



HAL
open science

Analyse descriptive du 400 mètres

Bruno Gajer, Bruno Reine, Pierre Bonvin

► **To cite this version:**

Bruno Gajer, Bruno Reine, Pierre Bonvin. Analyse descriptive du 400 mètres. [Rapport de recherche] Institut National du Sport et de l'Education Physique (INSEP). 2002. hal-01924586

HAL Id: hal-01924586

<https://insep.hal.science//hal-01924586>

Submitted on 16 Nov 2018

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

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

INSEP

DEPARTEMENT DES SCIENCES DU SPORT

Laboratoire de biomécanique et physiologie du sport

ANALYSE DESCRIPTIVE DU 400 METRES

Rapport de recherche présenté par :

Bruno GAJER ¹

Collaborateur scientifique : Bruno REINE ²

Collaborateurs fédéraux : Pierre BONVIN ³

Travail effectué par

Laboratoire de biomécanique et physiologie – INSEP ¹
Laboratoire d'Informatique appliquée au sport – INSEP ²

En collaboration avec

Fédération Française d'athlétisme ³

Décembre 2002

Un grand merci ,

- Aux collègues et amis qui ont permis l'installation du matériel et les prises de vue :

Pierre CHASSIN, Christine HANON, Christian MILLER, Claire THOMAS, Caroline DELMER

- A l'Unité de Formation Audiovisuelle et des interventions (UFAVI) - l'INSEP

- Aux personnels et entraîneurs de la ville de MELUN et en particulier à :

Mr Georges WIECZOREK

Mr Jean GASNIER

Mr Jacky VERZIER

SOMMAIRE

PREFACE	1
INTRODUCTION	2
METHODOLOGIE	4
• 1- Population	5
• 2- Protocole	5
2.1 Epreuve des championnats du monde 1999	
2.2 Epreuve du meeting de Melun	
RESULTATS	9
• 1- Les Femmes	10
1.1 La vitesse	10
1.2 La fréquence des foulées	11
1.3 L'amplitude des foulées	13
• 2- Les Hommes	15
2.1 La vitesse	15
2.2 La fréquence des foulées	16
2.3 L'amplitude des foulées	17
DISCUSSION	20
• 1- La vitesse	21
• 2- Les composantes de la foulée : [fréquence * Amplitude]	25
• 3- Comparaison Hommes et Femmes	28
CONCLUSION	30
BIBLIOGRAPHIE	31
ANNEXES	33

PREFACE

Alors que la plupart des travaux concernant l'épreuve de 400 mètres , traite principalement et prioritairement des caractéristiques physiologiques de l'épreuve, cette recherche propose une autre approche en analysant la foulée et ses composantes au cours d'une course de 400 mètres.

Cette photographie du tour de piste présente le double intérêt d'étudier le phénomène d'apparition de la fatigue qui se traduit par une chute importante de la vitesse, facteur limitant du sprint long, et d'en dégager les stratégies de foulées mises en jeu par les athlètes pour répondre aux contraintes de cette épreuve .

Ces données étant identifiées, il est alors intéressant de proposer des implications possibles pour l'entraînement (à incidences techniques et physiologiques) dont les objectifs visent précisément à améliorer chez l'athlète son accoutumance à supporter la fatigue et à augmenter ses réserves de vitesse pour la faire apparaître le plus tard possible.

Cette recherche est en parfaite conformité avec la volonté du groupe sprint fédéral qui est de répondre chaque fois que faire ce peut aux interrogations et questions du terrain. Ces résultats devraient devenir de véritables points de repère d'évaluation pour l'entraînement du 400 mètres.

Pierre BONVIN

Entraîneur National Coordonnateur du Sprint

INTRODUCTION

Le 400m symbolise en athlétisme l'épreuve la plus exigeante, où l'athlète doit aller jusqu'à épuisement pour obtenir une performance, tout en préservant au maximum sa vitesse. Cette épreuve conduisant à un état de grande fatigue, a donc naturellement servi de support à des travaux de recherche sur l'altération des paramètres physiologiques et sur la dégradation des paramètres biomécaniques de la foulée. Ces dernières ont été menées le plus souvent en comparant le début de course (ou une épreuve similaire à la même vitesse de déplacement) avec la fin de course du 400m (entre 320 et 380m). Bates (1974) enregistre ainsi une diminution proche de 5% pour l'amplitude et la fréquence des foulées alors que Sprague (1983) trouve une baisse importante de la vitesse due essentiellement à une perte de fréquence.

Une approche plus synoptique, prenant en compte l'ensemble de la course a permis d'analyser la perte de vitesse progressive sur la base d'un découpage de la course en quatre séquences de 100 m. Ces études descriptives ont été réalisées, notamment par les entraîneurs sur les courses de leurs athlètes. Par ailleurs, des observations commanditées par l'IAAF sur les courses de haut niveau, préconisant des découpages 50m par 50m, et ceci pour l'ensemble des coureurs de la course, ont permis de préciser l'évolution de la vitesse. De plus ces études synoptiques ont été complétées quelque fois par la prise en compte des deux composantes de la vitesse, amplitude et fréquence de la foulée. Ces données ont été recueillies à partir de découpages 100m par 100m, réalisées sur des courses de niveau mondial et national (Belloc, 1990) ou régional (Nummela, 1991). Belloc (1990) note une diminution parallèle de l'amplitude et de la fréquence de la foulée. Par contre, Nummela (1991) observe une chute de 15% de vitesse de course, de 10% pour l'amplitude et de 5% pour la fréquence de la foulée.

L'ensemble de ces études ont permis de décrire selon la méthodologie utilisée (mode de découpage, prise en compte ou non des paramètres de la foulée) des évolutions plus ou moins précises de la vitesse de course et de ses composantes.

Il nous a semblé donc intéressant de mener une observation sur la course de 400m en sélectionnant les approches méthodologiques qui permettraient d'appréhender le plus finement possible, en compétition et sur l'ensemble de la course, différents paramètres mécaniques de la course (vitesse, fréquence et amplitude de la foulée). De plus, ces observations faites sur les coureurs de niveau différent (mondial, national et régional) et des deux sexes seront l'occasion de mieux caractériser la gestion de course de ces groupes, d'en déceler les différences éventuelles, et ainsi de mieux cerner les caractéristiques de la performance de haut niveau sur 400m.

METHODOLOGIE

1. La population.

Notre recherche s'appuie sur l'analyse de trois groupes d'athlètes de niveaux différents d'expertise : élite mondiale, élite nationale et groupe régional (tableau 1). Dans chacun de ces groupes, seront distingués un groupe féminin et un groupe masculin.

Les groupes représentant l'élite mondiale féminine et masculine sont observés au cours de la finale des championnats du monde d'athlétisme de 1999 (Séville). Les autres groupes hommes et femmes, représentant l'élite nationale et les groupes régionaux sont étudiés au cours du meeting national de Melun en 1999. Toutes les performances seront donc analysées lors d'une situation réelle de compétition.

Tableau 1 : Performances moyennes des 3 groupes de coureurs étudiés. (Les groupes ont été constitués afin d'obtenir des groupes homogènes mais néanmoins statistiquement différents).

Groupes	FEMMES	HOMMES
	Performance moyenne (sec)	Performance moyenne (sec)
Elite mondiale n = 5	49.97 ± 0.33	44.43 ± 0.16
Elite nationale n = 5	53.06 ± 0.5	46.83 ± 0.52
Groupe régional n = 5	55.33 ± 0.3	48.24 ± 0.31

2. Le protocole.

L'étude est réalisée à partir d'une analyse vidéo, deux types de méthodologie d'analyse sont utilisés.

2.1. Au cours des championnats du monde de 1999.

L'analyse est réalisée à partir des images vidéo de l'International Athletic Amateur Federation (IAAF).

Grâce à l'IAAF, nous disposons des temps de passage à chaque 50 mètres permettant ainsi le calcul de la *vitesse moyenne* pour chacune de ces tranches.

Le *nombre de foulées* est compté visuellement à partir du support vidéo. Ce nombre, par tranche de 50m, correspondant rarement à un nombre entier, il est donc nécessaire d'évaluer les pourcentages de la foulée répartis de part et d'autre des lignes de partage du tour du piste .

Exemple de calcul (fig. 1):

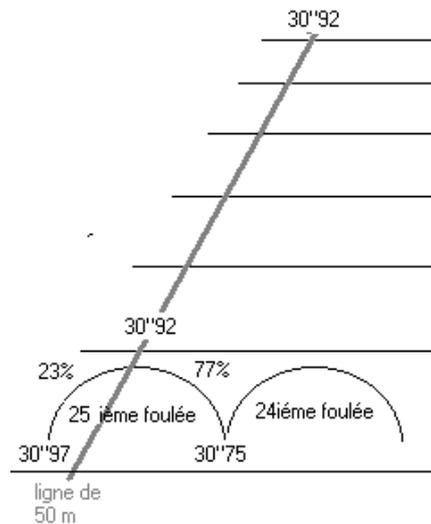
Sur un 50m, on compte 24 foulées entières (soit 24 pas), le 25^{ième} pas étant à cheval sur la ligne de partage.

Au 24^{ième} pas, le temps de passage est de 30.75 sec, au 25^{ième} il est de 30.97sec. : la durée totale du pas est donc : 30.97-30.75 = 0.22 sec.

Par ailleurs, le temps de passage sur la ligne de partage est de 30.92 sec (c. f. IAAF). Ainsi entre la fin du 24^{ième} pas et le temps de passage sur la ligne, s'écoule 0.17sec (30.92-30.75), soit 77% [(0.22/0.17)*100] de la durée totale du pas. Les 23% restant sont à prendre en compte dans la séquence de 50m suivante.

Le nombre total de pas correspond au nombre entier de pas repérés, auxquels sont ajoutés les pourcentages de pas calculés pour le début et la fin de chaque tronçon. L'amplitude moyenne du pas pour un 50m donné pourra être ainsi calculée. Enfin, la fréquence moyenne sera calculée à partir des données d'amplitude et de vitesse moyenne.

Figure 1 : Calcul des paramètres de la foulée (Séville)



2.2. Au cours du meeting de Melun.

La piste a été découpée par portion de 50 mètres sur toute la longueur de la piste de 400m (Figure 2). Au niveau de chaque ligne de partage, la piste a été graduée de part et d'autre sur une distance de 1.40m, à l'aide des bandelettes espacées de 20cm (Figure 3).

Figure 2 : Découpage de la piste et emplacement des caméras.

