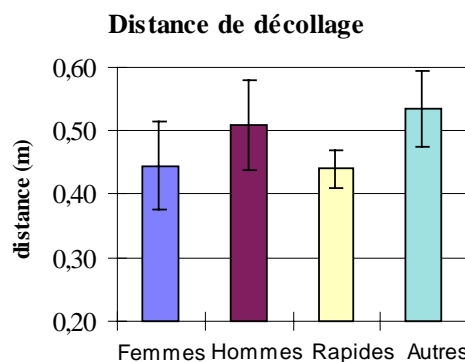
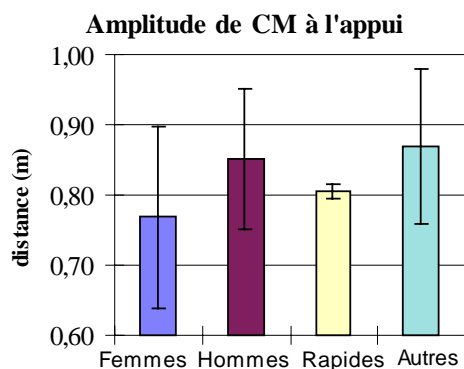


Figure 0-5 : $d_{xt_1} = 0.33$ m $d_{xt_0} = 0.51$ m décollage à l'appui.

La figure 3-30 montre également que ce groupe se déplace à l'appui sur une distance inférieure en moyenne aux « Autres ». Cette amplitude plus réduite au cours de l'appui est principalement due à une distance de décollage inférieure pour ce groupe (figure 3-31). Un tel comportement peut être associé à une extension de la jambe d'appui plus limitée (figures 3-27 et 3-28).

Nous constatons, par ailleurs, que deux sprinters du groupe « Rapides » ont une distance de contact supérieure à la moyenne des « Autres ». Nous verrons que cette façon d'agir n'est pas à rechercher car il est reconnu et nos résultats le confirment également, que la distance horizontale de contact est à l'origine du freinage qui se produit au début de la phase d'appui.

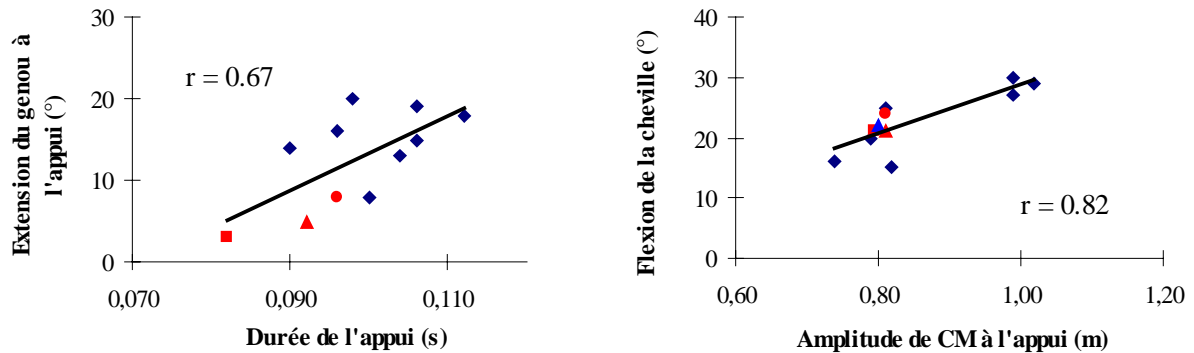


La mise en relation des variables cinématiques entre elles et avec les paramètres dynamiques permet une description plus précise du comportement segmentaire des sprinters.

Les résultats de notre étude indiquent que les durées d'appui (Δt_A) les plus brèves sont liées à une moindre extension de la jambe. En effet, la durée du contact au sol est liée, d'une part à l'extension de la hanche ($r = 0.65^*$), et d'autre part à l'extension du genou ($r = 0.67^*$) (tableau 3-12, figure 3-32).

	d_{GxA}	$ext\alpha 1$	$ext\alpha 2$	$dzPou$	$ImpRzn$	$t_{R_{x+}}$	$t_{x_{-},x+}$
Δt_A	$r = 0.67$ *	$r = 0.65$ *	$r = 0.67$ *	$r = 0.64$ *	$r = 0.78$ ***	$r = 0.76$ ***	$r = 0.87$ ***

Tableau 0-3: Corrélations avec Δt_A .



Par ailleurs, nous avons constaté chez les sprinters, qu'il existait une relation significative entre la durée de l'appui et l'amplitude horizontale du centre de masse ($r = 0.67^*$ entre Δt_A et d_{GxA}). Un appui bref ne peut donc permettre de produire un grand déplacement du centre de masse.

D'autre part, la vitesse moyenne à l'appui est liée au déplacement du centre de masse comme le confirme la relation significative que nous avons pu relever entre VmA et d_{GxA} ($r = 0.61^*$). Ainsi, pour atteindre des vitesses élevées, les sprinters les plus rapides réduisent ils à la fois la durée de l'appui au sol et le déplacement horizontal de leur centre de masse au cours de l'appui.

Nos résultats indiquent également que le déplacement du centre de masse est lié à l'extension de la hanche ($r = 0.76^{***}$ avec $ext\alpha 1$) et que plus ce déplacement au cours de l'appui est grand plus la jambe se fléchit au niveau du genou ($r = 0.72^{**}$ avec $flex\alpha 2$) et de la cheville ($r = 0.82^{***}$ avec $flex\alpha 3$) (figure 3-33).

Ces deux corrélations montrent bien qu'une valeur élevée de d_{GxA} ne va pas dans le sens d'une raideur de la jambe d'appui. Nous avons également pu constater que cette variable (d_{GxA}) était liée à l'impulsion verticale ($r = 0.63^*$) et à l'impulsion de freinage ($r = -0.63^*$) (tableau 3-13).

d_{GxA}			
Δt_A	$r = 0.67^*$	VmA	$r = 0.61^*$
$ImpRz$	$r = 0.63^*$	$ext\alpha 1$	$r = 0.76^{***}$
$ImpRx$	$r = -0.63^*$	$flex\alpha 2$	$r = 0.72^{**}$
dxt_t	$r = 0.66^*$	$flex\alpha 3$	$r = 0.82^{***}$
dxt_{t-o}	$r = 0.82^{***}$		

Tableau 0-4: Corrélations avec d_{GxA} .

La distance de décollage (dxt_{t-o}) ne présente pas de corrélations avec les paramètres dynamiques. Elle est le résultat de l'extension de la jambe d'appui, et la principale cause de l'amplitude du centre de masse à l'appui ($r = 0.82^{***}$) (tableau 3-14).

	$ext\alpha 1$	$\alpha 1t_{t-o}$	$ext\alpha 2$	$\alpha 3t_{t-o}$	$ext\alpha 3$	d_{GxA}
dxt_{t-o}	$r = 0.86^{***}$	$r = 0.81^{***}$	$r = 0.73^{***}$	$r = 0.69^{**}$	$r = 0.71^{**}$	$r = 0.82^{***}$

Tableau 0-5 : Corrélations avec dxt_{t-o} .

Les relations entre la distance de contact (dxt_t) et les paramètres dynamiques montrent que dxt_t a un effet sur les impulsions exercées dans les deux directions de l'espace, alors qu'il est le plus souvent admis que la distance de contact joue un rôle principalement dans le freinage horizontal ($r = -0.73^{***}$ avec l'impulsion de freinage, $r = 0.72^{**}$ avec l'impulsion de propulsion et $r = 0.82^{***}$ avec l'impulsion verticale) (tableau 3-15, figures 3-34 et 3-35).

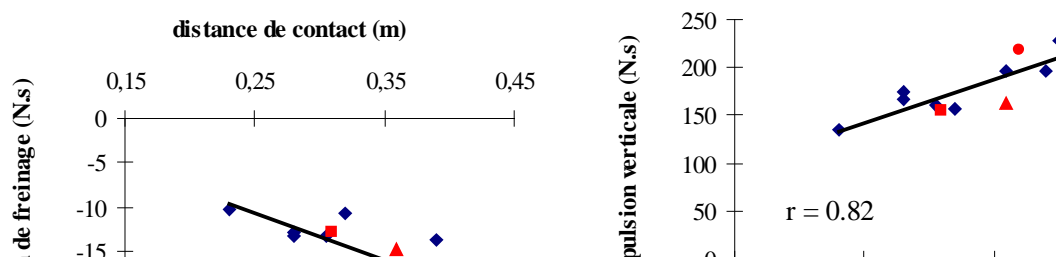


Figure 0-10 : Corrélation entre dxt_i et $ImpRx^-$.

Figure 0-11 : Corrélation entre dxt_i et $ImpRz$.

	P	$ImpRx^-$	$ImpRx^+$	$ImpRz$	flex α_3	d_GxA
dxt_i	$r = 0.89^{***}$	$r = -0.73^{***}$	$r = 0.72^{***}$	$r = 0.82^{***}$	$r = 0.74^{***}$	$r = 0.66^*$

Tableau 0-6: Corrélations avec dxt_i .

Par ailleurs, nos résultats indiquent qu'il existe une forte corrélation entre dxt_i et le poids du corps ($r = 0.89^{***}$, figure 3-36). Ainsi, les sprinters les plus lourds ont tendance à prendre contact plus en avant de leur centre de masse. Comme nous avons montré précédemment que le poids du corps jouait un rôle autant dans l'impulsion verticale que dans l'impulsion horizontale, il n'est donc pas étonnant qu'une augmentation de la distance de contact par les sujets les plus lourds provoquent des impulsions plus élevées dans les deux directions de l'espace.

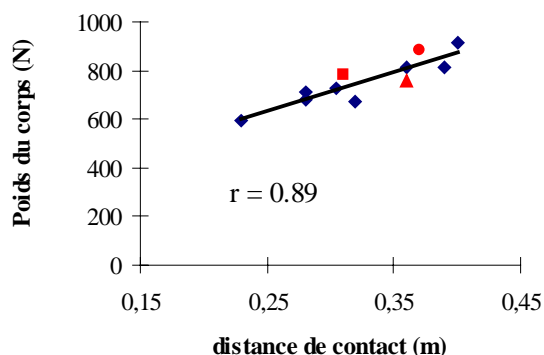


Figure 0-12 : Corrélation entre dxt_i et P.

Dans notre étude, nous avons également mis en évidence une corrélation très significative entre la distance de contact et la flexion de la cheville ($r = 0.74^{***}$ avec flex α_3) qui montre que plus le contact se fait en avant du centre de masse et plus la flexion dorsale est importante au niveau de la cheville, ce qui tend à nuire à la raideur de la jambe au cours de l'appui. Raideur d'autant plus perturbée que cette variable (dxt_i) est liée à l'amplitude du centre de masse à l'appui ($r = 0.66^*$ avec d_GxA) et participe ainsi indirectement à une augmentation de la flexion du genou au cours de l'appui (tableau 3-13).

Au niveau de la jambe d'appui, les variables angulaires présentent un certain nombre de relations entre elles. Dans le tableau 3-16, sont indiquées, à l'instant du contact au sol, les corrélations entre les angles de la jambe, au niveau de la cuisse avec la verticale (α_{1t_i}), du genou (α_{2t_i}), de la cheville (α_{3t_i}), et de la jambe avec l'horizontale (α_{5t_i}).

	α_{1t_i}	α_{2t_i}	α_{3t_i}
α_{1t_i}			
α_{2t_i}	$r = 0.73^{***}$		
α_{3t_i}		$r = 0.77^{***}$	
α_{5t_i}		$r = -0.76^{***}$	$r = -0.81^{***}$

Tableau 0-7 : Corrélations entre les angles α_1 , α_2 , α_3 et α_5 au poser.

Lors de la prise de contact au sol, l'angle du genou (α_2) est lié à l'angle compris entre la cuisse et la verticale (α_1) ($r = 0.73^{***}$). La valeur de α_{1t_i} étant négative, la relation indique que plus le genou est tendu et plus l'angle α_1 est petit, donc la cuisse proche de la verticale (figure 3-37). En même temps, plus le centre de masse a une position haute au poser, comme le montrent les relations entre dz et α_2 ($r = 0.60^*$) et entre dz normalisée et α_1 ($r = 0.65^*$). La figure 3-38 illustre cette dernière relation en montrant que plus l'angle α_{1t_i} est réduit et plus le centre de masse est haut par rapport à la taille de l'athlète (dzn). Ce comportement montre le souci du sprinter de prendre contact au sol avec une position haute du bassin, grâce à une jambe d'appui relativement tendue et une cuisse se rapprochant de la verticale.

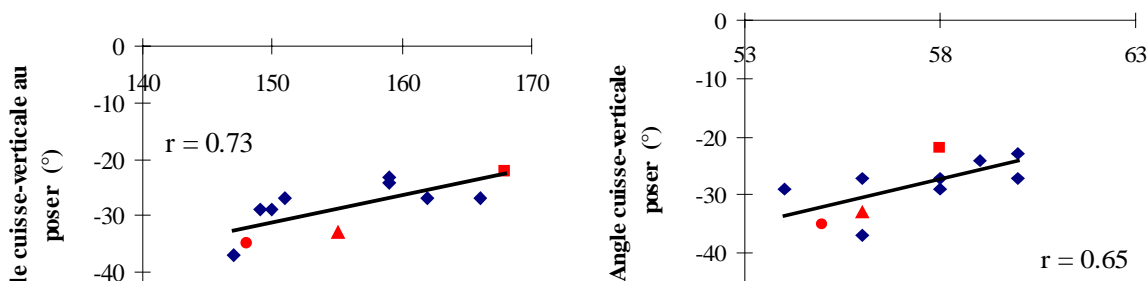
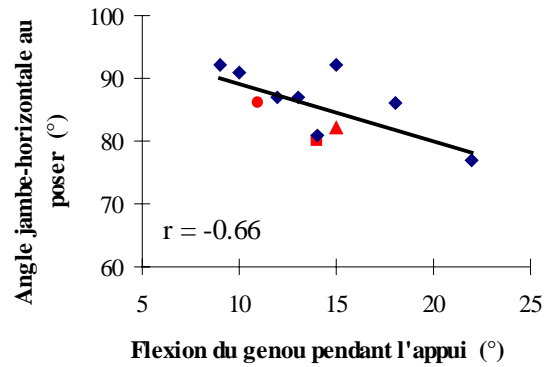
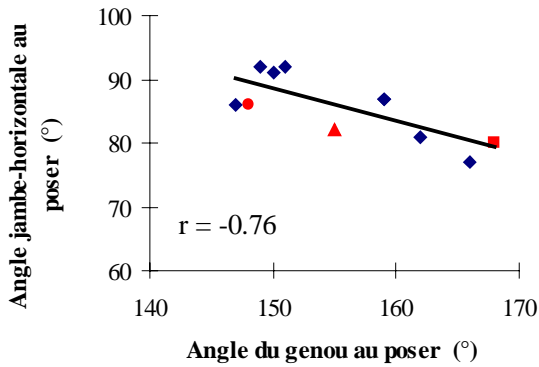


Figure 0-13 : Corrélation entre $\alpha 1t_1$ et $\alpha 2t_1$.

Figure 0-14 : Corrélation entre $\alpha 1t_1$ et dzn.