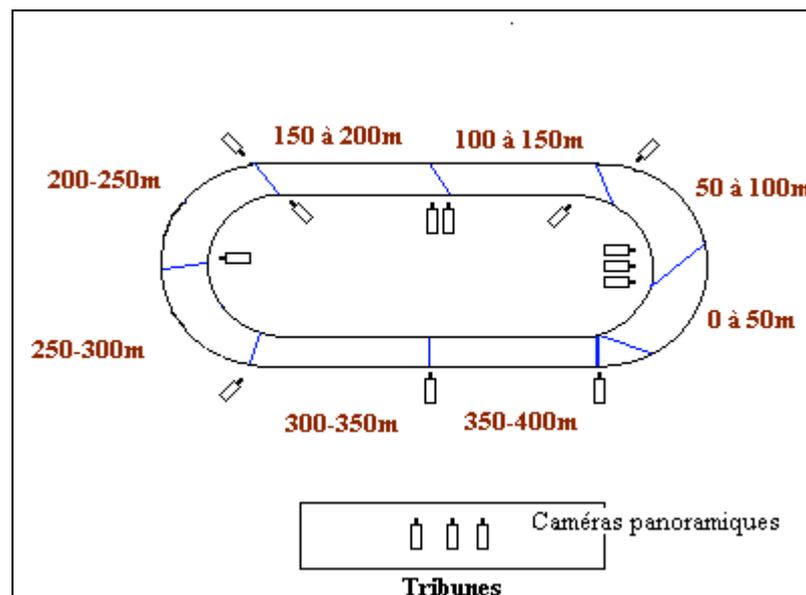
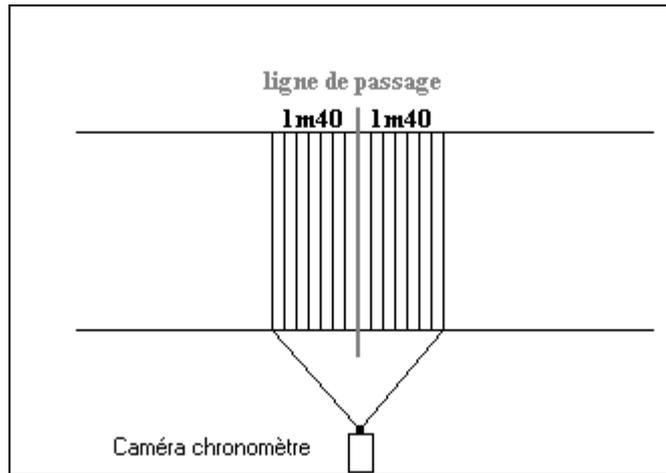


Figure 3 : Marquage de la piste et placement des caméras.

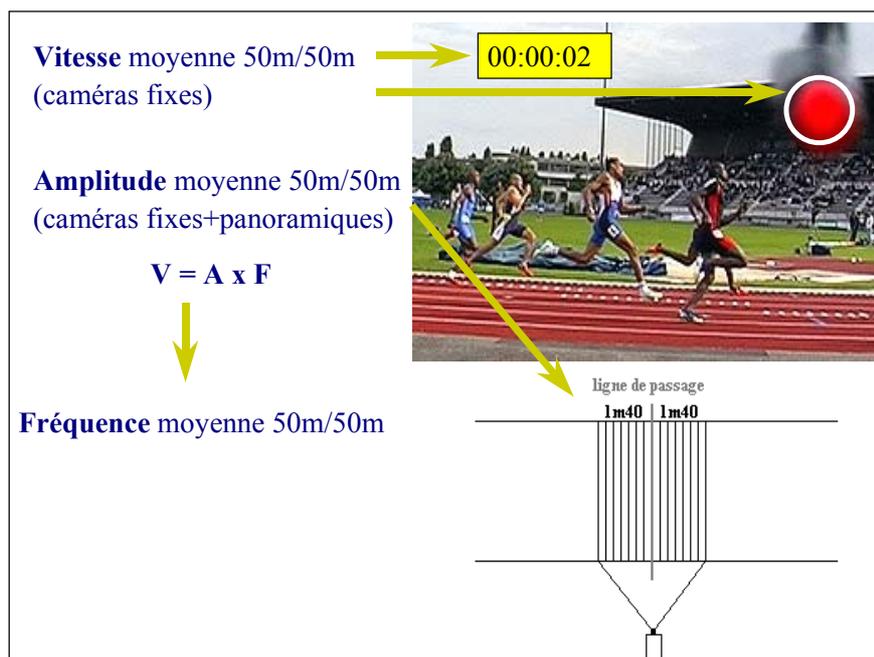


Trois caméras “panoramiques” (situées dans les tribunes cf. figure 2) ont permis de compter le *nombre de foulée* réalisées dans chaque séquence de 50m. L’une couvrait les couloirs 1, 2 et 3, l’autre les couloirs 4, 5 et 6, la dernière étant une caméra de secours, couvrait tous les couloirs.

Des caméras “chronomètres” sont disposées au plus près de l’axe de ces lignes de partage (figure 3). Un chronomètre au 100^{ième} est incrusté a posteriori dans l’image de chacune des caméras. On en déduit la durée de chacun des 50m ainsi que la *vitesse moyenne* correspondante. Leur format d’enregistrement permet de dédoubler la trame et d’obtenir une image toutes les 0.02sec (marge d’erreur : 0.01 sec sur la durée d’un 50m).

Il a été cependant nécessaire d’en utiliser un nombre plus ou moins important pour ces différentes lignes de partage en fonction de l’étendue du décalage entre les couloirs (figure 2). Toutes les caméras étaient synchronisées (voir descriptif technique en annexe).

Figure 4 : Récapitulatif des étapes de mesure des paramètres de la foulée.



L'*amplitude moyenne* (distance / nombre de foulée) a donc été calculée sur les tronçons de 50m (marge d'erreur : 2 x 5 cm).

Sachant que les foulées ne s'arrêtent pas nécessairement sur la ligne de passage, le calcul sera réalisé grâce à la graduation des bandelettes (ajout et retrait de distance en fonction des dépassements).

Sachant que la vitesse est égale au produit de l'amplitude par la fréquence, on peut calculer la *fréquence moyenne* dans l'intervalle (figure 4).

RESULTATS

Les résultats sont présentés successivement pour les deux populations étudiées : Femmes et Hommes. Ces résultats concernent les trois niveaux d'expertise (Mondiaux, Nationaux et Régionaux) et portent sur la vitesse de course, la fréquence et l'amplitude de la foulée.

1. LES FEMMES

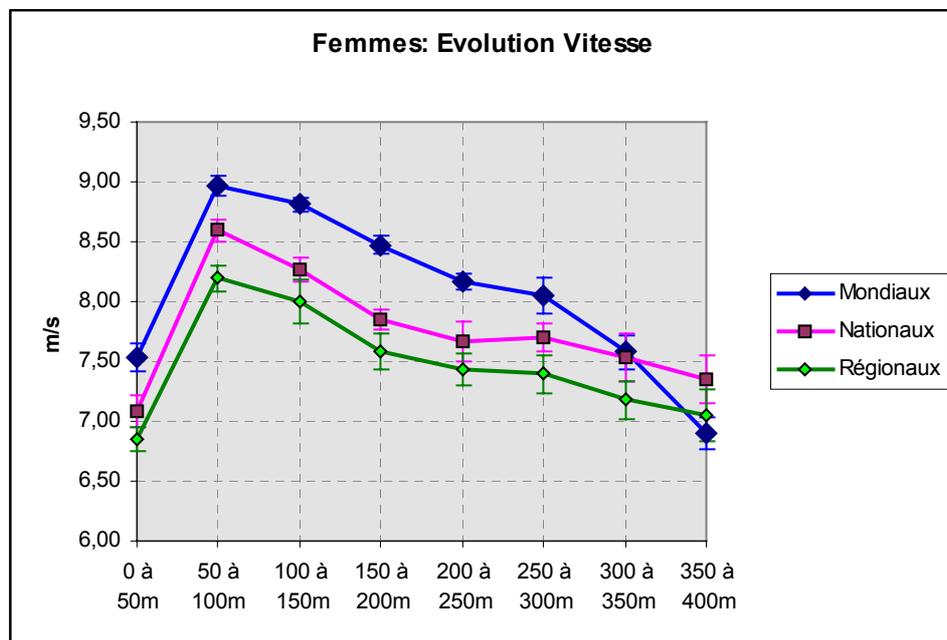
1.1. La vitesse :

La vitesse a été calculée à partir des temps de passage recueillis tous les 50m et est donc égale à la distance (50m) divisée par le temps mis pour parcourir l'intervalle. Elle représente la vitesse moyenne maintenue dans cet intervalle.

Tableau 2 : Vitesses moyennes ($m.s^{-1}$) pour chacun des groupes féminins aux différentes séquences de course.

	0 à 50m	50 à 100m	100 à 150m	150 à 200m	200 à 250m	250 à 300m	300 à 350m	350 à 400m
Mondiaux	7.53 ± 0.12	8.96 ± 0.08	8.81 ± 0.05	8.47 ± 0.07	8.17 ± 0.07	8.05 ± 0.15	7.58 ± 0.14	6.9 ± 0.14
Nationaux	7.08 ± 0.13	8.59 ± 0.09	8.26 ± 0.10	7.85 ± 0.09	7.67 ± 0.17	7.70 ± 0.12	7.53 ± 0.19	7.35 ± 0.2
Régionaux	6.84 ± 0.10	8.19 ± 0.10	7.99 ± 0.18	7.59 ± 0.15	7.43 ± 0.13	7.40 ± 0.15	7.18 ± 0.16	7.05 ± 0.22

Figure 5 : Evolution de la vitesse moyenne pour chacun des groupes féminins.



La vitesse maximale est atteinte après 50m de course et ceci pour les trois groupes. L'évolution de la vitesse, très proche des mondiaux aux régionaux, peut se décomposer en plusieurs phases: On remarque tout d'abord (figure 5), une phase d'accélération qui se termine à la fin du premier virage (50 à 100m). Commence ensuite une diminution progressive de la vitesse (du 100 au 300m) c'est à dire jusqu'à la fin du second virage. Enfin, on observe une grande décélération sur les 100 derniers mètres notamment chez les mondiaux.

Tableau 3: Comparaison des vitesses moyennes pour chacun des groupes aux différentes séquences de la course.

comparaison	0 à 50m	50 à 100m	100 à 150m	150 à 200m	200 à 250m	250 à 300m	300 à 350m	350 à 400m
M / N	*	*	*	*	*	*	NS	*
M / R	*	*	*	*	*	*	*	NS
N / R	*	*	*	*	*	*	*	*

Analyse de variance à un facteur (inter groupe) .

* : Différence significative au seuil $p < 0.05$; NS : Différence non significative au seuil $p < 0.05$.

M = Mondiaux, N = Nationaux , R = Régionaux

Tableau 4: Comparaison de l'évolution de la vitesse entre chacun des groupes.

comparaison	[0-50] à [50-100]	[50-100] à [100-150]	[100-150] à [150-200]	[150-200] à [200-250]	[200-250] à [250-300]	[250-300] à [300-350]	[300-350] à [350-400]
M / N	NS	*	NS	NS	NS	*	*
M / R	NS	NS	NS	NS	NS	*	*
N / R	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Analyse de variance à un facteur (inter groupe) .

* : Différence significative au seuil $p < 0.05$; NS : Différence non significative au seuil $p < 0.05$.

M = Mondiaux, N = Nationaux , R = Régionaux

On peut observer qu'il existe de grandes disparités entre les trois groupes pour les valeurs de vitesse quelle que soit la séquence considérée (tableau 3). Ces différences sont significatives en particulier dès le départ de la course dans la phase d'accélération ce qui conduit à observer des vitesses maximales atteintes significativement différentes entre les trois groupes (cf. tableau 4 colonne 0-50 à 50-100). Toutefois l'évolution de la vitesse après le pic de vitesse est identique entre les trois groupes jusqu'à l'entrée de la dernière ligne droite. Sur cette dernière ligne droite, on observe chez les mondiaux, une décélération brutale et significativement plus importante par rapport aux deux autres groupes.

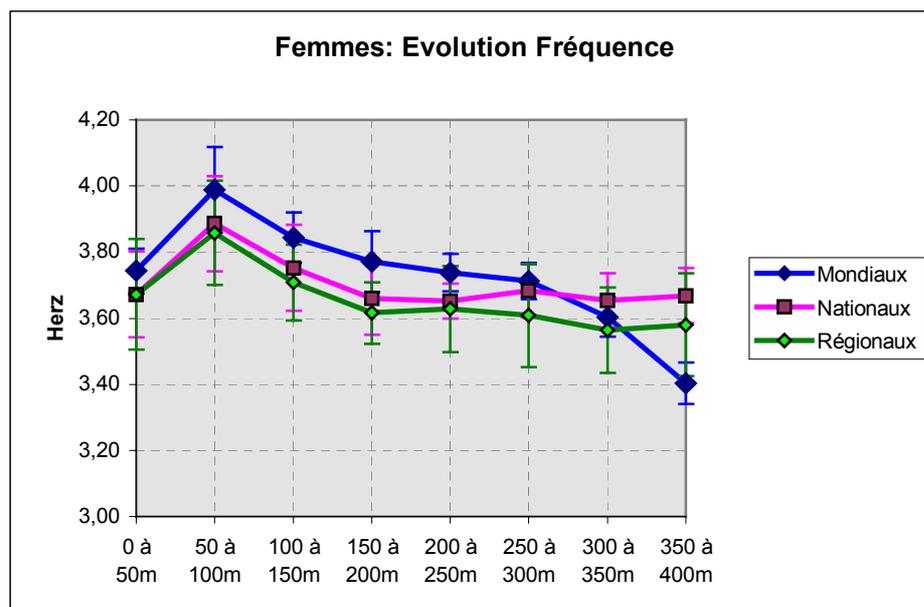
1.2 La fréquence de la foulée :

L'unité de mesure est exprimée en Hertz et elle correspond au nombre de pas par seconde effectués par le coureur.

Tableau 5 : Fréquence des pas observés aux différentes séquences de la course, pour les différents groupes.

	0 à 50m	50 à 100m	100 à 150m	150 à 200m	200 à 250m	250 à 300m	300 à 350m	350 à 400m
Mondiaux	3.74 ±0.07	3.99 ±0.13	3.84 ±0.08	3.77 ±0.09	3.74 ±0.06	3.71 ±0.05	3.6 ±0.06	3.4 ±0.06
Nationaux	3.67 ±0.13	3.89 ±0.14	3.75 ±0.13	3.66 ±0.11	3.65 ±0.05	3.68 ±0.08	3.65 ±0.08	3.67 ±0.08
Régionaux	3.67 ±0.17	3.86 ±0.16	3.71 ±0.11	3.62 ±0.09	3.63 ±0.13	3.61 ±0.16	3.56 ±0.13	3.58 ±0.16

Figure 6 : Evolution de la fréquence moyenne pour chacun des groupes féminins.



Pour les trois groupes, le pic de fréquence est atteint dans la zone du 50 au 100m, qui correspond également à la zone où se situe la vitesse maximale. Pour les « mondiales », la fréquence diminue ensuite jusqu'à la fin de la course en s'effondrant dans les 100 derniers mètres. A l'inverse, chez les nationales et les régionales, on observe à partir du 200m une certaine stabilisation, voire même une certaine augmentation de la fréquence.

Tableau 6: Comparaison des fréquences moyennes entre chacun des groupes aux différentes séquences .

	0 à 50m	50 à 100m	100 à 150m	150 à 200m	200 à 250m	250 à 300m	300 à 350m	350 à 400m
M / N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*
M / R	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	*
N / R	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Analyse de variance à un facteur (inter-groupe)

* : Différence significative au seuil $p < 0.05$; NS : Différence non significative au seuil $p < 0.0$

M = Mondiaux, N = Nationaux, R = Régionaux

Tableau 7: Comparaison de l'évolution de la fréquence moyenne entre chaque groupe

	[0-50] à [50-100]	[50-100] à [100-150]	[100-150] à [150-200]	[150-200] à [200-250]	[200-250] à [250-300]	[250-300] à [300-350]	[300-350] à [350-400]
M / N	NS	NS	NS	NS	*	*	*
M / R	NS	NS	NS	NS	NS	*	*
N / R	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Analyse de variance à un facteur (inter-groupe)

* : Différence significative au seuil $p < 0.05$; NS : Différence non significative au seuil $p < 0.0$

M = Mondiaux, N = Nationaux, R = Régionaux

Les valeurs de fréquence ne sont pas significativement différentes entre les groupes (tableau 6) notamment sur les 300 premiers mètres (même si les coureuses de niveau mondial présentent des fréquences de foulées systématiquement supérieures). Jusqu'aux 300m, l'évolution de fréquence est identique pour les trois groupes (tableau 7). Dans le dernier 100m, les coureuses de niveau mondial vont subir une chute de fréquence. Ceci aboutit à des fréquences de foulée significativement plus faibles par rapport aux deux autres groupes.

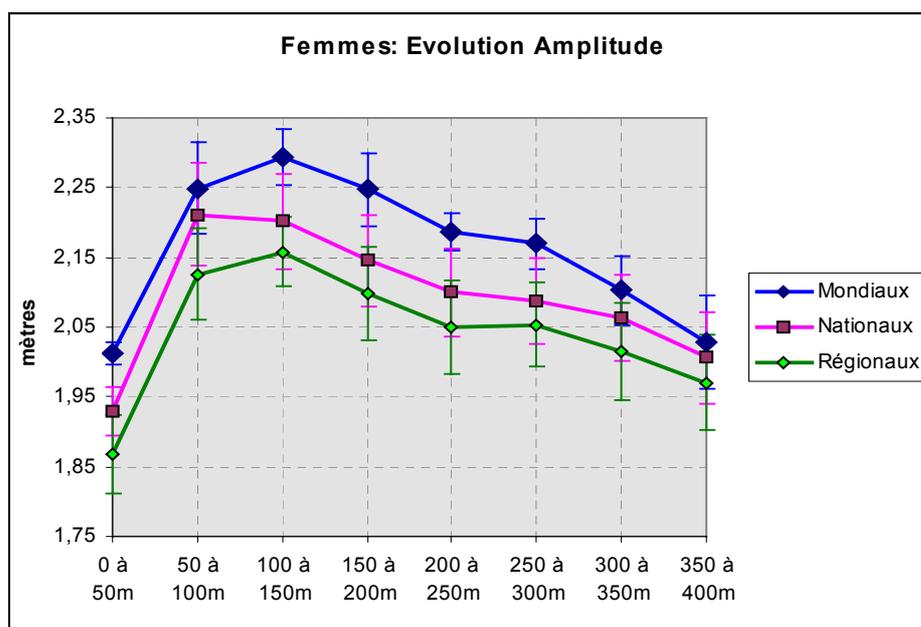
1.3 L'amplitude de la foulée :

L'unité de mesure est donnée en mètre et elle correspond à la longueur du pas effectué par le coureur (pointe du pied droit à la pointe du pied gauche).

Tableau 8 : Amplitude moyenne de la foulée pour chacun des groupes et aux différentes séquences de course.

	0 à 50m	50 à 100m	100 à 150m	150 à 200m	200 à 250m	250 à 300m	300 à 350m	350 à 400m
Mondiaux	2.01 ±0.02	2.25 ±0.07	2.29 ±0.04	2.25 ±0.05	2.19 ±0.03	2.17 ±0.04	2.1 ±0.05	2.03 ±0.07
Nationaux	1.93 ±0.04	2.21 ±0.07	2.20 ±0.07	2.13 ±0.07	2.10 ±0.06	2.09 ±0.06	2.06 ±0.06	2.01 ±0.07
Régionaux	1.87 ±0.06	2.13 ±0.07	2.16 ±0.05	2.10 ±0.07	2.05 ±0.07	2.05 ±0.06	2.02 ±0.07	1.97 ±0.07

Figure 7 : Evolution de l'amplitude moyenne pour chacun des groupes féminins.



Pour le groupe des « mondiales » et celui des « régionales », l'amplitude de la foulée passe par un pic situé dans la séquence du « 100 à 150m » (figure 7); ce pic est plus tardif par rapport à celui de la vitesse et de la fréquence de la foulée. Cependant nous ne constatons pas ce décalage pour le groupe « nationales », puisque leur pic de vitesse est atteint dans la zone de vitesse maximale.

Tableau 9: Comparaison des amplitudes moyennes pour chacun des groupes aux différentes séquences course.