Cependant, plus le genou est tendu au moment du contact, plus la jambe forme un angle aigu avec l'horizontale ; la corrélation entre $\alpha 2t_1$ et $\alpha 5t_1$ est à ce titre, très significative ($r = -0.76^{***}$) (figure 3-39).

Il est bien visible sur la figure 3-37 que plus le genou est tendu, plus la cuisse est proche de la verticale et sur la figure 3-39, que le contact genou tendu amène la jambe à former un angle de plus en plus aigu avec le sol, et donc le pied à se poser en avant du genou. Ainsi, quand le contact est proche de la verticale du genou (angle $\alpha 5t_1$ proche de 90°), la jambe est plus fléchie.



En même temps que la contact se fait la jambe plus tendue et le pied plus en avant du genou, l'angle de la cheville est de plus en plus ouvert, en flexion plantaire. C'est ce qu'indiquent les corrélations entre $\alpha 2t_1$ et $\alpha 3t_1$ ($r = 0.77^{***}$) et entre $\alpha 5t_1$ et $\alpha 3t_1$ ($r = -0.81^{***}$) lors du contact.

Le tableau 3-17 présente les corrélations avec l'angle formé par la jambe et l'horizontale, lors du poser ($\alpha 5t_1$).

	$\alpha 5t_1$	
P	$r = -0.66^*$	dhxt ₁ $r = -0.65^*$
VmA	$r = -0.67^*$	$\alpha 3t_1$ $r = -0.81^{***}$
f	$r = -0.60^*$	flex $\alpha 3$ $r = -0.63^*$
$\alpha 2t_1$	$r = -0.76^{***}$	Rx ⁺ $r = -0.73^{***}$
flex $\alpha 2$	$r = -0.66^*$	ImpRx ⁻ $r = 0.74^{***}$

Tableau 0-8: Corrélations avec l'angle $\alpha 5t_1$.

Nous pouvons remarquer qu'un contact en avant du genou (angle aigu avec l'horizontale), va dans le sens d'une perte de raideur de la jambe au cours de l'appui, puisqu'il provoque une augmentation de la flexion du genou et de la cheville de la jambe d'appui ($r = -0.66^*$ avec flex $\alpha 2$, $r = -0.63^*$ avec flex $\alpha 3$) (figure 3-40). Par ailleurs, une telle prise de contact a pour effet d'élever les impulsions horizontales produites au cours de l'appui, en particulier le freinage ($r = 0.74^{***}$ avec ImpRx⁻ (figure 3-41). L'impulsion de propulsion est augmentée sans atteindre un seuil significatif ($r = -0.59$) mais le pic de propulsion s'est élevé de façon significative ($r = -0.73^{***}$).

Dans notre étude, un angle $\alpha 5$ réduit est lié à un poids du corps élevé, une grande fréquence de foulée et une grande vitesse moyenne, comme l'indiquent les corrélations du tableau 3-17 ($r = -0.66^*$ avec P, $r = -0.60^*$ avec f et $r = -0.67^*$ avec VmA). Ces caractéristiques peuvent s'observer chez les sprinters les plus rapides. Nous avons en effet déjà relevé que les coureurs du groupe « Rapides » étaient les plus lourds et qu'ils avaient tendance à prendre contact plus en avant du centre de masse que les « Autres ». Ils présentent également la particularité de prendre contact au sol en avant du genou, avec un angle $\alpha 5$ en moyenne inférieur aux « Autres » ($82.67^\circ \pm 3.06$ pour les « Rapides » et $86.63^\circ \pm 5.37$ pour les « Autres »).

Si le fait de prendre contact avec le sol, le pied en avant du genou n'a pas un effet très significatif sur la distance horizontale de contact par rapport au centre de masse ($r = -0.57$ entre $\alpha 5t_1$ et dxt₁), il produit toutefois une augmentation significative de la distance de contact par rapport à la hanche ($r = -0.65^*$ entre $\alpha 5t_1$ et dhxt₁) (figure 3-42).

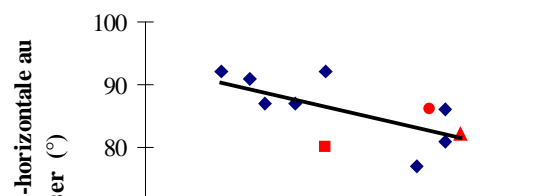
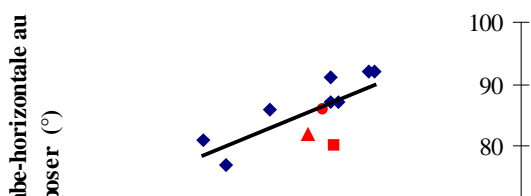


Figure 0-17 : Corrélation entre $\alpha 5t_1$ et ImpRx^- .

Figure 0-18 : Corrélation entre $\alpha 5t_1$ et dhxt_1 .

Quand le pied se pose au sol, l'articulation de la hanche se trouve à quelques centimètres en arrière du centre de masse. La distance de contact par rapport à la hanche (dhxt_1) est en moyenne de 0.39m (± 0.06) pour le groupe des « Hommes », avec des valeurs de 0.42m (± 0.05) pour les « Rapides » et 0.38m (± 0.06) pour les « Autres ». Comme les distances horizontales de contact par rapport à la hanche (dhxt_1) et par rapport au centre de masse (dxt_1) sont intimement liées ($r = 0.94^{***}$ entre ces deux variables), l'élévation de dhxt_1 a les mêmes effets qu'une augmentation de dxt_1 , c'est à dire que l'on retrouve entre $\alpha 5t_1$ et dhxt_1 des relations significatives avec les mêmes variables qu'avec dxt_1 . Ces variables sont présentées dans le tableau 3-18 : il s'agit du poids, de l'impulsion verticale, des impulsions horizontales de propulsion et de freinage, du déplacement du centre de masse à l'appui et de la flexion de la cheville. La distance de contact par rapport à la hanche a cependant un effet plus significatif sur le pic de propulsion ($r = 0.67^*$ avec Rx^+) et la flexion du genou ($r = 0.61^*$ avec $\text{flex}\alpha 2$) que la distance de contact par rapport au centre de masse.

		dhxt_1	
$\alpha 5t_1$	$r = -0.65^*$	ImpRx^+	$r = 0.76^{***}$
dxt_1	$r = 0.94^{***}$	ImpRx^-	$r = -0.69^{**}$
P	$r = 0.79^{***}$	d_{GxA}	$r = 0.64^*$
ImpRz	$r = 0.74^{***}$	$\text{flex}\alpha 3$	$r = 0.71^{**}$
Rx^+	$r = 0.67^*$	$\text{flex}\alpha 2$	$r = 0.61^*$

Tableau 0-9 : Corrélations avec dhxt_1 .

La flexion du genou ($\text{flex}\alpha 2$) et de la cheville ($\text{flex}\alpha 3$) au cours de la première partie de l'appui au sol, est nécessaire pour amortir l'impact, mais elle perturbe la raideur de la jambe d'appui. Le tableau 3-19 regroupe les informations relevées sur $\text{flex}\alpha 2$ et $\text{flex}\alpha 3$ et montre les relations qui lient ces deux variables cinématiques avec certains paramètres dynamiques.

	$\text{flex}\alpha 2$	dhxt_1	dxt_1	$\alpha 5t_1$	d_{GxA}	$\alpha 3t_1$	P	Rx^-	ImpRz	ImpRx^+	ImpRx^-	$t_{x-,x+}$
$\text{flex}\alpha 2$		0.61 *		-0.66 *	0.72 **	0.66 *		-0.60 *				
$\text{flex}\alpha 3$	0.81 ***	0.71 **	0.74 ***	-0.63 *	0.82 ***		0.69 **		0.73 ***	0.63 *	-0.66 *	0.63 *

Tableau 0-10 : Corrélations avec $\text{flex}\alpha 2$ et $\text{flex}\alpha 3$ pendant l'appui.

Tout d'abord, la flexion du genou est liée à celle de la cheville ($r = 0.81^{***}$). Quand la flexion est élevée au niveau d'une articulation, elle l'est également au niveau de l'autre. La flexion de ces deux articulations s'accroît avec l'augmentation de la distance de contact par rapport à la hanche et avec une pose du pied se faisant plus en avant du genou. Plus le centre de masse se déplace sur une grande distance à l'appui, ce qui est le cas quand la durée de l'appui augmente, plus ces deux articulations de la jambe se fléchissent.

Au plan des variables dynamiques, la force de freinage normalisée augmente de façon significative avec la flexion du genou ($r = -0.60^*$ entre $\text{flex}\alpha 2$ et Rx^-), et la flexion de la cheville est en relation avec l'ensemble des impulsions produites à l'appui ($r = 0.73^{***}$ avec ImpRz , $r = 0.63^*$ avec ImpRx^+ , $r = -0.66^*$ avec ImpRx^-). Par ailleurs, l'accroissement de la flexion de la cheville se traduit par une plus grande durée de freinage puisque la transition entre le freinage et la propulsion se produit plus tard ($r = 0.63^*$ avec $t_{x-,x+}$).

Toutes ces observations viennent confirmer la nécessité de limiter la flexion du genou et de la cheville à l'appui. Et pour cela, le sprinter a tout intérêt à limiter la distance de contact en avant du centre de masse et de l'articulation de la hanche.

En résumé, plus le coureur prend contact avec la jambe formant un angle aigu par rapport au sol, plus il pose le pied loin en avant de la verticale de la hanche. Même si certains sprinters, parmi les plus rapides de notre étude

le font, ce comportement est à éviter et à corriger, car il n'est pas favorable à la brièveté de l'appui, puisqu'il provoque une augmentation de l'amplitude du centre de masse à l'appui et il nuit au maintien de la raideur de la jambe au cours de l'appui, puisque la flexion du genou et de la cheville augmentent. Par ailleurs, cette attitude produit une élévation des impulsions exercées au cours de l'appui et rend ainsi l'effort peu économique pour le sprinter.

Dans la description du comportement du sprinter au moment du contact au sol, l'écart entre les deux cuisses ($\alpha 4$) est une variable non négligeable à prendre en compte. L'étude des corrélations nous indique que l'angle $\alpha 4$ est lié de façon significative à $t_{R_{x+}}$ ($r = 0.69^{**}$) et à $t_{x-,x+}$ ($r = 0.60^*$). Ainsi, plus l'angle entre les cuisses est grand lors du contact, plus le pic de propulsion produit par la jambe d'appui est tardif et plus la transition freinage-propulsion se fait également tardivement. Nous avons pu relever précédemment que ces deux variables dynamiques étaient aussi liées à la durée de l'appui au sol ; nous pouvons en conclure que la durée du contact avec le sol tend à être plus longue quand l'angle $\alpha 4$ est augmenté. L'observation de cet angle peut donc donner des informations sur la qualité du retour de la jambe libre, ainsi que sur la brièveté de l'appui au sol.

o

Discussion

Dans le chapitre sur les paramètres dynamiques, nous avons relevé qu'une impulsion nette (ImpRx) réduite (donc vitesse presque stabilisée), s'accompagne de l'apparition précoce du pic de force verticale ($t_{R_{zmax}}$) et tardive du pic de freinage horizontal (t_{R_x}). Il apparaît que deux valeurs angulaires sont liées à ces indicateurs d'atteinte de vitesse stabilisée : il s'agit de l'angle entre la cuisse et la verticale au poser ($\alpha 1t_1$) et de l'angle du genou au poser ($\alpha 2t_1$). Les différentes relations regroupées dans le tableau suivant indiquent qu'en même temps que le coureur atteint une vitesse de course qui se stabilise, la cuisse de la jambe d'appui se rapproche de la verticale au poser ($\alpha 1t_1$ réduit), le genou se tend au moment du contact ($\alpha 2t_1$ grand) et la hauteur de son centre de masse au poser (dzt_1) s'élève. La mesure de ces deux angles lors du contact semble judicieuse pour apprécier l'atteinte par le sprinter de sa vitesse maximale et son attitude de course, en terme de hauteur du centre de masse au poser (tableau 3-20).

	ImpRx	$t_{R_{zmax}}$	$t_{R_x.n}$
$\alpha 1t_1$	$r = 0.63^*$	$r = 0.68^*$	$r = -0.67^*$
$\alpha 2t_1$	$r = -0.60^*$ avec ImpRxn	$r = -0.61^*$	$r = 0.73^{**}$
dzt_1	$r = -0.66^*$		

Tableau 0-1: Corrélations avec les indicateurs de vitesse stabilisée.

Notre étude montre qu'une durée d'appui courte est liée de façon significative à deux comportements caractéristiques. D'une part, une moindre extension de la jambe d'appui au niveau des articulations du genou et de la hanche, d'autre part, une amplitude réduite du trajet horizontal du centre de masse au cours de l'appui. Nos coureurs les plus rapides présentent ces caractéristiques.

Certains résultats cinématiques issus de la bibliographie sont présentés dans les tableaux 3-21 et 3-22. Les valeurs de l'angle du genou au quitter, que nous avons mesurées dans notre étude sont très proches de celles que Mann et Herman (1985) ont relevées. Elles confirment que les sprinters présentent au quitter, une extension de l'articulation du genou très éloignée de son maximum.

En sprint, il est reconnu que l'augmentation de la distance de contact par rapport au centre de masse (dxt_1) est à l'origine d'une élévation de l'impulsion de freinage produite au cours de l'appui et donc d'une baisse de la vitesse horizontale (Kunz et Kaufmann, 1981 ; Mann et Herman, 1985 ; Mero et coll., 1992).

Dans notre étude, la valeur moyenne de 0.33m (± 0.05) pour la distance de contact par rapport au centre de masse, est en accord avec la plupart des résultats rapportés par la littérature. Les sprinters les plus rapides dans les travaux de Mero et coll. (1982) atteignent des distances de contact inférieures en moyenne à 0.30m, ainsi que le meilleur sprinter étudié par Mann et Herman (1985) ; de même que les athlètes féminines de haut niveau étudiées par Cöh et coll. (1999) (tableau 3-22). Certains auteurs (Mero et coll., 1982 ; Mann et Herman, 1985) mentionnent que les meilleurs sprinters se distinguent par une distance de contact inférieure aux autres, ce que nous n'avons pas mis en évidence dans notre étude. Nos sprinters les plus rapides se distinguent plutôt par une distance plus courte au décollage.

Par rapport aux sprinters de Mero et coll. (1982), nos coureurs prennent contact au sol avec le tibia formant un angle plus aigu avec l'horizontale (tableau 3-21), ce qui les amènent à poser leur pied d'appui en avant du genou. Cette action est accentuée dans le groupe des « Rapides » qui augmentent ainsi leur distance horizontale par rapport à la hanche.

Ce comportement a pour effet d'augmenter l'impulsion de freinage horizontal et n'est donc pas recommandé pour le sprinter. Nous avons relevé dans notre étude sur l'appui à 40m, que l'augmentation de la distance horizontale par rapport à la hanche produisait à peu près les mêmes effets sur les variables dynamiques que la distance relative au centre de masse.

	Réga C. et Natta F., 2001.	Mero A. et coll.,1982.	Mann R. et Herman J.,1985	Tjupa V.V. et coll., 1989.
Sujets nombre	11 sprinters de haut niveau.	23 sprinters répartis en 3 groupes. 1 ^{er} 2 ^e 3 ^e	3 sprinters de haut niveau : 1 ^{er} , 2 ^e et 8 ^e sur 200m aux JO de 1984.	20 sprinters de haut niveau. Les indices angulaires concernent 4 sprinters.
taille (m)	1.82 ± 0.06	1.80 / 1.84 / 1.83		
poids (kg)	77.21 ± 9.67	76.3 / 77.0 / 75.4		
performance au 100m (s)	10.61 ± 0.36	10.7 / 11.1 / 11.5		
Epreuve	5 fois 50m à vitesse maximale. Filmés après 40m. La course la plus rapide est retenue.	2 fois 50m à vitesse maximale. Filmés après 35m. La course la plus rapide est retenue.	200m des Jeux Olympiques de 1984, au 125m.	Un 100m et un 200m à vitesse maximale, enregistrée en début et fin de course.
Vitesse d'enregistrement	50 Hz	100 Hz	100 Hz	200 Hz
Plate-forme de forces ?	oui	non	non	oui
Variables cinématiques générales			1 ^{er} 2 ^e 8 ^e	200m en phase de vitesse max
vitesse maximale (m/s)	10.35 ± 0.35	9.86 / 9.60 / 9.24	10.21 / 9.93 / 9.29	8.80 ± 0.73
amplitude des foulées (m)	2.29 ± 0.08	2.12 / 2.12 / 2.14	2.38 / 2.38 / 2.31	2.14 ± 0.15
fréquence des foulées (f/s)	4.52 ± 0.21	4.65 / 4.53 / 4.32	4.30 / 4.17 / 4.01	4.10 ± 0.35
durée de l'appui (ms)	98 ± 9	104 / 111 / 118	100 / 110 / 130	114 ± 10
indices angulaires (°)				
tibia-horizontale au contact	85.55 ± 5.05	91 / 91 / 89		142.7 ± 2.6
genou d'appui au contact	155.38 ± 6.99		157 / 156 / 158	
genou d'appui au décollage	154.55 ± 7.20		38 / 43 / 37	
genou minimum au retour	40.45 ± 3.42			
amplitude du griffé	0.36 ± 0.08			0.27 ± 0.02
distances et vitesses (m/s)				
distance au contact /CM (m)	0.33 ± 0.05	0.23 / 0.35 / 0.30	0.22 / 0.28 / 0.33	0.34 ± 0.06
distance au décollage/CM(m)	0.51 ± 0.07	0.67 / 0.59 / 0.68		
élévation pic à pic de CM	0.07 ± 0.02 m	4.7 / 5.0 / 6.2 cm		3.6 ± 0.6 cm
vitesse du pied au contact	-7.91 ± 10.87		-7.93/ -5.84/ -6.47	

CM = centre de masse

Tableau 0-2: Résultats des études sur les variables cinématiques en sprint ; sujets masculins.

Nous avons constaté dans nos travaux que d'une part, les sujets les plus lourds avaient tendance à poser leur appui plus en avant du centre de masse, et que d'autre part, l'augmentation de la distance de contact avait un effet non seulement sur les impulsions exercées selon l'axe horizontale mais également selon l'axe vertical. Ces résultats renvoient à ceux de Chang et coll. (2000) qui montrent qu'une augmentation du poids du corps agit sur les forces et impulsions produites dans les deux directions de l'espace. Et cela, afin de permettre au coureur de maintenir constant l'orientation du vecteur force résultant, en maintenant l'alignement avec l'axe de la jambe. Nos propres résultats confirment les hypothèses de Chang et coll. au sujet du poids du corps et nous amènent à les formuler également pour la distance de contact. En effet, comme avec la distance de contact, les impulsions verticale et horizontales augmentent toutes les deux, l'orientation du vecteur force devrait tendre à rester constante.

Pour illustrer nos propos, nous avons tracé le vecteur force résultant à l'instant du pic de freinage horizontal (t_{R_x}), pour deux sprinters présentant une distance de contact différente : 0.28m pour LA et 0.37m pour GU (figure 3-43). Les forces sont normalisées afin de permettre la comparaison entre les deux sprinters. Le schéma montre bien que malgré une distance différente au poser, l'orientation des deux vecteurs au moment du pic de freinage, est sensiblement identique. Celui qui pose plus loin en avant du centre de masse (GU) a maintenu la même orientation de la force résultante en augmentant à la fois sa force horizontale de freinage et sa force verticale. Cet exemple renforce également l'idée que prendre contact trop loin en avant du centre de masse n'est pas économique en terme de production de force et d'impulsion et n'est donc pas souhaitable.

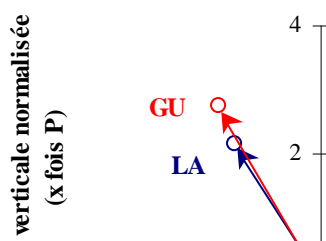


Figure 0-1 : Orientation du vecteur force résultant à tRx̄.

Dans notre étude, plus la jambe se pose à une grande distance en avant du centre de masse, plus elle se fléchit au niveau de la cheville. Une grande distance de contact par rapport à la hanche, augmente en plus la flexion du genou au cours de l'appui. Ce comportement perturbe donc la rigidité ou raideur de la jambe d'appui. La plupart des auteurs insiste sur la nécessité d'une raideur de la jambe d'appui en course. Certains mettent en avant l'économie d'énergie et l'efficacité mécanique que produit le maintien de la rectitude de la jambe, en rapprochant chaque articulation de la ligne d'action du vecteur force (Chang et coll. ; 2000). D'autres s'appuient sur le meilleur renvoi musculaire favorisé par une jambe qui se déforme peu au cours de l'appui (Cavagna et coll., 1983 ; Ito et coll., 1983 ; Thys, 1987).

La contribution de l'accumulation d'énergie élastique pour le travail positif a été démontrée et les qualités d'élasticité jouent un rôle important dans le maintien d'une grande efficacité mécanique en course.

Dans l'étude de Mero et Komi (1986) les sprinters les plus rapides présentent une plus grande élasticité due principalement à une baisse inférieure du centre de masse au cours de la phase excentrique de l'appui, quand des forces très élevées compriment la jambe d'appui. Ils présentent une plus grande raideur de la jambe et cette capacité leur permettrait de rebondir plus rapidement au sol.

Pour exploiter les capacités d'élasticité musculo-tendineuses du sprinter, il semble essentiel de maintenir une rigidité optimale de la jambe au poser et au cours de l'appui.

Cependant, les coureurs de notre étude se sont trouvés face à la difficulté de gérer à la fois une distance horizontale de contact réduite et une extension appropriée de la jambe au poser. En effet, nous avons noté que plus le genou est tendu au poser et plus la cuisse est proche de la verticale, mais plus le contact se fait en avant du genou, avec les conséquences que l'on sait sur le freinage et les flexions articulaires au cours de l'appui. Ces résultats nous amènent à penser que le maintien de la raideur de la jambe au cours de l'appui nécessite une prise de contact proche de la verticale du centre de masse, le pied à la verticale du genou, sans chercher un angle très ouvert au niveau du genou ; la valeur optimale pour chaque sprinter restant à déterminer. Dans l'étude de Tjupa et coll. (1989), les auteurs mesurent une valeur moyenne de 142.7° (± 2.6) au début d'une course de 200m et relèvent, sous l'effet de la fatigue une valeur augmentée à 155° (± 3.6) en fin de parcours.

	Réga C. et Natta F., 2001.	Levtchenko A., Papanov V., 1991.	Cöh M. et coll., 1999.									
Sujets nombre	6 sprinteuses de niveau national.	2sprinteuses de haut niveau.	4 sprinteuses de haut niveau.									
taille (m)	1.70 ± 0.04	Sujet 1 : 1.68	1.66 ± 0.04									
poids (kg)	59.57 ± 3.49	59	57.2 ± 2.5									
performance au 100m (s)	11.70 ± 0.17	11.10	11.53 ± 0.22									
Epreuve	5 fois 50m à vitesse maxi. Filmés après 40m. La course la plus rapide est retenue.	200m des Championnats d'Europe, après 140 de course.	2 fois 45m à vitesse maximale, la course la plus rapide est retenue.									
Vitesse d'enregistrement	50 Hz	32 Hz	50 Hz (2 caméras)									
Plate-forme de forces ?	oui	non	oui									
Variables cinématiques générales		<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="text-align: center;">sujet 1</td> <td style="text-align: center;">sujet 2</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">↓</td> <td style="text-align: center;">↓</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">2.19 à 2.22 / 2.12 à 2.14</td> <td></td> </tr> </table>	sujet 1	sujet 2		↓	↓		2.19 à 2.22 / 2.12 à 2.14			
sujet 1	sujet 2											
↓	↓											
2.19 à 2.22 / 2.12 à 2.14												
vitesse maximale (m/s)	9.07 ± 0.49		8.87 ± 0.14									
amplitude des foulées (m)	2.04 ± 0.08		1.98 ± 0.05									
fréquence des foulées (f/s)	4.45 ± 0.18	4.6	4.33 ± 0.20									
durée de l'appui (ms)	97 ± 9	≈ 93	101 ± 5									
indices angulaires (°)												
tibia/horizontale au contact	88.50 ± 4.23	83	80									
écart 2 cuisses au contact	25.50 ± 5.61	26	25									
genou d'appui au contact	147.83 ± 2.48	168	162									
genou d'appui minimum	134.33 ± 6.19	136	135									
genou d'appui au décollage	150.00 ± 7.40	166	152									
			148 ± 0.21									

écart maximum des 2 cuisses	96.17 ± 3.13	99	100	
<i>distances et vitesses (m/s)</i>				
distance au contact / CM (m)	0.32 ± 0.09			0.24 ± 0.03
distance au décollage/ CM (m)	0.45 ± 0.07			0.45 ± 0.03
élévation pic à pic de CM	0.7 ± 0.01 m			5.8 cm (de 4.6 à 8.5)

CM = centre de masse

Tableau 0-3 : Résultats des études sur les variables cinématiques en sprint ; sujets féminins.

Un grand nombre de nos résultats concernant la jambe d'appui porte sur la flexion au niveau de la cheville. Les muscles de cette articulation jouent un rôle important dans le freinage du mouvement et le stockage d'énergie élastique, du fait de la longueur du tendon d'Achille et de sa capacité à restituer l'énergie élastique accumulée (Wood, 1987). La flexion de la cheville s'accroît quand la distance de contact augmente. Une variation de ces deux paramètres cinématiques a un effet sur la production d'impulsions verticale et horizontales. Les muscles agissant sur l'articulation de la cheville pourraient donc être impliqués dans la production de force dans les deux directions de l'espace et l'orientation du vecteur force résultant.

La flexion de la cheville est également liée à la transition entre le freinage et la propulsion horizontale. En augmentant la durée de la phase de freinage de l'appui, la flexion de la cheville joue indirectement un rôle dans l'allongement de la durée de l'appui.

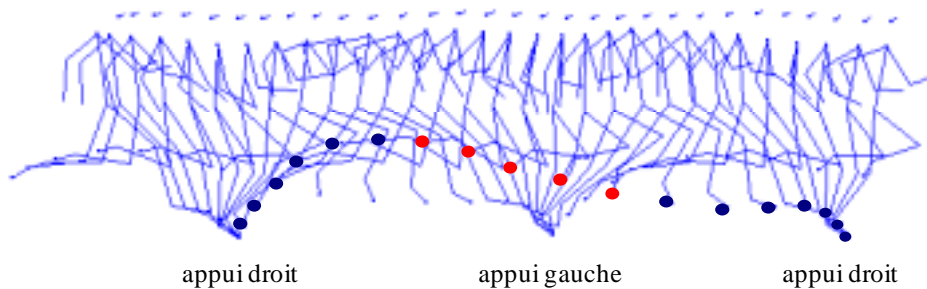
La brièveté de l'appui au sol est grandement tributaire d'une distance de contact réduite et du maintien de l'angle de la cheville dans la première partie de l'appui.

• Le retour de la jambe

○

Résultats

Une fois qu'elle a quitté le sol, la jambe effectue un cycle complet, soit deux foulées de course, avant de se poser à nouveau. La figure 3-44 montre le trajet parcouru dans l'espace par le pied droit, entre le quitter et le poser suivant.



On peut distinguer les trois phases qui caractérisent le retour de la jambe :

- le premier envol qui suit la phase d'appui,
- le passage du pied de l'arrière vers l'avant quand la jambe apposée se trouve au sol (cette phase est appelée « swing » par les auteurs)
- et le deuxième envol qui précède le contact au sol.

Dans le langage athlétique français, il est courant d'utiliser les termes de « cycle arrière » et de « cycle avant », pour qualifier le retour de la jambe et le trajet du pied en arrière puis en avant de l'axe du corps.

Au cours du premier envol, la jambe qui vient de quitter le sol, passe par une phase d'extension plus importante au niveau de la hanche, du genou et de la cheville, avant que le mouvement ne s'inverse. Le coureur atteint alors une ouverture maximale entre les deux cuisses (α_{max}), dont la valeur moyenne pour les hommes est de $104.64^\circ (\pm 6.02)$ (tableau 3-23).

Puis le genou qui avait légèrement reculé par rapport à la verticale de la hanche, revient vers l'avant et la hanche se fléchit en même temps que le genou, mais plus lentement. Le genou atteint un angle minimum (α_{min}) de $40.45^\circ (\pm 3.42)$ de moyenne, au moment du poser de la jambe opposée, pour la plupart de nos sprinters. Dans notre étude, le groupe « Rapides » présente en moyenne, des valeurs plus petites que celles des « Autres » ($37.67^\circ \pm 1.15$ pour les premiers et $40.45^\circ \pm 3.42$ pour les seconds) (figure x), tout en restant supérieure à celles des « Femmes » ($32.00^\circ \pm 8.49$).

Angle minimum du genou pendant l'envol

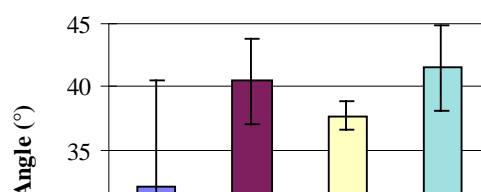
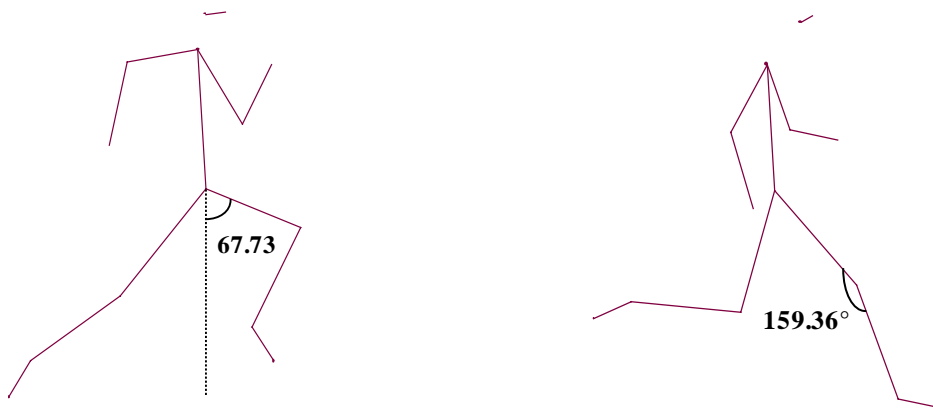


Figure 0-2 : Valeurs de $\alpha 2_{min}'$.