	0 à 50m	50 à 100m	100 à 150m	150 à 200m	200 à 250m	250 à 300m	300 à 350m	350 à 400m
M / N	*	NS	*	*	*	*	NS	NS
M / R	*	*	*	*	*	*	*	NS
N / R	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

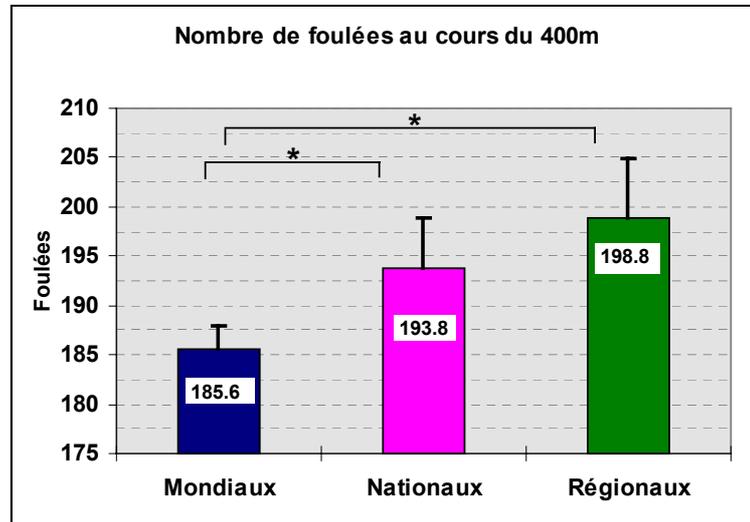
Analyse de variance à un facteur intergroupe.

* : Différence significative au seuil $p < 0.05$. NS : Différence non significative au seuil $p < 0.05$.

M = Mondiaux, N = Nationaux, R = Régionaux

Les valeurs d'amplitude de la foulée des « mondiales » sont nettement supérieures aux autres groupes hormis le dernier 100m où les écarts se resserrent au point de ne plus être significatifs (tableau 9). Cette différence de l'amplitude des foulées se traduit par un nombre total de foulées significativement inférieur (figure 8).

Figure 8 : Comparaison du nombre de foulées au cours du 400m pour chacun des groupes féminins.



Analyse de variance à 1 facteur . * : Différence significative au seuil $p < 0.05$.

Tableau 10: Comparaison de l'évolution de l'amplitude entre chacun des groupes.

	[0-50] à [50-100]	[50-100] à [100-150]	[100-150] à [150-200]	[150-200] à [200-250]	[200-250] à [250-300]	[250-300] à [300-350]	[300-350] à [350-400]
M / N	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS
M / R	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N / R	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Analyse de variance par mesure répétées à 2 facteurs (intra * intergroupe).

* : Différence significative au seuil $p < 0.05$. NS : Différence non significative au seuil $p < 0.05$.

M = Mondiaux, N = Nationaux , R = Régionaux

L'analyse statistique nous montre qu'il n'y a pas de différence significative dans l'évolution de l'amplitude de la foulée tout au long de la course.

2. LES HOMMES

2.1 La vitesse :

Pour les trois groupes, la vitesse maximale est atteinte après 100m de course (tableau 11). Le décours de la vitesse est quasiment le même pour les trois niveaux de performance et peut se décomposer en deux phases: une phase d'accélération jusqu'à la fin du premier virage (50-100m) et une phase de décélération en pente régulière jusqu'à l'arrivée (figure 9).

Tableau 11 : Vitesses moyennes pour chacun des groupes aux différentes séquences de course.

	0 à 50m	50 à 100m	100 à 150m	150 à 200m	200 à 250m	250 à 300m	300 à 350m	350 à 400m
Mondiaux	8.19 ± 0.11	10.12 ± 0.11	10.00 ± 0.10	9.66 ± 0.11	9.32 ± 0.10	9.05 ± 0.16	8.53 ± 0.05	7.75 ± 0.12
Nationaux	7.71 ± 0.22	9.80 ± 0.23	9.45 ± 0.18	9.18 ± 0.16	8.81 ± 0.12	8.50 ± 0.16	8.06 ± 0.30	7.45 ± 0.41
Régionaux	7.65 ± 0.09	9.37 ± 0.26	9.16 ± 0.11	8.83 ± 0.05	8.46 ± 0.10	8.15 ± 0.08	7.83 ± 0.10	7.35 ± 0.16

Figure 9 : Evolution de la vitesse moyenne pour chacun des groupes masculins.

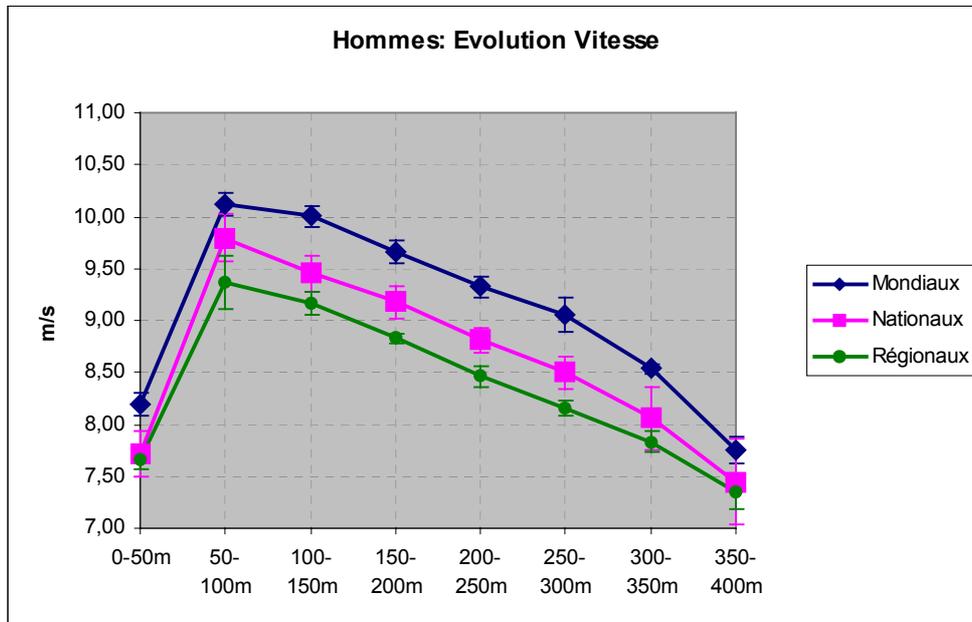


Tableau 12: Comparaison des vitesses moyennes entre chacun des groupes aux différentes séquences de course.

	0 à 50m	50 à 100m	100 à 150m	150 à 200m	200 à 250m	250 à 300m	300 à 350m	350 à 400m
M / N	*	*	*	*	*	*	*	NS
M / R	*	*	*	*	*	*	*	*
N / R	NS	*	*	*	*	*	NS	NS

Analyse de variance à un facteur intergroupe:

* : Différence significative au seuil $p < 0.05$. NS : Différence non significative au seuil $p < 0.05$.

M = Mondiaux, N = Nationaux, R = Régionaux

Les mondiaux se distinguent dès le départ par une vitesse supérieure par rapport aux deux autres groupes. Ces valeurs de vitesse restent statistiquement différentes pour les 3 groupes pratiquement tout au long de la course excepté lors de la dernière séquence, où seuls les régionaux montrent alors des valeurs de vitesse plus faibles que celles des mondiaux (tableau 12).

Tableau 13: Comparaison de l'évolution de l'amplitude pour chacun des groupes

	[0-50] à [50-100]	[50-100] à [100-150]	[100-150] à [150-200]	[150-200] à [200-250]	[200-250] à [250-300]	[250-300] à [300-350]	[300-350] à [350-400]
M / N	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS
M / R	NS	NS	NS	NS	NS	*	*
N / R	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Analyse de variance par mesure répétées (à 2 facteurs):

* : Différence significative au seuil $p < 0.05$. NS : Différence non significative au seuil $p < 0.05$

M = Mondiaux, N = Nationaux, R = Régionaux

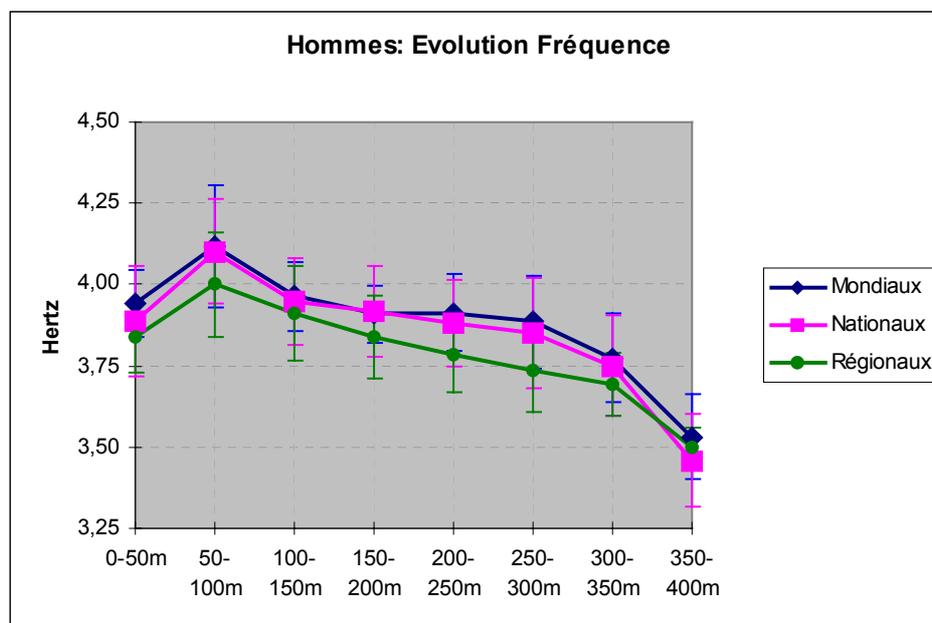
L'évolution de la vitesse (tableau 13) entre chaque séquence, présente le même décours pour les 3 groupes, avec cependant des différences significatives entre les régionaux et les mondiaux dans la dernière ligne droite.

2.2 La fréquence de la foulée :

Tableau 14 : Fréquence moyenne pour chacun des groupes aux différentes séquences de course.

	0 à 50m	50 à 100m	100 à 150m	150 à 200m	200 à 250m	250 à 300m	300 à 350m	350 à 400m
Mondiaux	3.94 ± 0.10	4.12 ± 0.19	3.96 ± 0.11	3.91 ± 0.09	3.91 ± 0.12	3.88 ± 0.14	3.77 ± 0.13	3.53 ± 0.13
Nationaux	3.89 ± 0.17	4.10 ± 0.16	3.95 ± 0.13	3.92 ± 0.14	3.88 ± 0.13	3.85 ± 0.17	3.75 ± 0.15	3.46 ± 0.14
Régionaux	3.84 ± 0.11	4.00 ± 0.16	3.91 ± 0.14	3.84 ± 0.13	3.78 ± 0.12	3.73 ± 0.13	3.69 ± 0.09	3.50 ± 0.06

Figure 10 : Evolution de la fréquence moyenne pour chacun des groupes masculins.



Pour les trois groupes, la fréquence maximale est atteinte dans la zone de vitesse maximale du 50m au 100m. Les décours de la fréquence sont très proches: un pic dans la deuxième moitié du premier virage (50-100m), une zone de stabilité allant de la deuxième moitié de la ligne droite opposée jusqu'à la sortie du deuxième virage, puis une chute progressive dans la ligne droite d'arrivée.

Aucune différence significative entre les groupes n'est détectée aussi bien en ce qui concerne les fréquences moyennes observées dans chacune des séquences (tableau 15) que dans l'évolution de ces fréquences entre ces séquences (tableau 16).

Tableau 15: Comparaison des fréquences moyennes entre chacun des groupes aux différentes séquences de course.

	0 à 50m	50 à 100m	100 à 150m	150 à 200m	200 à 250m	250 à 300m	300 à 350m	350 à 400m
M / N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
M / R	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N / R	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Analyse de variance à un facteur intergroupe:

* : Différence significative au seuil $p < 0.05$. NS : Différence non significative au seuil $p < 0.05$.

M = Mondiaux, N = Nationaux, R = Régionaux

Tableau 16: Comparaison de l'évolution de la fréquence pour chacun des groupes.

	[0-50] à [50-100]	[50-100] à [100-150]	[100-150] à [150-200]	[150-200] à [200-250]	[200-250] à [250-300]	[250-300] à [300-350]	[300-350] à [350-400]
M / N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
M / R	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N / R	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Analyse de variance par mesure répétées (à 2 facteurs):

* : Différence significative au seuil $p < 0.05$ NS : Différence non significative au seuil $p < 0.05$

M = Mondiaux, N = Nationaux, R = Régionaux

2.3 L'amplitude de la foulée :

L'ensemble des résultats (tableau 17 et figure 11) montre que pour les trois groupes, l'amplitude maximale est atteinte dans la zone 100-150m. Cependant les mondiaux se distinguent par un pic d'amplitude très supérieur (voir tableau 18). Pour tous les groupes, ce pic est suivi par une baisse régulière de l'amplitude jusqu'à la fin de la course.

Tableau 17 : Amplitudes moyennes entre chacun des groupes aux différentes séquences de course.

	0 à 50m	50 à 100m	100 à 150m	150 à 200m	200 à 250m	250 à 300m	300 à 350m	350 à 400m
Mondiaux	2.08 ± 0.06	2.46 ± 0.10	2.53 ± 0.08	2.47 ± 0.08	2.38 ± 0.07	2.33 ± 0.10	2.26 ± 0.08	2.20 ± 0.08
Nationaux	1.99 ± 0.06	2.39 ± 0.07	2.40 ± 0.06	2.35 ± 0.07	2.27 ± 0.09	2.21 ± 0.10	2.15 ± 0.10	2.16 ± 0.12
Régionaux	2.00 ± 0.06	2.34 ± 0.08	2.35 ± 0.08	2.30 ± 0.08	2.24 ± 0.09	2.19 ± 0.09	2.12 ± 0.07	2.10 ± 0.07

Figure 11 : Evolution de l'amplitude moyenne pour chacun des groupes masculins.

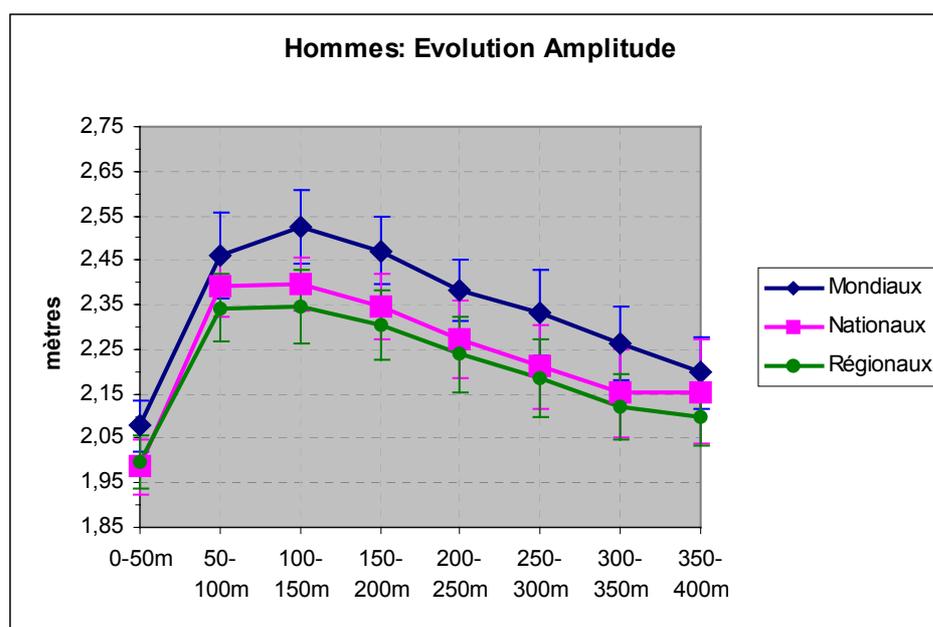


Tableau 18: Comparaison des amplitudes moyennes entre chacun des groupes aux différentes séquences de course.

	0 à 50m	50 à 100m	100 à 150m	150 à 200m	200 à 250m	250 à 300m	300 à 350m	350 à 400m
M / N	*	NS	*	*	*	NS	NS	NS
M / R	NS	*	*	*	*	*	*	NS
N / R	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Analyse de variance à un facteur intergroupe.

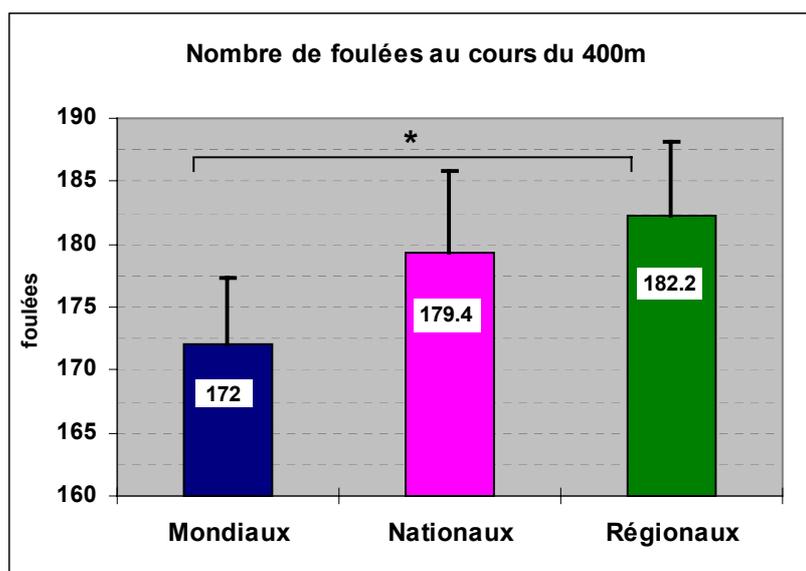
* : Différence significative au seuil $p < 0.05$. NS : Différence non significative au seuil $p < 0.05$.

M = Mondiaux, N = Nationaux, R = Régionaux

La plus grande amplitude de foulée observée pour les mondiaux par rapport aux autres groupes se situe dans la séquence 100-150m et est confirmée dans les séquences suivantes 100-200m et 200-250m. Cependant dans la fin de course, l'écart des amplitudes a tendance à diminuer entre les groupes pour ne plus être significatif dans la dernière séquence.

Cette plus grande amplitude de foulée observée de manière générale chez les mondiaux se traduit par un nombre total inférieur de foulées sur le tour de piste (figure 12).

Figure 12 : Nombre de foulées sur 400m entre chacun des groupes masculins (analyse variance à un facteur intergroupe)



* :Différence significative au seuil $p < 0.05$

Tableau 19: Comparaison de l'évolution de l'amplitude entre chacun des groupes.

	[0-50] à [50-100]	[50-100] à [100-150]	[100-150] à [150-200]	[150-200] à [200-250]	[200-250] à [250-300]	[250-300] à [300-350]	[300-350] à [350-400]
M / N	NS	*	NS	NS	NS	NS	*
M / R	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS
N / R	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Analyse de variance par mesure répétées (à 2 facteurs).

* : Différence significative au seuil $p < 0.05$. NS : Différence non significative au seuil $p < 0.05$

M = Mondiaux, N = Nationaux, R = Régionaux

Il faut noter une évolution de l'amplitude de la foulée particulière chez les mondiaux (tableau 19):

- Une augmentation de l'amplitude qui se poursuit dans la première moitié de la ligne droite opposée (100-150m) alors que les deux autres groupes stabilisent leurs amplitudes.
- Une chute de l'amplitude plus marquée en fin de course alors que les groupes nationaux et régionaux arrivent à préserver l'amplitude de leurs foulées

EN CONCLUSION :

A l'examen des résultats observés aussi bien sur les groupes hommes et femmes, il apparaît que les groupes mondiaux se distinguent par :

- Une plus grande vitesse maximale atteinte en début de course
- Une amplitude de foulée plus importante tout au long de la course
- Une dégradation notable de la foulée en fin de course qui se traduit en particulier par une chute de l'amplitude

DISCUSSION

1 - La vitesse :

Lorsque l'on examine les résultats de la littérature traitant de la vitesse maximale atteinte et de sa perte enregistrée lors du 400m (tableau 20), on se rend compte que le découpage des courses 50m par 50m donne des vitesses maximales supérieures à celles obtenues à partir du découpage plus grossier 100m par 100m. Ceci est observé quel que soit le niveau des performances analysées. Par exemple, si l'on considère les meilleures performances masculines, les courses étudiées 50/50m (Gajer, niveau mondial 1999, Kersting 1997) présentent toutes des chutes de vitesse supérieures à 20% alors que celles, analysées 100/100m (Brüggemann 1988, Belloc 1990), ont des chutes de vitesse entre 14 et 16%. Cette constatation se vérifie aussi pour le niveau inférieur. Nous pouvons observer une perte de vitesse de 21.5% pour la course découpée 50/50m (Gajer niveau régional), alors que la perte est de 18.8% pour les courses découpées 100/100m (Nummela 1992).