Pendant l'appui de la jambe opposée, le genou commence son extension, alors que la flexion de la hanche continue pour faire monter le genou vers l'avant. L'amplitude de la flexion de la hanche est exprimée par l'angle compris entre la cuisse et la verticale ($\alpha 1_{max}'$). Sa valeur maximale est en moyenne de $67.73^\circ (\pm 6.80)$ (figure 3-46) et elle est atteinte au quitter du pied opposé, ou très légèrement après pour certains sprinters. La flexion de la hanche se stabilise un court instant avant l'extension. Ainsi, le genou poursuit son extension à partir d'une cuisse presque fixée.

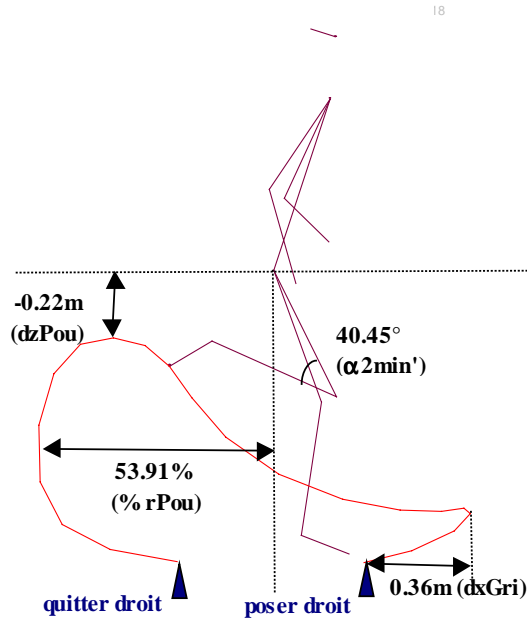
Au cours de la troisième phase du retour de la jambe, se produit l'action de « griffé » avant le contact au sol. Cette action se traduit par un retour de la jambe vers le bas et l'arrière grâce à une extension de la hanche. Dans un premier temps, la hanche et le genou s'étendent en même temps. Ensuite, alors que l'extension de la hanche se poursuit jusqu'au poser, le genou se fléchit pour préparer l'appui. L'angle maximum du genou avant sa flexion ($\alpha 2_{max}'$) est en moyenne de $159.36^\circ (\pm 7.96)$ (figure 3-47).



	■ emmes		Hommes		Rapides		Autres	
	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET
angle maximum entre les cuisses (°) ($\alpha 4_{max}$)	96.17	3.13	104.64	6.02	100.67	10.12	106.13	3.64
angle minimum du genou (°) ($\alpha 2_{min}'$)	32.00	8.49	40.45	3.42	37.67	1.15	41.50	3.42
angle maximal du genou avant l'appui (°) ($\alpha 2_{max}'$)	155.33	5.96	159.36	7.98	156.33	7.09	160.50	8.43
angle cuisse-verticale maximum (°) ($\alpha 1_{max}'$)	59.50	4.46	67.73	6.80	69.67	8.39	67.00	6.61
distance horizontale pied-hanche au poser (m) ($dhxt_t$)	0.37	0.08	0.30	0.07	0.30	0.11	0.30	0.05
distance horizontale pied-hanche au quitter (m) ($dhxt_{t_0}$)	0.36	0.08	0.45	0.08	0.34	0.03	0.49	0.05
distance verticale minimale pied- hanche (m) ($dzPou$)	-0.12	0.11	-0.22	0.06	-0.24	0.04	-0.21	0.07
amplitude horizontale de la poulaine (m) ($dxPou$)	1.29	0.05	1.43	0.07	1.38	0.02	1.45	0.07
amplitude horizontale du cycle arrière (en % de $dxPou$) (% $rPou$)	56.67	3.20	53.91	2.95	51.33	3.06	54.88	2.42

amplitude du griffé (m) (dxGri)	0.18	0.08	0.36	0.08	0.37	0.09	0.35	0.09
indice de griffé (%) (indGri)	32.83	14.85	53.91	10.57	55.33	14.50	53.38	9.91
vitesse maximum du pied-hanche (m/s) (VmaxPou)	9.56	0.71	8.39	0.44	8.18	0.10	8.47	0.50
vitesse du pied-hanche au poser (m/s) (VPout _i)	-6.63	1.76	-7.91	0.87	-7.82	0.35	-7.94	1.01

Tableau 0-1 : Valeurs des paramètres du retour de la jambe



Le tracé de la poulaine du pied représente le trajet du pied dans l'espace autour de l'articulation de la hanche fixée. Cette représentation permet de mieux visualiser l'action de « griffé » qui précède l'appui et de l'étudier. La poulaine du pied droit avec les valeurs moyennes des « Hommes », est présentée dans la figure 3-48, entre deux appuis droits, avec la position du sprinter au moment du poser gauche.

Au cours du premier envol, le pied s'élève en l'arrière de la hanche, pour atteindre une distance moyenne (dzPou) de $-0.22\text{m} (\pm 0.06)$ sous l'horizontale de la hanche.

L'amplitude horizontale de la poulaine (dxPou) correspond à l'addition des distances horizontales maximales en arrière et en avant de la verticale de la hanche. Pour la population masculine, dxPou mesure en moyenne $1.43\text{m} (\pm 0.07)$ avec une valeur moyenne inférieure chez les « Rapides » ($1.38\text{m} \pm 0.02$) figure 3-49.

Le pourcentage de cycle arrière (%rPou) représente la part du trajet parcouru par le pied en arrière de la verticale de la hanche et cette variable permet d'apprécier la symétrie du trajet du pied de part et d'autre de la verticale de la hanche. %rPou s'élève en moyenne à $53.91\% (\pm 2.95)$ et la valeur moyenne inférieure chez les « Rapides » ($51.33\% \pm 3.06$) indique que ces sprinters tendent à avoir un retour de jambe plus équilibré de part et d'autre de la hanche (figure 3-50).

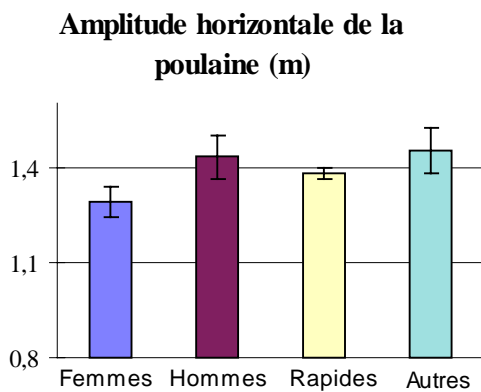


Figure 0-2 : Valeurs de dxPou.

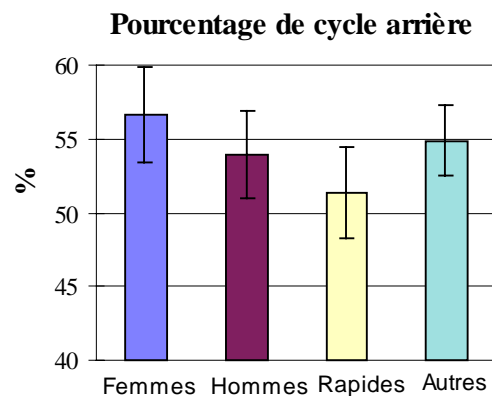


Figure 0-3 : Valeurs de %rPou.

L'amplitude du griffé (dxGri) correspond à la distance horizontale parcourue par le pied lors de son retour vers l'arrière avant le contact. Sa valeur est en moyenne de $0.36\text{m} (\pm 0.08)$ pour les « Hommes », et elle représente le

double de celle des « Femmes » ($0.18\text{m} \pm 0.08$). dxGri permet le calcul de l'indice de griffé (indGri) qui met en relation l'amplitude du griffé et la distance maximale parcourue par le pied en avant de la hanche, avant le contact au sol. L'indice de griffé est en moyenne de 53.91% (± 10.37) pour les sujets masculins. Il indique que chez les sprinters, le déplacement de la jambe vers l'arrière avant le poser représente en moyenne environ la moitié du trajet en avant de la jambe.

La figure 3-51 présente la poulaine d'un sujet « Rapide » et d'une « Femme », ainsi que la posture du sujet au moment où le pied droit atteint le sommet de sa trajectoire en arrière de la hanche. On voit chez le sujet féminin, que la montée du pied en arrière, à une hauteur proche de l'horizontale de la hanche, s'accompagne d'une inclinaison vers l'avant du haut du corps. Chez cette sprinteuse, l'angle minimum du genou ($\alpha_{2\text{min}}$) est de 28° et la montée du genou droit vers l'avant ($\alpha_{1\text{max}}$) ne dépasse pas 59° . Quand son pied gauche se posera au sol, l'angle entre les deux cuisses sera de 19° . Le sujet masculin présente une amplitude de griffé (dxGri) parmi les plus élevées des sprinters. Ses valeurs de $\alpha_{2\text{min}}$ et $\alpha_{1\text{max}}$ sont de 37° et de 74° . Au poser du pied gauche, la cuisse droite aura dépassé la cuisse de la jambe d'appui.

Ces deux exemples montrent l'intérêt d'une telle représentation, pour visualiser et caractériser certains comportements individuels en sprint.

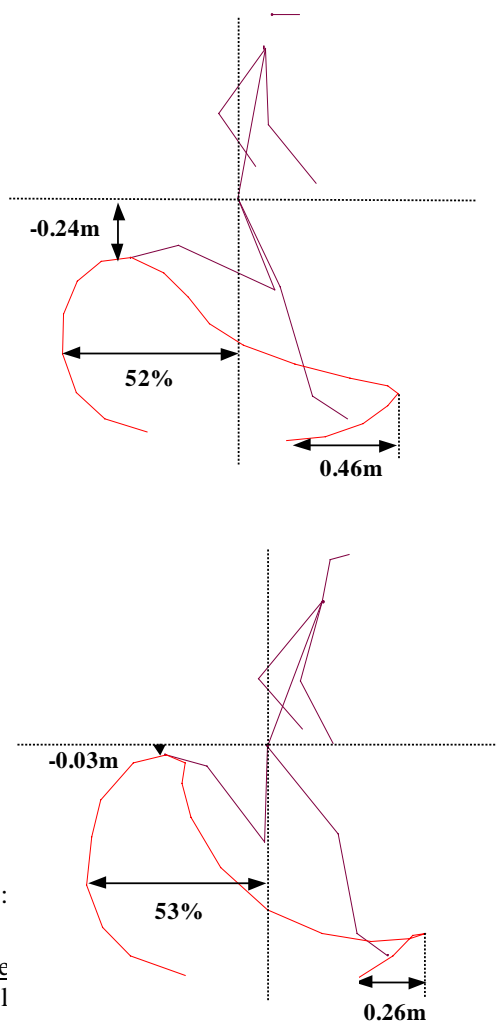


Figure 0-4 :

« Femme » (en bas).

La vitesse horizontale du pied
vitesse de déplacement vers l'arrière
 ± 0.52 pour la vitesse maximale

vitesse maximale d'environ le double de la vitesse pour les « Hommes », 18.62m/s (vitesse du centre de masse à l'appui).

Juste avant le poser, le pied est animé d'une vitesse relative par rapport à la hanche, qui est différente de sa vitesse absolue par rapport à la piste. Nous avons relevé au cours de son trajet de retour, la valeur maximale de la vitesse horizontale du pied par rapport à la hanche (V_{maxPou}), et sa valeur au moment du poser (V_{Pout}).

Dès que le pied a quitté le sol, sa vitesse relative augmente. La valeur est d'abord négative (chiffre 1 sur la figure 3-52), car le déplacement du pied se fait vers l'arrière par rapport à la hanche. Puis la vitesse devient positive (2) quand le déplacement se fait vers l'avant. Elle se stabilise ensuite (3), et peut même diminuer chez certains sprinters, à l'approche de la flexion maximale du genou ($\alpha_{2\text{min}}$). Dans la deuxième phase du retour de la jambe, quand le pied gauche est en appui au sol, la vitesse relative du pied droit s'accélère (4) et sa valeur maximale (V_{maxPou}) est atteinte lors de la flexion maximale de hanche ($\alpha_{1\text{max}}$). V_{maxPou} est égale en moyenne, à $8.39\text{m/s} (\pm 0.44)$ pour les « Hommes » et la valeur des « Femmes » est supérieure à celle des sprinters ($9.56\text{m/s} \pm 0.71$). Puis, quand l'extension de la hanche se produit, la vitesse relative du pied vers l'avant est ralentie (5). La vitesse devient négative (6) quand le mouvement de la jambe s'inverse et qu'elle se déplace de l'avant vers

l'arrière avant le poser. La valeur de VP_{out_i} est alors de $-7.91\text{m/s} (\pm 0.87)$ en moyenne pour les « Hommes » et elle est supérieure à celle des « Femmes » ($-6.63\text{m/s} \pm 1.76$ pour ces dernières).

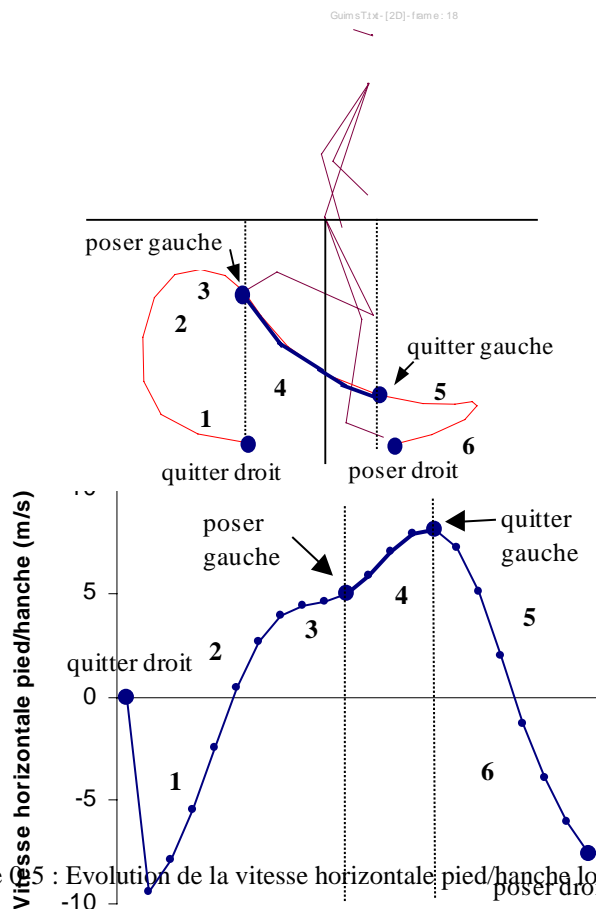


Figure 3-55 : Evolution de la vitesse horizontale pied/hanche lors du retour de la jambe.

L'étude des corrélations met en relation les différents paramètres et montre l'incidence des évènements se produisant à l'appui, sur les paramètres de la poulaine.

L'amplitude horizontale de la poulaine est liée à la durée de l'appui ($r = 0.64^*$ avec ΔtA) (tableau 3-24). Cette relation montre qu'un appui bref au sol s'accompagne d'un trajet du pied d'une amplitude plus réduite lors du retour de la jambe (figure 3-53). Ce comportement serait dû principalement à une moindre extension du genou au cours de l'appui précédent ($r = 0.72^{**}$ entre $dxPou$ et $ext\alpha 2$). Ce qui explique que les sprinters du groupe « Rapides », qui présentent à l'appui, moins d'extension du genou, aient également une amplitude horizontale de poulaine en moyenne, inférieure à celle des autres sprinters.

$DxPou$ détermine la vitesse horizontale du pied lors de son retour. Plus le retour du pied se fait sur un grand trajet, plus sa vitesse relative sera élevée ($r = 0.83^{***}$ avec V_{maxPou}) et le restera lors du poser ($r = -0.72^{**}$ avec VP_{out_i}) (figure 3-57). Rappelons que VP_{out_i} est négatif pour tenir compte du sens du mouvement du pied qui revient vers la hanche avant le poser. Les deux vitesses présentent, par ailleurs de fortes corrélations entre elles ($r = -0.80^{***}$)

	ΔtA	V_{maxPou}	VP_{out_i}	$Ext\alpha 2$
$dxPou$	$r = 0.64^*$	$r = 0.83^{***}$	$r = -0.72^{**}$	$r = 0.72^{**}$

Tableau 0-2: Corrélations avec $dxPou$.

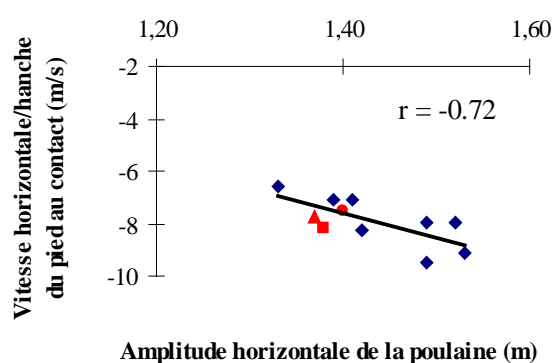
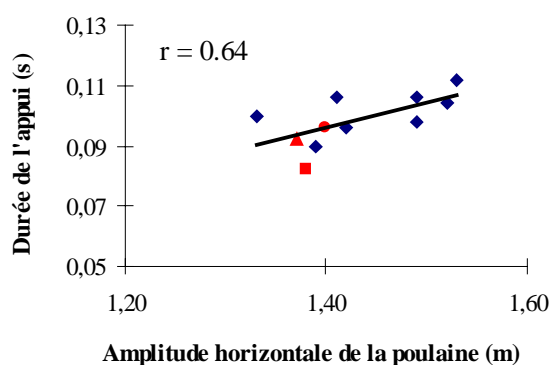


Figure 0-6 : Corrélation entre dxPou et ΔtA.

Figure 0-7 : Corrélation entre dxPou et VPout.

Dans notre étude, les « Rapides » ont tendance à ramener leur pied selon un trajet horizontal plus symétrique de part et d'autre de la verticale de la hanche. Nos résultats tendent à montrer que l'ensemble des sprinters auraient tout intérêt à adopter ce type de comportement. Les corrélations du tableau 3-25 indiquent qu'un pourcentage de cycle arrière réduit s'accompagne d'une moindre montée du pied en arrière de la hanche ($r = -0.63^*$ avec dzPou) (figure 3-55) et d'une montée plus importante du genou vers l'avant ($r = -0.65^*$ avec $\alpha 1_{\max}'$) (figure 3-56).

	$\alpha 2_{\min}'$	$\alpha 1_{\max}'$	dzPou	$\alpha 1_{t_{-0}}$	$\alpha 2_{t_{-0}}$
%rPou	$r = 0.60^*$	$r = -0.65^*$	$r = -0.63^*$	$r = 0.64^*$	$r = 0.61^*$

Tableau 0-3 : Corrélations avec %rPou.

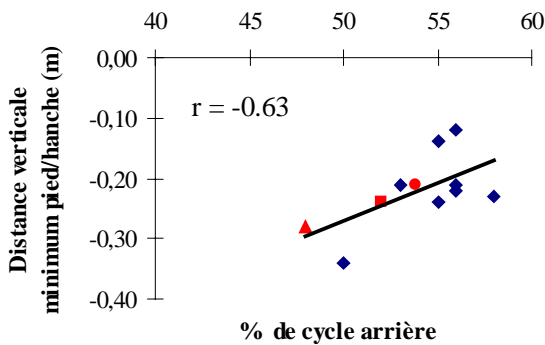


Figure 0-8 : Corrélation entre %rPou et dzPou.

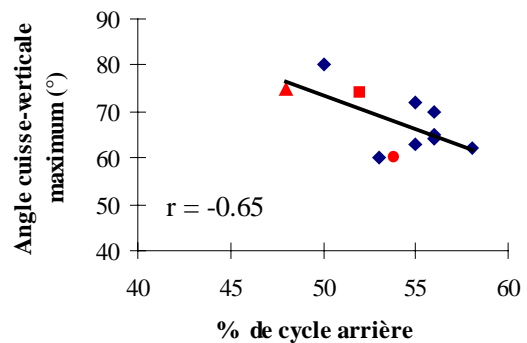


Figure 0-9 : Corrélation entre %rPou et $\alpha 1_{\max}'$

Nos résultats montrent qu'une grande distance verticale entre le pied et l'horizontale de la hanche, dans la première phase du retour de la jambe (dzPou), est en relation avec un pic de freinage réduit lors du quitter ($r = 0.66^*$ entre dzPou et $Rx'n$) (figure 3-57).

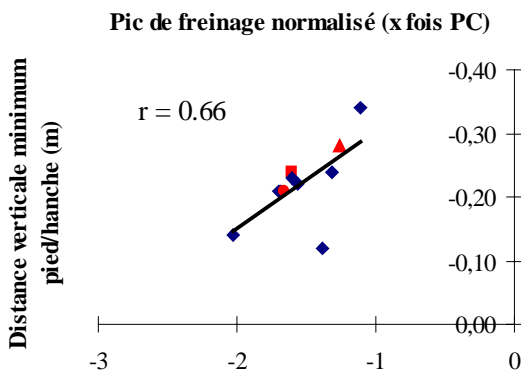


Figure 0-10 : Corrélation entre $Rx'n$ et dzPou.

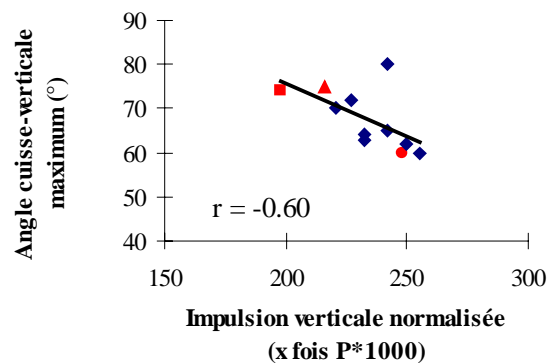


Figure 0-11 : Corrélation entre ImpRzn et $\alpha 1_{\max}'$.

D'autre part, la corrélation significative que nous avons relevée entre ImpRzn et $\alpha 1_{\max}'$ ($r = -0.60$) indique que l'impulsion verticale est limitée chez les sujets qui fléchissent le plus la hanche lors du retour de la jambe (figure 3-58). Cette observation va dans le sens des propos émis précédemment, concernant l'intérêt pour le sprinter de réduire son impulsion verticale lors de sa course à pleine vitesse.

Un genou plus fléchi lors du retour du pied est également lié à un trajet moins en arrière de la hanche ($r = 0.60$ entre %rPou et $\alpha 2_{\min}'$) (tableau 3-26). L'angle minimum du genou lors du retour de la jambe, semble être un élément particulièrement intéressant, car il est en relation d'une part, avec l'impulsion de freinage normalisée ($r = -0.65^*$ entre $\alpha 2_{\min}'$ et ImpRx'n) (figure 3-59), et d'autre part avec la transition freinage-propulsion ($r = 0.60^*$ avec $t_{x+,x-}$). Ainsi, une impulsion et une durée de freinage réduites sont liées à un genou plus fléchi lors de son retour.

	%rPou	$\alpha 1_{t_{-0}}$	ext $\alpha 2$	t_{Rx-}	ImpRx'n	$t_{x-,x+}$
--	-------	---------------------	----------------	-----------	---------	-------------

$\alpha 2\text{min}'$	$r = 0.60^*$	$r = 0.63^*$	$r = 0.61^*$	$r = 0.61^*$	$r = -0.65^*$	$r = 0.60^*$
-----------------------	--------------	--------------	--------------	--------------	---------------	--------------

Tableau 0-4 : Corrélations avec $\alpha 2\text{min}'$.

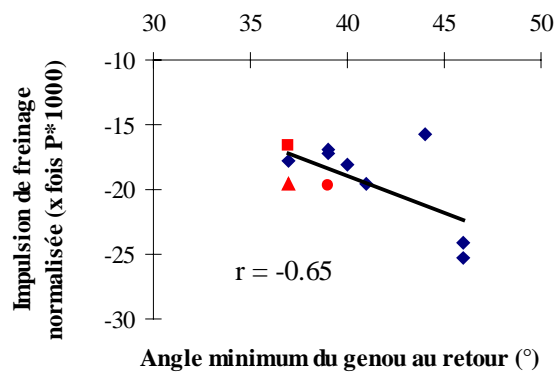


Figure 0-12 : Corrélation entre $\alpha 2\text{min}'$ et ImpRx'n.

L'amplitude du griffé (dxGri) correspond à la différence entre la distance horizontale maximale atteinte par le pied en avant de la hanche, et la distance au poser (dhxt_i). Nous avons relevé une corrélation significative entre dxGri et la distance maximale de la poulaine en avant de la hanche ($r = 0.62^*$) et entre dxGri et la distance par rapport à la hanche, au poser ($r = -0.78^{***}$ avec dhxt_i) (tableau 3-27). Nos résultats indiquent que pour augmenter l'amplitude du griffé, il est préférable de chercher à réduire la distance de contact par rapport à la verticale de la hanche, plutôt que d'augmenter la distance horizontale de la poulaine, en avant de la hanche. L'indice de griffé (indGri) qui représente dxGri en pourcentage de l'amplitude horizontale en avant de la poulaine, confirme cette hypothèse. En effet, la relation entre indGri et l'amplitude en avant de la poulaine n'est pas significative ($r = 0.34$). Par contre, la forte corrélation qui lie indGri avec dhxt_i ($r = -0.93$) montre que cet indice est très approprié pour apprécier la capacité du sprinter à prendre contact à une distance horizontale proche de la verticale de la hanche (figure 3-60). Il donne la possibilité de comparer les sprinters entre eux, et une valeur élevée de cet indice devrait être recherchée. Dans la figure 3-60, le coureur du groupe « Rapides » qui se situe à une extrémité de la courbe de tendance, et qui présente un indice de griffé relativement réduit, est le sprinter qui possède le pourcentage de cycle arrière le plus petit (48%) et la distance de contact par rapport à la hanche, la plus grande (0.42m). Cette observation illustre le fait qu'un cycle avant relativement important, n'est pas le plus efficace s'il ne permet pas au sprinter une amplitude de griffé optimale, favorisant une prise de contact à une distance proche de la verticale de la hanche.

La valeur de indGri des sprinteuses est inférieure à celle des sujets masculins (respectivement, $32.83\% \pm 14.85$ et $53.91\% \pm 10.57$) et illustre la prise de contact chez ces dernières, à une distance horizontale par rapport à la hanche, supérieure à celle des « Hommes » (respectivement, $0.37\text{m} \pm 0.08$ et $0.30\text{m} \pm 0.07$).

L'amplitude du griffé (dxGri) est liée à la vitesse maximale relative du pied lors de son retour ($r = 0.65^*$ avec VmaxP), et surtout à sa vitesse relative au poser ($r = -0.82^{***}$ avec VPout_i) ; ce qui est une évidence, car il en dépend. Ainsi, plus l'amplitude du trajet du pied vers l'arrière est importante avant le contact, plus sa vitesse relative sera élevée au poser. L'indice de griffé est également corrélé avec la vitesse relative du pied au poser ($r = -0.70^{**}$).

	dhxt _i	VmaxP	VPout _i	ImpRx'n	indGri
dxGri	$r = -0.78^{***}$	$r = 0.65^*$	$r = -0.82^{***}$	$r = 0.61^*$	0.94^{***}
indGri	$r = -0.93^{***}$		$r = -0.70^{**}$	$r = 0.64^*$	

Tableau 0-5 : Corrélations avec dxGri et indGri.

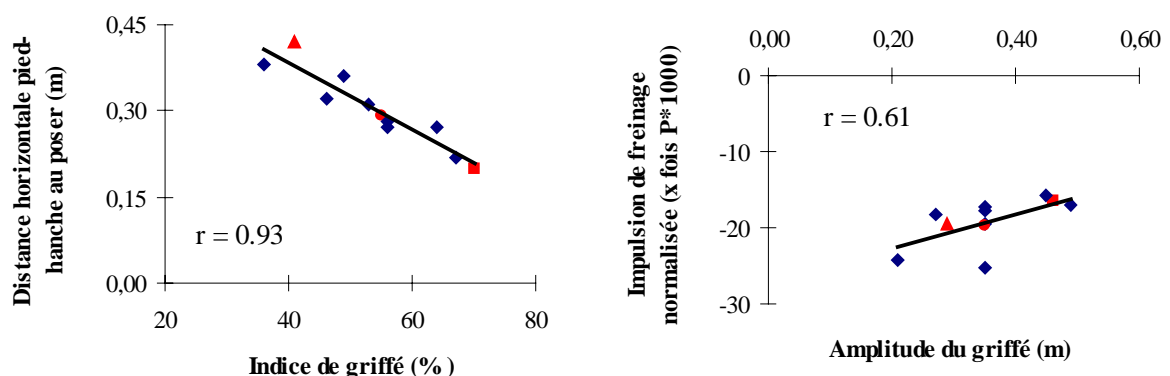


Figure 0-13 : Corrélation entre indGri et dhxt_i.

Figure 0-14 : Corrélation entre dxGri et ImpRxⁿ.

L'amplitude du griffé et l'indice de griffé sont en relation avec un paramètre dynamique enregistré au cours de l'appui précédent l'envol, il s'agit de l'impulsion de freinage normalisée ($r = 0.61^*$ entre dxGri et ImpRxⁿ et $r = 0.64$ entre indGri et ImpRxⁿ) (figure 3-61). On peut émettre l'hypothèse que les mêmes évènements dynamiques sont susceptibles de se produire au niveau du deuxième appui droit et que l'augmentation de l'amplitude du griffé a un effet sur la réduction de l'impulsion de freinage à l'appui.

Cette hypothèse peut également être émise pour la relation qui lie la vitesse relative du pied au poser et le pic de freinage normalisé ($r = -0.71^{**}$ entre VPout_i et Rxⁿ) (figure 3-62).

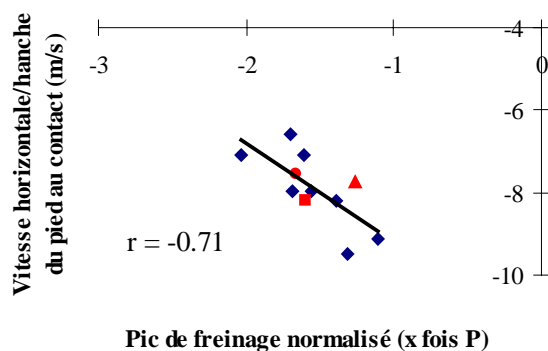


Figure 0-15 : Corrélation entre VPout_i et Rxⁿ.