Si l'on considère les courses pratiquées au plus haut niveau, il se dégage donc 2 indices d'excellence de la vitesse maximale atteinte au cours d'un 400m de haut niveau selon le mode d'analyse de cette course :

- l'étude 50/50m indiquera un indice de $V \text{ max.} > 10 \text{ m.s}^{-1}$ chez les hommes et $V \text{ max.} > 8.8 \text{ m.s}^{-1}$ chez les femmes. Cet indice sera atteint dans le deuxième 50m (50-100m).
- l'étude 100/100m indiquera un indice de $V \text{ max.} > 9.6 \text{ m.s}^{-1}$ chez les hommes et $V \text{ max.} > 8.5 \text{ m.s}^{-1}$ chez les femmes. Cet indice sera atteint dans le deuxième 100m (100-200m).

On notera en ce qui concerne la différence de vitesse entre hommes et femmes que les résultats de notre étude confirment les observations antérieures de A.Mero (1985) et de G.Kersting à Athènes (1997): la différence se situe autour de 10%.

Tableau 20 : Vitesses maximales atteintes et perte de vitesse enregistrée au cours du 400m pour différentes études.

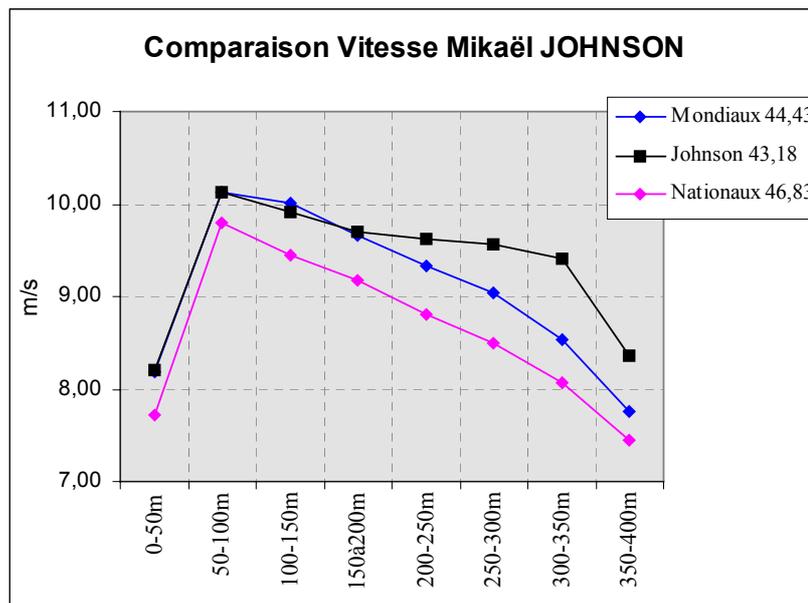
Etudes	Population	Découpage	Perf. moyenne 400m	Vitesse			
				maximale	Zone V max.	minimale	Perte
B. GAJER (Séville et Melun) 1999	<i>Hommes M</i>	50 /50 m	44,43 sec	10.12 m.s	50-100	7.75 m.s	- 23 %
	<i>Hommes N</i>	50 /50 m	46.83 sec	9.80 m.s	50-100	7.45 m.s	- 24 %
	<i>Hommes R</i>	50 /50 m	48.24 sec	9.37 m.s	50-100	7.35 m.s	- 21.5 %
	<i>Femmes M</i>	50 /50 m	49.98 sec	8.96 m.s	50-100	6.9 m.s	- 23 %
	<i>Femmes N</i>	50 /50 m	53.06 sec	8.59 m.s	50-100	7.35 m.s	- 15 %
	<i>Femmes R</i>	50 /50 m	55.33 sec	8.19 m.s	50-100	7.05 m.s	- 14 %
G. KERSTING (Athènes 97)	<i>Hommes</i>	50 /50 m	44.52 sec	10.03 m.s	50-100	7.97 m.s	- 20.5 %
	<i>Femmes</i>	50 /50 m	50.31 sec	8.97 m.s	100-150	6.88 m.s	- 23 %
P. SPRAGUE	<i>Hommes</i>	40 – 380m	?	9.51 m.s	40-50 m	7.53 m.s	- 21 %
G. BRÜGGEMANN (Séoul 88)	<i>Hommes</i>	100 /100m	44.51 sec	9.66 m.s	100-200	8.34 m.s	- 13.7 %
	<i>Femmes</i>	100 /100m	50.30 sec	8.62 m.s	100-200	7.13 m.s	- 17.3 %
(Rome 87)	<i>Hommes</i>	100 /100m		9.63 m.s	100-200	8.08 m.s	- 16 %
	<i>Femmes</i>	100 /100m		8.61 m.s	100-200	7.25 m.s	- 15.8 %
A. NUMMELA	<i>Hommes</i>	100 /100m	52.8 sec	7.85 m.s	100-200	6.37 m.s	-18.8 %
O. BELLOC	<i>Hommes</i>	100 /100m	45.16 sec	9.52 m .s	100-200	8.06 m.s	- 15.3 %

■ : Perte supérieure à 20%

La perte de vitesse n'est pas dépendante de l'expertise, les meilleurs subissent la même décélération que les autres mais ils restent à un niveau de vitesse supérieur tout au long de la course. Le coureur de 400m de haut niveau accélère dans le premier quart de la course, puis gère la perte de vitesse dans les 300m suivants. Cette description (un quart de la course pour atteindre la vitesse maximale et trois quarts suivants pour lutter contre la perte inexorable de vitesse) n'est pas sans rappeler la description de l'évolution de la vitesse au cours du 800m (B. Gajer et coll. 2000).

Néanmoins, on peut noter que lors de son record du monde (voir Annexe 2), Mikaël Johnson (M.J.) se distingue de l'ensemble des autres coureurs par une capacité à mieux maintenir une vitesse très élevée du 150 jusqu'au 350m. Il subit cependant dans les derniers 50m, une chute brutale de vitesse relativement plus importante (cf. figure 13).

Figure 13 : Comparaison de l'évolution de la vitesse au cours du 400m pour les groupes mondiaux et nationaux et la course record de M.J.



Dans notre étude, on ne distingue pas de différence dans l'évolution de la vitesse de course entre les 3 niveaux d'expertise (M,N,R). La seule différence significative est le niveau de vitesse maximale atteinte dans la zone 50-100m.

La valeur de cette vitesse maximale peut être dépendante de plusieurs facteurs :

- Des capacités physiques de l'athlète qui l'amènent à pouvoir atteindre des vitesses maximales très élevées, observables particulièrement lors des épreuves de sprint court (100 et 200m).
- Du choix d'une stratégie de course avec un départ rapide qui implique alors une prise de risque par rapport aux difficultés qui seront rencontrées en fin de course.

Pour connaître l'influence respective de ces deux facteurs sur la vitesse maximale atteinte par chacun des trois niveaux d'expertise, il a été choisi de se référer aux meilleures performances sur 200m de chacun des athlètes (cf. tableau 21) et d'exprimer leur temps de passage au 200m de la course de 400m par rapport à leur meilleure performance de l'année sur 200m (cf. figures 14 et 15).

Tableau 21 : Etude comparative entre performance sur 200m et temps de passage au 200m au cours du 400m.

	<i>Hommes</i>				<i>Femmes</i>			
	Rec 200	T pass 200	Ecart 200 rec	%200 rec	Rec 200	T pass 200	Ecart 200 rec	%200 rec
Mondiaux	20.72 ± 0.05	21.22 ± 0.08	0.51 ± 0.11	97.62 ± 0.51	22.98 ± 0.29	23.80 ± 0.18	0.87 ± 0.18	96.34 ± 0.75
Nationaux	21.09 ± 0.24	22.33 ± 0.42	1.24 ± 0.29	94.44 ± 1.21	24.29 ± 0.65	25.31 ± 0.17	1.09 ± 0.68	95.72 ± 2.66
Régionaux	21.59 ± 0.32	23.00 ± 0.25	1.41 ± 0.52	93.89 ± 2.18	24.63 ± 0.27	26.26 ± 0.25	1.64 ± 0.19	93.77 ± 0.73

	Rec 200	T pass 200	Ecart 200 rec	%200 rec
M. Johnson	19.93	21.22	1.29	93.92

Figure 14 : Relation performances 200m et 400m (femmes)

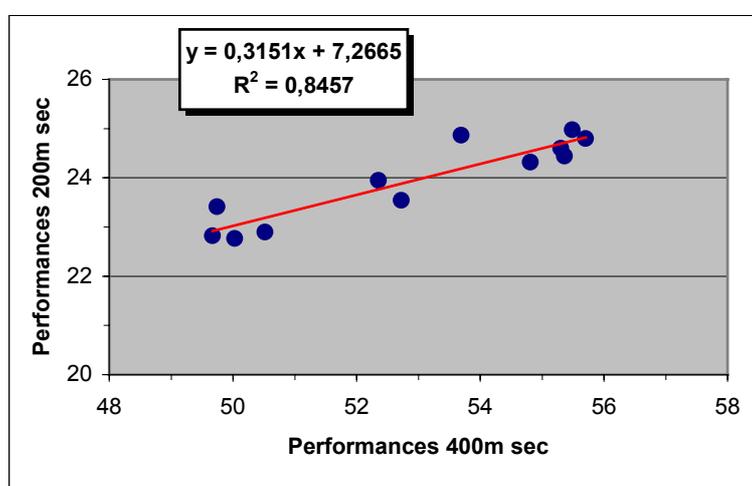
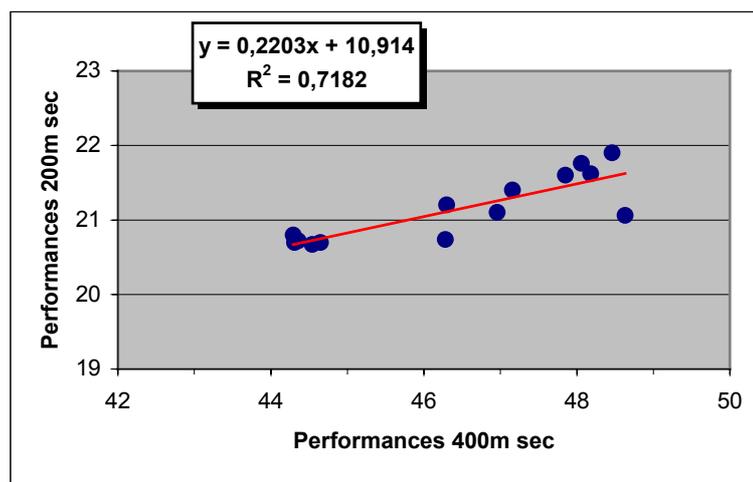


Figure 15 : Relation performances 200m et 400m (hommes)



Les figures 14 et 15 nous montrent bien qu'il existe une relation forte entre la performance sur 400m et celle sur 200m ($r^2 = 0.84$ pour les femmes et 0.71 pour les hommes). Il semble donc que les qualités physiques liées aux performances sur sprint court déterminent directement la performance sur 400m : plus le record de l'athlète en sprint court est élevé, meilleure sera la performance sur 400m.