Le figure 3-62 montre qu'une vitesse par rapport à la hanche (VPout_i), élevée au poser, est favorable à une réduction du freinage horizontal à l'appui. Pour une plus grande efficacité en sprint, cette vitesse devrait donc être relativement élevée. Le tableau 3-28 indique également que la vitesse relative dépend de l'amplitude maximale de la poulaine (dxPou), qui est relativement réduite chez les sprinters ayant un appui bref au sol. Les sprinters les plus rapides devraient donc, pour augmenter leur vitesse relative au poser, augmenter l'amplitude du griffé avant le contact au sol (dxGri).

	dxPou	dxGri	indGri	VmaxP	Rx ⁿ
VPout _i	$r = -0.72^{**}$	$r = -0.82^{***}$	$r = -0.70^{**}$	$r = -0.80^{***}$	$r = -0.71^{**}$

Tableau 0-6 : Corrélations avec VPout_i.

Le pourcentage de cycle arrière mesuré dans notre étude indique qu'en moyenne, la distance horizontale parcourue par le pied en arrière de la hanche est plus grande que la distance en avant. Pour les « Hommes », la valeur moyenne de la distance horizontale en arrière de la hanche est de 0.77m (± 0.05), en avant de la hanche elle est de 0.66m (± 0.05). L'amplitude du trajet en avant de la hanche détermine en partie l'efficacité de l'action de griffé, c'est à dire l'amplitude du mouvement de l'avant vers l'arrière (dxGri) et la vitesse relative acquise par le pied au poser ($r = -0.66^*$ entre la distance horizontale en avant de la hanche et VPout_i).

Ces résultats suggèrent que l'amplitude du trajet de part et d'autre de la verticale de la hanche devrait être relativement équilibrée, en portant l'attention du sprinter sur l'amplitude du trajet en avant de la hanche. Non seulement pour les raisons invoquées ci-dessus, mais aussi parce que ce paramètre est lié au pic de freinage, qui tend à diminuer quand la distance horizontale en avant de la hanche est élevée ($r = 0.62^*$ entre Rxⁿ et la distance horizontale en avant de la hanche). La valeur optimale de ce paramètre restant à déterminer individuellement. Dans notre étude les valeurs les plus petites de %rPou que nous avons mesurées, sont de 48% et de 50%.

o

Discussion

En sprint, la phase de suspension occupe environ 60% de la durée de la foulée (Cöh et coll., 1999 ; Moravec et coll., 1988). Pour augmenter sa vitesse de course et agir sur la fréquence de ses foulées, le sprinter doit réduire la durée de sa foulée en diminuant le temps de l'appui au sol, comme celui de l'envol. Le retour de la jambe doit se faire le plus rapidement possible au cours des deux foulées du cycle de la jambe.

La poulaine du pied apparaît comme une représentation riche d'enseignements pour le sprinter. Un de nos résultats indique que l'amplitude horizontale de la poulaine est corrélée de façon significative avec l'appui de course. Plus l'appui de course qui précède l'envol est bref, plus le trajet horizontal parcouru par le pied autour de la hanche, sera réduit. Cette faible amplitude du déplacement du pied pendant son retour, peut permettre au sprinter de rester moins longtemps en suspension et d'atteindre une fréquence de foulée élevée. Ces hypothèses sont corroborées par le comportement des « Rapides » qui présentent un appui plus court, une amplitude de

poulaine plus petite et une fréquence de foulées, en moyenne supérieure aux autres sprinters. Parallèlement, l'amplitude de la poulaine détermine les valeurs de la vitesse horizontale relative, pendant le retour du pied et lors de son contact au sol. Celle-ci doit être importante, car elle joue un rôle dans la réduction du freinage à l'appui (Mann et Hermann, 1985 ; Wood, 1987). La relation que nous avons mise en évidence entre la vitesse relative du pied au poser et le pic de freinage horizontal, confirme ces hypothèses. La vitesse relative du pied au contact est négative car le mouvement est dirigé de l'avant vers l'arrière, et elle est liée à l'amplitude du griffé, qui correspond au trajet du pied vers l'arrière avant le contact. La valeur moyenne de la vitesse au contact s'élève pour nos sprinters à -7.91m/s (± 0.87). Elle est conforme à celle que relève Mann et Herman (1985) pour leur meilleur sprinter (tableau 3-21).

Le comportement des sprinteuses de notre étude est assez différent de celui des hommes. D'une part, le pourcentage de cycle arrière est plus élevé chez elles, et cela se traduit par une flexion limitée de la hanche et donc de la montée du genou vers l'avant. D'autre part, il est notable que l'amplitude horizontale de la poulaine est réduite et que dans l'ensemble, le déplacement vertical du pied en arrière de la hanche est plus important chez elles. Par rapport aux hommes étudiés, les sprinteuses ramènent leur pied vers la fesse, à une distance plus proche de l'horizontale de la hanche, et cela se traduit par une vitesse maximale du pied supérieure, due en partie à l'accélération du pied dans sa descente vers le bas et l'avant. Cette plus grande vitesse relative du pied peut être due également à une flexion plus importante du genou des sujets féminins. Une plus grande flexion de la jambe lors de son retour a en effet comme conséquence, de réduire son moment d'inertie et d'augmenter sa vitesse de rotation autour de l'articulation de la hanche.

Mais l'amplitude du griffé des sprinteuses est très inférieure à celle des sprinters, et ne leur permet pas de maintenir une grande vitesse relative du pied au contact au sol, et celle-ci est inférieure aux valeurs des hommes. Le comportement des sujets féminins et la comparaison des paramètres décrivant la poulaine, montrent l'intérêt d'une grande amplitude de griffé pour le maintien d'une vitesse élevée au contact.

Dans leur étude, Tjupa et coll. (1989), ont mesuré chez des coureurs de 200m, une amplitude de griffé de 27.1cm (± 1.6) de moyenne, en phase de vitesse maximale, et de 17.5cm (± 2.7) en fin de course. La fatigue a pour effet d'augmenter la distance de contact par rapport à la verticale du centre de masse, par une action d'extension du genou avant le poser, et de réduire l'amplitude du griffé qui précède l'appui. Sprague et Mann (1983) ont également noté une distance horizontale plus élevée au contact et un angle du genou plus ouvert avant le poser, à la fin d'un 400m, par rapport aux valeurs mesurées en début de course.

Nos résultats nous amènent à conseiller aux sprinters de rechercher, lors du retour de la jambe, un trajet équilibré de leur pied de part et d'autre de la verticale de la hanche, en portant leur attention sur la distance en avant de la hanche, car celle-ci favorise l'amplitude du griffé. Tout en réalisant cette action, le souci du sprinter doit être la recherche d'une prise de contact proche de la verticale de la hanche. Nos résultats indiquent que la distance horizontale au poser a plus d'effet sur le griffé que la distance maximale du pied vers l'avant avant le contact au sol.

L'indice de griffé synthétise des informations sur différents paramètres. Sa valeur élevée indique que l'amplitude du griffé est importante, que la vitesse relative du pied au poser l'est également, et que le sprinter a pris contact au sol à une distance horizontale proche de la verticale de la hanche. Cet indice apparaît comme un élément appréciable pour comparer les sujets et rendre compte d'un type de comportement particulier.

Dans notre étude, l'angle du genou est plus fermé chez les sprinters qui présentent un trajet vers l'arrière de faible amplitude. Le comportement des sujets féminins est tout autre. Le genou de la jambe de retour est encore plus fléchi que celui des hommes, alors que le pied se déplace plus vers l'arrière. Cette différence de comportement montre la plus grande efficacité du retour de la jambe chez les hommes qui, tout en fléchissant le genou, le dirigent plus directement vers l'avant après le quitter, ce qui leur permet d'avoir une plus grande amplitude dans la flexion de la hanche et dans l'action de griffé.

Nous avons mesuré des angles minimum du genou compris entre 37° et 46° , ce qui est conforme aux données de la littérature pour les sprinters (Mann et Herman, 1985 ; Armstrong et coll., 1984).

L'action de griffé représente une sollicitation très importante de la musculature postérieure de la jambe. Les extenseurs de la hanche se contractent de façon concentrique tout au long du deuxième envol, alors que les fléchisseurs du genou (les ischio-jambiers) ont une action excentrique très intense pour freiner le déplacement du tibia vers l'avant. A l'approche du contact, les fléchisseurs du genou se contractent de façon concentrique et leur action se prolonge au début de l'appui pour tirer le corps vers l'avant (Mann et Sprague, 1980).

Selon Wood (1987), le principal facteur limitant la vitesse du sprinter est le retour de la jambe. Comme il est principalement tributaire de la capacité des ischio-jambiers, un entraînement de type excentrique pour ce groupe musculaire, apparaît comme indispensable pour limiter les blessures et améliorer la performance du sprinter.

Conclusion

Nous avons mis en place un protocole qui devrait permettre d'apprécier de façon satisfaisante, comment le sprinter s'organise pour optimiser son appui à pleine vitesse et le retour de sa jambe. La plupart des résultats de notre étude confirme certaines données de la littérature et montre de nombreuses interactions entre les paramètres mesurés.

Il a parfois été difficile d'interpréter les résultats et de comparer les groupes de sujets, du fait d'un nombre réduit de sprinters dans le groupe « Rapides » et de leur comportement qui n'était pas toujours conforme à celui dont l'efficacité est reconnue. Par exemple, un pic d'impact élevé au poser et une distance de contact relativement plus grande pour ces sprinters sont des comportements qui ne vont pas dans le sens de la plus grande efficacité et qui doivent donc être corrigés. D'autre part, certains sprinters ont, après 40m de course, presque stabilisé leur vitesse, alors que d'autres présentent une augmentation encore marquée de leur vitesse. Il est donc nécessaire de prendre en compte cet aspect dans la comparaison des sujets.

La brièveté de l'appui est caractéristique des sujets les plus rapides et elle est associée directement à une moindre extension de la jambe d'appui, ainsi qu'à une amplitude réduite du déplacement du centre de masse au cours de l'appui. La distance horizontale de contact par rapport au centre de masse est un élément qui agit sur la durée de l'appui, car elle a un effet sur l'amplitude du déplacement du centre de masse.

Notre étude tend à renforcer l'attention portée dans l'entraînement du sprinter, sur une prise de contact proche de la verticale du centre de masse et sur la nécessité d'une certaine raideur de la jambe d'appui, en portant une attention particulière à la tonicité de l'articulation de la cheville. Le maintien de la rigidité de la jambe à l'appui implique de limiter les flexions de la jambe à l'appui. Ce qui est possible si la jambe ne se pose pas trop loin de la verticale du centre de masse et de la hanche, et si d'autre part, la prise de contact se fait avec le tibia proche de la verticale, donc le pied sous le genou, sans trop d'ouverture de l'angle du genou au poser. Un angle du genou plus ouvert, associé à une distance de contact plus importante, seraient d'après la littérature, un mécanisme normalement observé en état de fatigue.

La mise en relation des paramètres dynamiques et cinématiques, indique que l'augmentation de la distance de contact provoque une élévation de l'ensemble des impulsions produites à l'appui et n'est donc pas économique en terme d'effort fourni. Nos résultats confirment que l'impulsion de freinage est liée également à la vitesse relative du pied avant le poser.

La représentation sous forme de poulaine, du trajet de retour du pied, est spécifique du style de course de chacun. Elle est une source d'informations sur les vitesses relatives du pied et les positions segmentaires à différentes phases du retour de la jambe d'appui. La poulaine permet également de visualiser l'amplitude de l'action de griffé qui caractérise la préparation de l'appui. L'amplitude horizontale de la poulaine de part et d'autre de la verticale de la hanche, devrait être équilibrée, avec un retour du genou relativement fléchi, sans montée excessive vers l'arrière. Nos résultats insistent sur la nécessité d'augmenter l'amplitude du griffé et par conséquence la vitesse relative du pied au poser. Cette action devrait se faire en recherchant là aussi, un contact proche de la verticale de la hanche ; ce que permet d'apprécier l'indice de griffé. La mesure de cet indice présente l'intérêt d'une part, de résumer un certain nombre de comportements liés à l'efficacité de l'action de griffé, et d'autre part de faciliter la comparaison.

L'étude des paramètres dynamiques indique que le sprinter devrait produire son pic de propulsion, tôt au cours de l'appui, et limiter son impulsion verticale, car elle a un effet sur la durée de l'appui, en particulier la durée du freinage horizontal.

Elle a également montré que les différentes impulsions produites à l'appui interagissent les unes avec les autres. Ces résultats nous inciteraient, dans de prochains travaux, à calculer la valeur et l'orientation du vecteur force résultant au cours des différentes phases de l'appui. Il serait judicieux de vérifier l'hypothèse de Mero et coll. (1992), qui indiquent que pour une efficacité optimale en sprint, ce vecteur devrait être le plus vertical possible en phase de freinage et le plus horizontal en phase propulsive.

Le protocole que nous avons mis en place nécessiterait d'être reproduit avec un plus grand nombre de sprinters, en particulier parmi les plus performants, afin de vérifier si les tendances mises en évidence pour le groupe « Rapides » de cette étude, se confirment. Il serait même intéressant de prolonger la distance d'étude de 10m, pour se rapprocher de la vitesse maximale stabilisée des coureurs.

Ce protocole devrait donner aux entraîneurs des éléments de référence et de comparaison suffisamment fiables pour apprécier l'organisation du sprinter à pleine vitesse et suivre l'évolution de certaines variables au cours de l'entraînement de leurs athlètes.

Il serait nécessaire de le reproduire à différents moments de la carrière des sprinters afin de vérifier par d'autres mesures, si les comportements individuels évoluent, et si les modifications segmentaires induites par l'entraînement ont des répercussions au plan dynamique et au plan de la performance.

: Annexes

Résultats individuels pour le départ

Caractéristiques des sprinters

	Les 3 plus rapides			Les 8 autres sprinters							
	ME	GU	GR	MA	BOU	BOI	LA	TR	HA	SI	GA
Performance 100m (s)	10.34	10.20	10.31	11.01	11.00	11.04	10.53	10.19	10.95	10.27	10.86
Age (années)	25	23	24	25	24	24	26	32	19	28	18
Taille (m)	1.80	1.87	1.87	1.785	1.90	1.77	1.79	1.86	1.76	1.86	1.72
Poids (kg)	76.96	89.92	79.52	69.44	82.16	74.48	72.32	82.56	68.40	93.28	60.24
Longueur jambe (m)	1.05	1.08	1.105	1.11	1.16	1.055	1.07	1.125	1.055	1.15	1.04

Caractéristiques générales de la première partie de la course

	Les 3 plus rapides			<i>Les 8 autres sprinters</i>							
	ME	GU	GR	MA	BOU	BOI	LA	TR	HA	SI	GA
Durée de l'appui (Δt_A) en seconde	0.176	0.190	0.172	0.266	0.190	0.174	0.166	0.196	0.192	0.184	0.170
Longueur de sortie pied AR (Lc1) en mètre	1.24	1.25	1.45	1.45	1.44	1.36	1.35	1.30	1.41	1.39	1.04
Longueur de 1° foulée (Ls1) en mètre	0.91	0.95	1.24	1.20	1.11	0.98	1.08	1.10	1.08	1.08	0.79
Longueur de 2° foulée (Ls2) en mètre	1.21	1.34	0.93	1.44	1.26	1.30	1.24	1.15	1.29	1.24	1.07
Longueur de 3° foulée (Ls3) en mètre	1.18	1.34	1.43	1.55	1.58	1.35	1.38	1.40	1.37	1.45	1.15
Longueur de 2° enjambée (Lc2) en mètre (Ls2+ Ls3)	2.39	2.67	2.36	2.99	2.84	2.64	2.62	2.55	2.66	2.69	2.22
Vitesse du CM (VmA) en mètre/seconde	3.65	2.95	3.35	2.91	3.07	3.32	3.56	3.18	3.44	3.61	2.55
Oscillation du CM (OSCz) en mètre	0.06	0.03	0.08	0.08	0.05	0.02	0.04	0.08	0.03	0.08	0.05

La jambe d'appui

	Les 3 plus rapides			Les 8 autres sprinters							
	ME	GU	GR	MA	BOU	BOI	LA	TR	HA	SI	GA
Hauteur de CM au poser (dzt_t) en mètre	0.71	0.75	0.77	0.80	0.79	0.75	0.74	0.76	0.81	0.83	0.70

Distance horiz. de CM au poser (dxt_t) en mètre	0.25	0.30	0.18	0.11	0.30	0.28	0.25	0.18	0.15	0.16	0.33
Hauteur de CM au quitter (dzt_{t-o}) en mètre	0.74	0.73	0.82	0.84	0.81	0.77	0.78	0.84	0.81	0.86	0.74
Distance horiz. de CM au quitter (dxt_{t-o}) en mètre	0.89	0.86	0.76	0.89	0.89	0.85	0.87	0.81	0.83	0.83	0.76
Angle cuisse-verticale au poser ($\alpha 1_t$) en degré	-29.29	-25.24	-29.48	-27.44	-18.48	-22.80	-27.80	-40.59	-27.36	-27.21	-24.62
Angle cuisse-verticale au quitter ($\alpha 1_{t-o}$) en degré	43.24	30.62	42.89	38.86	34.62	34.53	37.29	39.26	28.92	32.93	37.31
Extension de hanche à l'appui ($ext\alpha 1$) en degré	72.53	55.86	72.37	66.30	53.09	57.33	65.09	79.85	56.29	60.14	61.93
Angle du genou au poser ($\alpha 2_{t1}$) en degré	91.57	102.21	105.45	110.10	107.29	102.94	96.76	87.43	105.47	113.30	116.56
Angle du genou au quitter ($\alpha 2_{t-o}$) en degré	163.98	148.43	170.72	160.24	154.46	153.13	158.32	160.50	150.42	159.24	162.12
Extension du genou à l'appui ($ext\alpha 2$) en degré	72.41	46.22	65.26	50.14	47.17	50.20	61.56	73.08	44.94	45.93	45.56
Indice d'extension ($ind\alpha 2$) en unité arbitraire	0.80	0.88	1.28	0.30	0.79	0.86	1.11	0.80	0.81	0.99	0.62
Angle de la cheville au poser ($\alpha 3_t$) en degré	98.84	114.67	95.05	99.93	106.43	111.19	111.96	101.19	97.79	97.35	107.57
Angle min. de la cheville à l'appui ($\alpha 3_{min}$) en degré	89.85	101.35	81.13	96.22	97.30	99.11	96.15	82.04	84.98	84.49	104.11
Angle de la cheville au quitter ($\alpha 3_{t-o}$) en degré	129.85	116.60	113.68	114.29	124.42	120.72	117.38	110.50	109.89	107.46	134.05
Flexion de la cheville à l'appui ($flex\alpha 3$) en degré	8.99	13.33	13.91	3.71	9.13	12.09	15.81	19.14	12.81	12.87	3.47
Extension de la cheville à l'appui ($ext\alpha 3$) en degré	40.00	15.26	32.54	18.08	27.11	21.61	21.23	28.45	24.92	22.98	29.95
Angle entre les cuisses au poser ($\alpha 4_t$) en degré	-62.00	-42.66	-33.09	-65.76	-40.99	-48.04	-48.78	-53.01	-54.51	-27.82	-22.38

Le retour de la jambe

	Les 3 plus rapides			Les 8 autres sprinters							
	ME	GU	GR	MA	BOU	BOI	LA	TR	HA	SI	GA
La jambe libre											
Angle maximum du genou ($\alpha'2_{max}$) en degré	159.29	166.63	165.69	173.88	170.92	176.53	174.07	164.27	170.76	177.87	173.80
Angle minimum du genou ($\alpha'2_{min}$) en degré	45.90	56.46	55.41	61.31	59.52	54.46	55.89	57.88	59.55	53.32	53.29
Flexion du genou au retour ($flex\alpha'2$) en degré	113.39	110.17	110.29	112.57	111.39	122.07	118.18	106.39	111.21	124.56	120.50
Angle cuisse - verticale maximum ($\alpha'1_{max}$) en degré	69.75	68.62	57.66	64.36	59.89	70.72	68.82	68.62	61.73	68.59	60.39

La jambe d'appui hors appui												
Angle genou à la sortie du bloc arrière ($\alpha_{2t_{br}}$) en degré	124.03	128.27	134.60	136.33	130.37	126.47	120.18	117.15	124.03	129.58	131.30	
Angle minimum du genou (α_{2min}) en degré	69.04	79.07	33.71	56.98	67.95	65.08	66.39	48.36	65.49	86.15	75.78	
Angle maximum entre les cuisses (α_{4max}) en degré	113.39	93.35	100.54	100.62	92.99	103.37	101.06	107.86	89.63	101.52	102.94	

La position en starting-blocks

	Les 3 plus rapides			Les 8 autres sprinters							
	ME	GU	GR	MA	BOU	BOI	LA	TR	HA	SI	GA
Angle à "prêt" (α_{6t_0}) en degré	94.46	94.93	99.73	112.68	99.35	100.01	108.22	105.81	111.09	99.34	99.72
Distance horiz. CM - pied AR (d_{xt_0}) en mètre	0.70	0.64	0.60	0.71	0.75	0.63	0.65	0.58	0.60	0.66	0.58
Distance verticale de CM - sol (d_{zt_0}) en mètre	0.48	0.58	0.56	0.59	0.58	0.59	0.60	0.56	0.57	0.62	0.51
Distance pied AR - ligne (d_{xbr}) en mètre	0.88	0.85	0.85	0.75	0.84	0.79	0.77	0.87	0.68	0.79	0.75
Distance pied AV - ligne (d_{xbf}) en mètre	0.62	0.58	0.62	0.55	0.56	0.49	0.54	0.62	0.41	0.52	0.52
Distance entre les blocs ($d_{f_{dx}b}$) en mètre	0.27	0.27	0.23	0.20	0.28	0.30	0.23	0.26	0.27	0.27	0.24
Distance horizontale de CM - ligne (d_{xli}) en mètre	0.18	0.20	0.25	0.04	0.09	0.16	0.13	0.29	0.07	0.12	0.17

Le redressement

	Les 3 plus rapides			Les 8 autres sprinters							
	ME	GU	GR	MA	BOU	BOI	LA	TR	HA	SI	GA
Redressement départ 1 ($rd_{t_{br}}$) en degré	4.42	15.00	22.90	14.68	5.88	19.18	16.59	22.20	17.12	19.04	30.77
Redressement départ 2 ($rd_{t_{br}}$) en degré	41.72	14.80	15.13	39.55	33.42	26.73	36.35	15.91	42.08	19.44	16.05
Redressement 1° appui (rd_{t_1}) en degré	4.92	6.00	1.83	3.88	-2.38	3.92	5.76	7.49	1.05	-8.03	-4.72
Redressement 2° appui (rd_{t_2}) en degré	-4.52	-4.20	19.07	0.52	12.20	-4.44	1.92	10.62	-9.23	12.71	2.61
Redressement 3° appui (rd_{t_3}) en degré	15.76	16.56	-3.57	14.64	7.51	12.24	2.57	4.34	15.85	9.98	7.45
Redressement total (rdT) en degré	62.30	48.16	55.35	73.27	56.62	57.63	63.18	60.56	66.87	53.13	52.16
Augmentation vertical CM entre 1° et 2° appui (ΔGz)	0.05	0.01	0.06	0.04	0.02	0.00	0.01	0.04	0.02	0.09	0.02

La dynamique verticale

	Les 3 plus rapides			Les 8 autres sprinters							
	ME	GU	GR	MA	BOU	BOI	LA	TR	HA	SI	GA
Poids (P) en Newton	755.00	882.10	780.10	681.20	810.70	728.30	714.20	809.90	671.00	915.10	591.00
Pic d'impact vertical (Rz1) en Newton	718.87	1017.10	1076.74	904.08	1488.76	828.74	1085.37	645.10	801.28	750.26	1112.06
Pic d'impact vertical normalisé (Rz1n) en x fois P	0.95	1.15	1.38	1.33	1.84	1.14	1.520	0.797	1.194	0.820	1.882
Temps à Rz1 (t _{Rz1}) en seconde	0.010	0.012	0.007	0.008	0.010	0.012	0.016	0.012	0.010	0.010	0.010
Temps à Rz1 normalisé (t _{Rz1n}) en % de ΔtA	5.68	6.32	4.07	3.01	5.26	6.90	9.64	6.12	5.21	5.43	5.88
Pic max. de force verticale (Rzmax) en Newton	1500.53	1754.80	1648.07	1283.93	1526.43	1462.82	1662.98	1768.93	1369.47	2263.35	1250.18
Pic max. de force verticale norm. (Rzmaxn) en x fois P	1.99	1.99	2.11	1.89	1.88	2.01	2.33	2.18	2.04	2.47	2.12
Temps à Rzmax (t _{Rzmax}) en seconde	0.11	0.12	0.10	0.17	0.11	0.09	0.088	0.103	0.108	0.106	0.098
Temps à Rzmax normalisé (t _{Rzmaxn}) en % de ΔtA	60.23	64.00	60.00	65.00	55.26	54.02	53.00	52.55	56.00	57.00	57.00
Impulsion verticale (ImpRz) en Newton.seconde	170.57	218.73	201.54	225.07	200.76	171.59	176.43	208.12	170.78	252.28	131.94
Impulsion verticale norm. (ImpRzn) en x fois P * 1000	225.93	247.96	258.35	330.41	247.64	235.60	247.04	256.97	254.51	275.70	223.27

La dynamique horizontale

	Les 3 plus rapides			Les 8 autres sprinters							
	ME	GU	GR	MA	BOU	BOI	LA	TR	HA	SI	GA
Pic max. de force de freinage (Rx̄) en Newton	-450.07	-502.16	-472.72	-619.71	-606.51	-359.27	-188.38	-307.36	-548.00	-521.78	-695.53
Pic max. de freinage normalisé (Rx̄n) en x fois P	0.60	0.57	0.61	0.91	0.75	0.49	0.26	0.38	0.82	0.57	1.18
Temps à Rx̄ (t _{Rx̄}) en seconde	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.014	0.010	0.010	0.010	0.008
Temps à t _{Rx̄} normalisé (t _{Rx̄n}) en % de ΔtA	3.00	4.00	5.00	2.00	5.00	6.00	8.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Impulsion de freinage (ImpRx̄) en Newton.seconde	-3.53	-4.86	-2.63	-4.31	-4.17	-2.74	-1.20	-2.66	-3.56	-4.29	-4.52
Impul. de frein. normalisée (ImpRx̄n) en x fois P*1000	-4.68	-5.51	-3.37	-6.33	-5.14	-3.76	-1.68	-3.28	-5.31	-4.69	-7.65
Temps passage frein./propul. (t _{x-,x+}) en seconde	0.018	0.020	0.010	0.014	0.016	0.014	0.016	0.016	0.012	0.020	0.014
t _{x-,x+} normalisé (t _{x-,x+n}) en % de ΔtA	10.00	11.00	7.00	6.00	9.00	9.00	10.00	8.00	7.00	10.00	8.00

Pic max. de force de propulsion (Rx^+) en Newton	942.05	1082.62	855.89	722.46	975.41	857.32	899.78	860.00	716.40	1081.55	755.82
Pic max. de propulsion normalisé (Rx^+n) en x fois P	1.25	1.23	1.10	1.06	1.20	1.18	1.26	1.06	1.07	1.18	1.28
Temps à Rx^+ (t_{Rx^+}) en seconde	0.13	0.14	0.13	0.20	0.14	0.13	0.108	0.122	0.136	0.114	0.112
Temps à tRx^+ normalisé (t_{Rx^+n}) en % de ΔtA	73.00	72.00	74.00	77.00	74.00	74.00	65.00	62.00	71.00	62.00	66.00
Impulsion de propulsion ($ImpRx^+$) en Newton.seconde	95.37	129.31	103.09	104.66	113.54	94.99	91.10	98.14	86.19	127.23	81.94
Impul. de propul. normalisée ($ImpRx^+n$) en x fois $P*1000$	126.32	146.59	132.15	153.64	140.05	130.43	127.56	121.18	128.45	139.03	138.65
Impulsion horizontale nette ($ImpRx$) en Newton.seconde	91.83	124.45	100.46	100.35	109.37	92.24	89.89	95.48	82.63	122.95	77.42
Impulsion horiz. nette norm. ($ImpRxn$) en x fois $P*1000$	121.64	141.08	128.77	147.31	134.91	126.66	125.87	117.89	123.15	134.36	131.02

Résultats individuels pour la pleine vitesse

Caractéristiques générales

	Les 3 plus rapides			Les 8 autres sujets							
	ME	GU	GR	MA	BOU	BOI	LA	TR	HA	SI	GA
Durée de l'appui (ΔtA) (s)	0.092	0.096	0.082	0.104	0.106	0.100	0.096	0.112	0.098	0.106	0.090
Vitesse moy. du CM (VmA) (m/s)	8.80	8.44	9.70	7.90	9.34	7.40	8.44	9.11	8.16	9.34	9.11
Amplitude moy ($L/2c$) (m)	2.16	2.38	2.28	2.38	2.31	2.17	2.25	2.33	2.25	2.42	2.30
Amplitude/taille	1.20	1.27	1.22	1.33	1.22	1.23	1.26	1.24	1.28	1.30	1.34
Amplitude/longueur de jambe	2.06	2.20	2.06	2.14	2.04	2.06	2.10	2.07	2.13	2.10	2.21
Fréquence moyenne (f) (Hz)	4.08	3.55	4.25	3.32	4.04	3.41	3.75	3.91	3.63	3.86	3.96
Oscillations du CM ($Oscz$) (m)	0.07	0.09	0.07	0.06	0.04	0.05	0.04	0.08	0.07	0.09	0.06

Paramètres dynamiques

•

Dynamique verticale

	Les 3 plus rapides			Les 8 autres sujets							
	ME	GU	GR	MA	BOU	BOI	LA	TR	HA	SI	GA