Toutefois, l'écart entre le temps de passage du 200m et la meilleure performance sur cette même distance se réduit plus le niveau de performance augmente (il est chez les hommes de 1.41 sec pour les régionaux pour tomber à 0.51 sec pour les mondiaux ; il est chez les femmes de 1.64 sec pour les régionales et de 0.87 pour les mondiales cf. tableau 21 écart 200 rec). On peut donc en déduire que les mondiaux s'engagent plus dans la première partie de course : ils utilisent un plus fort pourcentage de leur vitesse maximale pour passer au 200m. (cf. figure 16). Pour réussir une grande performance, il faudrait donc partir relativement vite.

400m HOMMES

Figure 16 : Temps de passage au 200m en sec. au cours du 400m

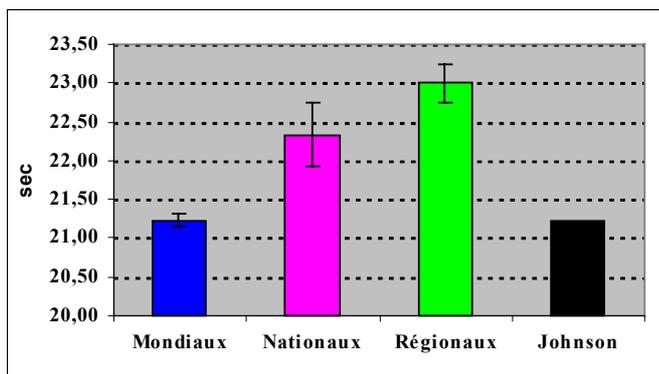
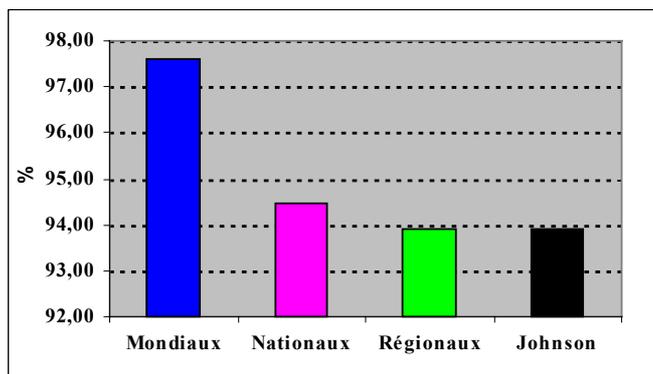


Figure 17 : Temps de passage au 200m en % de la performance maximale sur 400m



400m FEMMES

Figure 18 : Temps de passage au 200m en sec. au cours du 400m

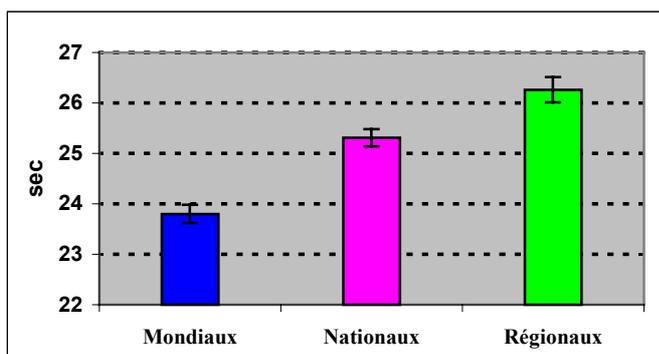
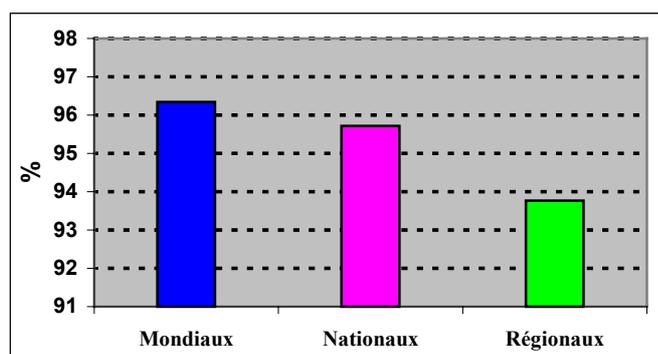


Figure 19 : Temps de passage au 200m en % de la performance maximale sur 400m



Cependant, cette règle qui semble générale n'est pas une nouvelle fois vérifiée pour la course de M.J. lors de son record du monde. En effet, lors de cette course dont nous avons déjà relevé ces particularités, M.J. passe dans le même temps de passage que ses adversaires mais il n'a utilisé alors que 93.9% de sa vitesse maximale (cf. tableau 21 et figure 17). Ce moindre engagement dans la première moitié de course lui permet sans doute d'être capable de maintenir plus longtemps que les autres une vitesse élevée (cf. figure 13). On observe donc qu'il utilise la même stratégie que les régionaux sur les premiers 200m. Toutefois les régionaux, dans la deuxième partie de la course, ne tireront pas de ce départ prudent les mêmes avantages que MJ. Présentant moins de qualités physiques, spécifiques au 400m, ils ne pourront enrayer la perte de vitesse du 150m au 300m (cf. figure 9).

On peut se demander si M.J. n'aurait pas amélioré plus largement le record du monde s'il avait adopté la stratégie communément observée pour le niveau mondial. Cela l'aurait conduit en 20.41 sec au 200m pour un temps à l'arrivée de 42.80 sec (cette prédiction est calculée à partir des valeurs moyennes observées chez les mondiaux, soit: $performance\ finale = 2 * temps\ de\ passage\ 200m + 1.98\ sec$).

2 – Les composantes de la foulée : [Fréquence * Amplitude]

L'étude de l'évolution des composantes de la foulée (fréquence, amplitude) a fait l'objet de nombreuses études (cf. tableau 22) qui s'accordent toutes à décrire une plus ou moins lente décroissance de la valeur de ces paramètres après avoir atteint leur valeurs maximales. Toutefois les valeurs de ces paramètres, et en particulier leurs évolutions, diffèrent quelque peu selon les auteurs. Ces discordances tiennent sans doute, comme cela a déjà été noté dans le cas de l'analyse de la vitesse, au mode de découpage retenu pour l'étude de ces courses. En effet, les découpages par séquence de 100 ou 200m lissent l'amplitude des variations dont la durée est bien inférieure à la durée de la séquence d'étude choisie. Ainsi le protocole retenu 50/50m nous amène à observer des différences plus importantes entre les données maximales et minimales observées. Remarquons que toutes les pertes supérieures à 10% ont été mises en évidence uniquement dans le cas de découpage 50/50m

Tableau 22 : Paramètres de la foulée en début de course et fin de course à travers différentes études.

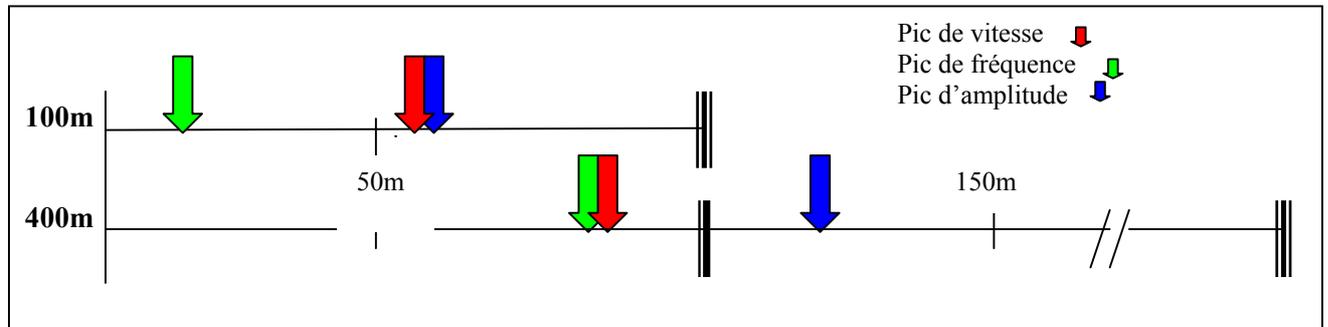
Etudes	Pop.	Découpage	Perf. 400m	Fréquence (Hertz)			Amplitude (m)		
				maximale	fin de course	Perte	maximale	fin de course	Perte
B. GAJER (Séville et Melun) 1999	H. M.	50 /50 m	44.43 sec	4.12 hertz	3.53 hertz	- 14 %	2.53 m	2.20 m	- 13%
	H. N.	50 /50 m	46.83 sec	4.10 hertz	3.46 hertz	- 15 %	2.40 m	2.16 m	- 10%
	H. R.	50 /50 m	48.24 sec	4.00 hertz	3.50 hertz	- 12.5 %	2.35 m	2.10 m	- 10.5%
	F. M.	50 /50 m	49.98 sec	3.99 hertz	3.4 hertz	- 15 %	2.29 m	2.03 m	- 11.5%
	F.N.	50 /50 m	53.06 sec	3.89 hertz	3.67 hertz	- 5.5 %	2.21 m	2.01 m	- 9%
	F. R.	50 /50 m	55.33 sec	3.86 hertz	3.58 hertz	- 7 %	2.16 m	1.97 m	- 9%
B.T. BATES	F.	170– 370m	53.8 sec	3.74 hertz	3.60 hertz	- 4 %	1.98 m	1.87 m	- 6 %
P. SPRAGUE	H.	40 – 380m	?	4.18 hertz	3.52 hertz	- 16 %	2.28 m	2.14 m	- 6 %
F. URTEBISE (Atlanta 96)	M. J.	200 /200m	43.49 sec	4.19 hertz	4.27 hertz	+ 2 %	2.25 m	2.18 m	- 3%
	Pérec	200 /200m	48.25 sec	3.6 hertz	3.46 hertz	- 4 %	2.38 m	2.31 m	- 3%
A. NUMMEL A	H.	100 /100m	52.8 sec	3.48 hertz	3.22 hertz	- 7.5 %	2.25 m	2.03 m	- 10%
O. BELLOC	H.	100 /100m	45.16 sec	3.95 hertz	3.65 hertz	- 7.5 %	2.34 m	2.22 m	- 5%

■ : Variation supérieure à 10%

Notre étude de l'évolution des composantes de la foulée au cours du 400m montre que l'augmentation de vitesse est obtenue par une augmentation de l'amplitude et de la fréquence, comme cela a pu être observé au cours d'étude sur le 100m (B. Gajer et C.Thépaut-Mathieu 1999). En revanche, sur 400m, la fréquence maximale est atteinte plus tardivement (après le premier 50m alors que sur 100m, elle apparaît avant les 30m).