Poids (en Newton) (P)	755	882.1	780.1	681.2	810.7	728.3	714.2	809.9	671	915.1	591
Durée de l'appui (Δt_A) (s)	0.092	0.096	0.082	0.104	0.106	0.100	0.096	0.112	0.098	0.106	0.090
1 ^{er} pic de force verticale (N) (Rz1)	1374.18	2408.54	2202.92	1434.61	1595.49	1830.14	1531.14	1447.95	2916.30	1933.74	1345.92
1 ^{er} pic de force verticale normalisé en x fois P (Rz1n)	1.820	2.730	2.824	2.106	1.968	2.513	2.144	1.788	4.346	2.113	2.277
Temps à Rz1 (s) (t_{Rz1})	0.008	0.006	0.010	0.008	0.008	0.008	0.010	0.008	0.026	0.012	0.006
Temps à Rz1 Normalisé en % du temps d'appui (t_{Rz1n})	8.696	6.250	12.195	7.692	7.55	8.00	10.417	7.143	26.53	11.32	6.667
Pic maximum de force verticale (N) (Rzmax)	2846.45	3582.59	3116.42	3173.71	2904.53	2586.69	3150.95	2854.82	2398.34	3814.11	2639.27
Pic max. de force verticale norm. en x fois P (Rzmaxn)	3.770	4.061	3.995	4.659	3.583	3.552	4.412	3.524	3.57	4.168	4.470
Temps à RzMax (s) (t_{Rzmax})	0.034	0.042	0.032	0.030	0.032	0.032	0.030	0.044	0.042	0.028	0.030
Temps à RzMax normalisé en % du temps d'appui (t_{Rzmaxn})	37	44	39	29	30	32	31	39	42.86	26	33.33
Impulsion verticale (N.s) (ImpRz)	162.96	218.65	154.35	174.09	196.19	160.71	166.12	195.87	156.17	228.55	134.28
Impulsion vert. normalisée en x fois P (*1000) (ImpRzn)	215.85	247.87	197.85	255.56	242.00	220.66	232.61	241.84	232.74	249.76	227.21

•

Dynamique horizontale

	Les 3 plus rapides			Les 8 autres sujets							
	ME	GU	GR	MA	BOU	BOI	LA	TR	HA	SI	GA
Pic maximum de force de propulsion (N) (Rx^+)	668.95	754.04	604.19	505.54	778.47	494.13	595.81	566.37	511.61	662.70	558.35
Pic maximum de propulsion normalisé en x fois P (Rx^+n)	0.886	0.855	0.775	0.742	0.960	0.678	0.834	0.699	0.762	0.724	0.950
Temps à Rx^+ (s) (t_{Rx^+})	0.072	0.076	0.058	0.078	0.086	0.078	0.076	0.076	0.072	0.078	0.060
Temps à Rx^+ normalisé en % du temps d'appui (t_{Rx^+n})	78	79	71	75	81	78	79	71	73	74	66.67
Pic maximum de force de freinage (N) (Rx^-)	-949.37	-1464.4	-1246.0	-1146.3	-1263.7	-1234.1	-992.54	-899.24	-883.37	-1468.7	-1201.3
Pic maximum de freinage normalisé en x fois P (Rx^-n)	-1.257	-1.660	-1.597	-1.683	-1.559	-1.694	-1.390	-1.110	-1.316	-1.605	-2.030
Temps à Rx^- (s) (t_{Rx^-})	0.010	0.006	0.010	0.010	0.014	0.010	0.010	0.008	0.010	0.012	0.010
Temps à Rx^- normalisé en % du temps d'appui (t_{Rx^-n})	11	6	12	10	13	10	10	7	10	11	11.11
Impulsion de propulsion (N.s) (Imp Rx^+)	21.86	27.09	17.87	16.48	26.14	17.32	18.68	20.73	17.54	24.95	18.51
Impulsion de propulsion norm (x foisP*1000) (Imp Rx^+n)	28.95	30.71	22.91	24.19	32.24	23.78	26.16	25.60	26.14	27.26	31.32
Impulsion de freinage (N.s) (Imp Rx^-)	-14.75	-17.43	-12.92	-13.28	-20.51	-13.21	-12.73	-13.73	-10.60	-22.08	-10.18
Impulsion de freinage norm. (x foisP*1000) (Imp Rx^-n)	-19.54	-19.76	-16.56	-19.50	-25.30	-18.14	-17.82	-16.95	-15.80	-24.13	-17.23
Impulsion horizontale nette (N.s) (Imp Rx)	7.11	9.66	4.95	3.20	5.63	4.11	5.95	7.01	6.94	2.87	8.33
Impulsion horiz. nette norm. (x foisP*1000) (Imp Rxn)	9.42	10.95	6.35	4.69	6.95	5.64	8.33	8.65	10.34	3.13	14.10
Temps au passage freinage-propulsion (s) (t_{x-x^+})	0.042	0.044	0.036	0.046	0.050	0.048	0.046	0.050	0.048	0.050	0.034
Temps à t_{x-x^+} normalisé en % du temps d'appui (t_{x-x^+n})	46	46	44	44	47	48	48	45	49	47	37.78

Paramètres cinématiques

La jambe d'appui

(les angles sont en degrés)

	Les 3 plus rapides			Les 8 autres sujets							
	ME	GU	GR	MA	BOU	BOI	LA	TR	HA	SI	GA
hauteur de CM au poser (m) (dzt_t)	1.00	1.02	1.09	1.07	1.06	1.02	1.05	1.05	1.06	1.07	0.93
distance de contact (m) (dxt_t)	0.36	0.37	0.31	0.28	0.36	0.31	0.28	0.39	0.32	0.40	0.23
distance de décollage (m) (dxt_{t-o})	0.45	0.41	0.46	0.51	0.61	0.43	0.52	0.60	0.48	0.57	0.56
amplitude de CM à l'appui (m) ($d_G \times A$)	0.81	0.81	0.80	0.79	0.99	0.74	0.81	1.02	0.80	0.99	0.82
angle cuisse-verticale au poser ($\alpha 1_t$)	-33	-35	-22	-23	-27	-29	-24	-37	-27	-27	-29
angle cuisse-verticale au quitter ($\alpha 1_{t-o}$)	7	8	14	20	27	13	22	17	20	25	24
extension de hanche à l'appui ($ext\alpha 1$)	40	43	36	43	54	42	46	54	47	52	53
angle du genou au poser ($\alpha 2_t$)	155	148	168	159	166	150	159	147	151	162	149
angle minimum du genou ($\alpha 2_{min}$)	140	137	154	147	144	140	146	129	136	148	140
angle du genou au quitter ($\alpha 2_{t-o}$)	145	145	157	160	163	148	162	147	156	163	154
flexion du genou à l'appui ($flex\alpha 2$)	15	11	14	12	22	10	13	18	15	14	9
extension du genou à l'appui ($ext\alpha 2$)	5	8	3	13	19	8	16	18	20	15	14
angle de la cheville au poser ($\alpha 3_t$)	125	125	139	126	152	119	134	126	116	126	121
angle minimum de la cheville ($\alpha 3_{min}$)	104	101	118	106	122	103	109	97	94	99	106
angle de la cheville au quitter ($\alpha 3_{t-o}$)	127	114	145	131	147	122	144	135	126	138	138
flexion de la cheville ($flex\alpha 3$)	21	24	21	20	30	16	25	29	22	27	15
extension de la cheville ($ext\alpha 3$)	23	13	27	25	25	19	35	38	32	39	32
angle entre les cuisses au poser ($\alpha 4_t$)	2	23	-12	0	14	22	9	9	8	9	1
angle jambe-horizontale au poser ($\alpha 5_t$)	82	86	80	87	77	91	87	86	92	81	92

• **Le retour de la jambe**

	Les 3 plus rapides			Les 8 autres sujets							
	ME	GU	GR	MA	BOU	BOI	LA	TR	HA	SI	GA
angle maximum entre les cuisses (°) (α_{4max})	89	107	106	103	113	109	105	108	104	105	102
angle minimum du genou (°) (α_{2min})	37	39	37	41	46	40	37	39	44	46	39
angle maximal du genou avant l'appui (°) (α_{2max})	155	150	164	174	167	149	162	150	159	165	158
angle cuisse-verticale maximum (°) (α_{1max})	75	60	74	60	65	70	64	80	63	62	72
distance horizontale pied-hanche au poser (m) ($dhxt_t$)	0.42	0.29	0.20	0.36	0.31	0.32	0.27	0.27	0.22	0.38	0.28
distance horizontale pied-hanche au quitter (m) ($dhxt_{t-o}$)	0.33	0.31	0.37	0.44	0.51	0.58	0.45	0.52	0.44	0.50	0.51
distance verticale minimale pied-hanche (m) ($dzPou$)	-0.28	-0.21	-0.24	-0.21	-0.22	-0.21	-0.12	-0.34	-0.24	-0.23	-0.14
amplitude horizontale de la poulaïne (m) ($dxPou$)	1.37	1.40	1.38	1.52	1.49	1.33	1.42	1.53	1.49	1.41	1.39
amplitude horiz. du cycle arr. (en % de $dxPou$) ($\%rPou$)	48	54	52	53	56	56	56	50	55	58	55
amplitude du griffé (m) ($dxGri$)	0.29	0.35	0.46	0.35	0.35	0.27	0.35	0.49	0.45	0.21	0.35
indice de griffé (%) ($indGri$)	41	55	70	49	53	46	56	64	67	36	56
vitesse maximum du pied/hanche (m/s) (V_{maxPou})	8.29	8.10	8.16	8.77	8.89	7.85	8.67	8.90	8.86	7.68	8.15
vitesse du pied/hanche au poser (m/s) (VP_{out_t})	-7.72	-7.54	-8.21	-7.95	-7.98	-6.57	-8.22	-9.14	-9.49	-7.11	-7.09

SOMMAIRE

Chapitre 1 : Etat de la littérature, techniques et protocole 1^{er} document

Chapitre 2 : Le départ en starting-blocks, résultats et discussion 2

Introduction 2

Résultats et discussion 3

Caractéristiques des sprinters 3

Résultats (tableau 2-1) 3

Discussion 3

Caractéristiques générales de la première partie de la course 4

Résultats (tableau 2-3) 4

Discussion 7

La jambe d'appui 7

Résultats (tableau 2-5) 7

Discussion 11

Le retour de la jambe 12

Résultats (tableau 2-6) 12

La jambe libre 12

La jambe du premier appui hors appui 13

Discussion 14

Le départ et le redressement 16

Résultats (tableaux 2-7 et 2-8) 16

La position en starting-blocks (figure 2-26) 16

Le redressement 18

Discussion 20

Dynamique verticale 21

Résultats (tableau 2-10) 21

Dynamique antéro-postérieure 23

Résultats (tableau 2-11) 23

Discussion générale sur la dynamique 26

Conclusion 27

Chapitre 3 : La foulée à pleine vitesse, résultats et discussion 28

Introduction 28

Résultats et discussion 30

Les caractéristiques générales de la course 30

Résultats 30

Discussion 31

Les paramètres dynamiques 32

Résultats 32

Description des courbes de force de réaction du sol 32

Dynamique verticale 34

Dynamique horizontale 38

Discussion 40

Les paramètres cinématiques 42

<u>La jambe d'appui</u>	42
<i>Résultats</i>	43
<i>Discussion</i>	50
<u>Le retour de la jambe</u>	53
<i>Résultats</i>	53
<i>Discussion</i>	60
<u>Conclusion</u>	62
<u>Chapitre 4 : Annexes</u>	62
<u>Résultats individuels pour le départ</u>	63
<u>Caractéristiques des sprinters</u>	63
<u>Caractéristiques générales de la première partie de la course</u>	63
<u>La jambe d'appui</u>	63
<u>Le retour de la jambe</u>	64
<u>La position en starting-blocks</u>	65
<u>Le redressement</u>	65
<u>La dynamique verticale</u>	66
<u>La dynamique horizontale</u>	66
<u>Résultats individuels pour la pleine vitesse</u>	67
<u>Caractéristiques générales</u>	67
<u>Paramètres dynamiques</u>	67
<u>Dynamique verticale</u>	67
<u>Dynamique horizontale</u>	68
<u>Paramètres cinématiques</u>	69
<u>La jambe d'appui</u>	69
<u>Le retour de la jambe</u>	70

Résumé

L'état de la littérature, les techniques et le protocole sont contenus dans un premier document. Les résultats du travail de recherche sont présentés dans ce deuxième document. On trouvera en premier lieu, l'analyse du départ en starting-blocks, du premier appui, ainsi que l'étude du redressement sur les trois premières foulées. Puis, sera présentée l'étude d'un appui à pleine vitesse et d'un cycle de jambe complet après 40m de course.

Les données analysées sont les valeurs de paramètres dynamiques et cinématiques, ainsi que leur mise en relation pour une population de sprinters hommes de niveau national. D'après leur performance chronométrique, deux sous-groupes ont été distingués : un groupe qualifié de « rapides » et un groupe qualifié d'« autres ». Ceci afin de comparer leurs résultats et de tenter de mettre à jour des niveaux d'expertise au travers de leur organisation motrice. Les résultats d'une petite population de femmes sont aussi présentés. Ils sont donnés à titre indicatif mais ne sont pas discutés, leur nombre étant jugé trop restreint.

Ayant choisi de rendre compte des nombreux résultats que nous avons obtenus, nous déconseillons une lecture linéaire de ce travail qui pourrait s'avérer difficile. Nous préconisons plutôt une entrée par les parties « discussion » qui résument les principaux résultats et les interprètent. Le détail pouvant être abordé ensuite selon ses centres d'intérêt et au fur et à mesure de ses besoins précis d'information. Il est aussi possible d'entrer par comparaison des deux appuis particulièrement étudiés : au début de la course et à pleine vitesse. Pour faciliter la comparaison, les paramètres étudiés portent le même nom lorsqu'ils existent aux deux instants.

Pour le départ, il a été mis particulièrement en avant la gestion de la double contrainte qui s'impose à l'athlète dans les deux plans de l'espace. Le sprinter doit en effet développer des forces verticales pour se redresser mais aussi les minimiser pour favoriser sa progression de course. Le premier appui montre le rôle important de la cheville aussi bien dans l'amorti du choc d'impact que dans le maintien d'un couple de déséquilibre facilitant la progression. Un indice d'extension du genou a été introduit pour résumer à la fois la qualité de raideur de la jambe au poser ainsi que sa vitesse d'extension.

Pour la foulée à pleine vitesse, nous avons montré que la brièveté de l'appui, caractéristique des sujets les plus rapides était liée à une moindre extension de la jambe d'appui et à un faible déplacement du centre de masse pendant le contact au sol. Notre étude insiste sur la nécessité d'une prise de contact proche de la verticale du centre de masse avec une certaine raideur de la jambe. Le maintien de cette raideur nécessite qu'au moment du contact, le tibia soit proche de la verticale, sans trop d'ouverture de l'angle du genou. La représentation du retour de la jambe, sous forme de poulaine présente l'intérêt de résumer et de visualiser certaines actions segmentaires. L'indice de « griffé » que nous proposons rend compte à la fois de l'action de « griffé » proprement dite et de la distance pied-centre de masse lors du poser.

La répétition du protocole devrait permettre de vérifier les effets de l'entraînement.