Plus précisément, au cours du 400m, la fréquence est maximale dans la deuxième partie du premier virage où par ailleurs l'athlète atteint alors sa vitesse de course maximale. L'amplitude quant à elle continue d'augmenter après la sortie du virage où elle présente une valeur maximale (cf. figure 20).

Figure 20 : Chronologie d'apparition des pics de vitesse d'amplitude et de fréquence pour le 100m et le 400m.



Il existe donc une évolution particulière de la fréquence et de l'amplitude pour chacune de ces deux courses. On peut supposer que ces particularités proviendraient des contraintes de la course en virage rencontrées dans le 400m. En effet entre chaque appui, quelle que soit la trajectoire de la course, le centre de gravité se déplace par segments linéaires. En virage donc, le déplacement du centre de gravité devient tangent à la courbe de la piste. Le coureur aura alors à produire sur chaque appui des impulsions centripètes qui lui permettront de respecter la géométrie de la trajectoire. Un surcroît de contraintes va donc s'ajouter aux impulsions verticales et horizontales..

Il semble donc qu'après avoir vaincu l'inertie et accélérer dans un premier temps (0-50m) grâce à l'augmentation de l'amplitude et de la fréquence, les forces centripètes que l'on doit appliquer, obligent le coureur à contenir l'amplitude de sa foulée particulièrement dans la zone 50-100m (zone de vitesse maximale). C'est pourquoi, afin d'épouser au mieux la forme de la courbe, le coureur utilisera l'augmentation de sa fréquence pour finir son accélération dans le deuxième 50m.

Après avoir atteint son pic de vitesse dans la deuxième moitié du virage, la fréquence diminue dans la première ligne droite. On peut supposer que le coureur cherche alors un compromis entre le maintien de sa vitesse et une organisation économique de sa foulée. Il va donc diminuer sa cadence et allonger sa foulée qui était contenue dans la course en courbe.

Toutefois, à partir du 200m, le coureur va rencontrer une nouvelle fois les contraintes mécaniques liées à la course en virage. Ainsi il serait logique d'observer entre la fin de la première ligne droite et la séquence de course suivante en courbe :

- Une augmentation de la fréquence des foulées permettant de négocier le virage
- Une baisse consécutive de l'amplitude des foulées.

En réalité, les observations ne concordent pas avec les résultats attendus : il est noté soit une baisse de la fréquence des foulées (hommes tout niveau et femmes niveau mondial), soit une stabilité (femmes, niveau national et régional). Cette baisse ou stabilité de la fréquence est par ailleurs concomitante d'une diminution de l'amplitude de la foulée. Ceci se traduit par une chute de vitesse observée dès la première moitié du deuxième virage (0.5 à 0.6 m.s⁻¹ pour les hommes et 0.2 à 0.3 m.s⁻¹ pour les femmes) par rapport à celle encore maintenue avant ce virage.

Notons que le coureur a dépassé les 200m de course parcourus à vitesse quasi maximale pour lesquels le métabolisme anaérobie lactique est le principal producteur d'énergie (Astrand 1900). La forte implication du métabolisme anaérobie lactique sur cette partie de la course a été relevée par Klapeinska et coll (2001) qui observent qu'après 300m de sprint des concentrations de lactate sanguin de l'ordre de 15 mmol.l⁻¹. De telles concentrations détériorent les capacités fonctionnelles du muscle et induisent indirectement l'apparition de la fatigue.

Dans ce contexte, il devient très difficile pour le coureur de s'adapter aux contraintes de la course en courbe. En effet dans la deuxième moitié du premier virage, le coureur était capable d'augmenter sa fréquence pour atteindre sa vitesse maximale. L'amplitude de sa foulée était alors contenue. Par contre dans le deuxième virage, la fatigue entraîne à la fois une impossibilité d'augmenter la fréquence de sa foulée et une diminution de son amplitude. Le coureur subira donc une perte significative de sa vitesse de course .

A la sortie du deuxième virage, dans la dernière ligne droite, la fatigue ne cessera de s'amplifier jusqu'à la ligne d'arrivée. Ce processus a été objectivé dans un contexte de course de haut niveau par des mesures de valeurs extrêmes de la lactatémie en fin d'épreuve (20 mm.l⁻¹, Bouvat 1988).

Dans les derniers 50m, qui correspondent à la phase la plus aiguë de fatigue, les deux composantes de la vitesse diminuent spécifiquement (cf. tableau 23):

- L'amplitude des foulées n'est plus significativement discriminante entre les groupes, les mondiaux ayant subi une diminution plus importante de leurs foulées. On peut en déduire que, dans notre étude, les plus rapides sont les plus touchés dans l'amplitude de leurs foulées et sont sans doute les plus fatigués.

- La fréquence, selon nos résultats, chute relativement plus que l'amplitude pour quatre groupes sur six ; cette chute reste indépendante du niveau d'expertise, en particulier chez les hommes.

Tableau 23 : Perte de vitesse amplitude et fréquence dans les 2 portions de 50m de la dernière ligne droite du 400m, pour chacun des groupes

		(250-300m) v (300-350m)			(300-350m) v (350-400m)		
		Vitesse	Amplitude	Fréquence	Vitesse	Amplitude	Fréquence
Hommes	Mondiaux	-5.75 %	-3 %	-2.8 %	-9.1 %	-2.6 %	-6.4 %
	Nationaux	-5.2 %	-2.7 %	-2.6 %	-7.6 %	+0.4 %	-7.8 %
	Régionaux	-3.9 %	-3.2 %	-1.1 %	-6.1 %	-0.9 %	-5.1 %
Femmes	Mondiaux	-5.84 %	-3.22 %	-2.96 %	-8.97 %	-3.33 %	-5.55 %
	Nationaux	-2.2 %	-1.43 %	-0.81 %	-2.39 %	-2.43 %	+0.55 %
	Régionaux	-2.97 %	-1.46 %	-1.38 %	-1.81 %	-2.47 %	+0.56 %

■ : Pertes supérieures à 5 %

Sur l'ensemble du 400m et au vu de nos résultats statistiques, les valeurs de fréquence ne permettent pas de différencier les différents niveaux d'expertise (mondiaux, nationaux et régionaux). Elles ne sont donc pas significativement différentes entre les niveaux durant toute la course chez les hommes et jusqu'au 300m chez les femmes. Par contre, l'amplitude des foulées est, quant à elle, incontournable pour caractériser les trois niveaux d'expertise. Ainsi le nombre de foulées sur l'ensemble de la course (cf. figures 8 et 12) et les valeurs d'amplitude maximale (cf. tableau 9 et 18) montrent des différences significatives. Notons les faibles écarts de taille entre chacun des groupes étudiés qui indiqueraient que la gestion de l'amplitude est indépendante des différences morphologiques (cf. tableau 24).

Tableau 24 : Taille et amplitude maximale de foulée pour chacun des groupes.

	Hommes		Femmes	
	Taille	Amplitude max.	Taille	Amplitude max.
Mondiaux	1.84 m \pm 0.06	2.53 m	1.70 m \pm 0.04	2.29 m
Nationaux	1.85 m \pm 0.05	2.40 m	1.70 m \pm 0.05	2.21 m
Régionaux	1.81 m \pm 0.05	2.35 m	1.67 m \pm 0.05	2.16 m

Ces relations entre niveau d'expertise et amplitude maximale de la foulée sont similaires des observations effectuées au cours de l'analyse du 100m (Gajer Thépaut-Mathieu 1999). L'hypothèse alors avancée pour expliquer la différence d'amplitude reste encore envisageable : les forces appliquées sur le sol seraient moindres chez les coureurs nationaux et régionaux et traduiraient une puissance musculaire plus faible que les mondiaux.

3 - Comparaison hommes et femmes :

On peut noter une tendance à trouver des fréquences de foulée légèrement plus faible chez les féminines, ce qui ne concorde pas tout à fait avec les résultats de Méro et Luthanen (1998) qui trouvaient des fréquences très proches entre hommes et femmes, avec une tendance de fréquences supérieures chez les féminines.

Les écarts d'amplitude maximale entre les hommes et les femmes sont de l'ordre de 8.5% ce qui est légèrement inférieur au 11% d'écart observés par Mero et Luhtanen (1985).

CONCLUSION

Cette étude montre l'intérêt du découpage de la course en séquence courte (50m) par rapport à un découpage plus long (100m) habituellement utilisé. Cette méthodologie permet de préciser l'évolution de la vitesse. D'autre part la mesure de l'amplitude et de la fréquence de la foulée tout au long du 400m (et non seulement au début et à la fin de la course) permet d'analyser plus finement l'évolution des effets de la fatigue sur ces paramètres mécaniques.

En effet, la performance sur 400m implique nécessairement une tactique de gestion de l'effort par rapport aux capacités maximales de vitesse, notamment dans la première moitié de la course. De plus, dans cette partie, la maîtrise technique de course est indispensable pour gérer les contraintes mécaniques d'une accélération en courbe lors du départ

Par ailleurs, l'apparition de la fatigue dégradant les capacités contractiles du muscle à partir du deuxième virage, il devient indispensable pour le coureur de faire appel à des capacités de force et de technique pour conserver une foulée efficace. Cette dernière est caractérisée par une plus grande amplitude de foulée tout au long de la course.

C'est donc une épreuve complexe à maîtriser pour le coureur. Néanmoins cette « photographie » de l'épreuve de 400m met en évidence les contraintes mécaniques et physiologiques successivement rencontrées sur le tour de piste, contraintes qui devront nécessairement être prises en compte dans l'élaboration des contenus d'entraînement.

BIBLIOGRAPHIE

BATES, B.T., B.H. HAVEN.(1974) Effect of fatigue on the mechanical characteristics of highly skilled female runners. In : *Biomechanics IV*, R.C. Nelson and A. Morehouse (eds.). Baltimore : University Park Press, , pp. 121-125.

BELLOC, O. (1990). 400 Haies : les enseignement du 400m plat. *Publications INSEP collection entraînement* 83pp.

BRÜGGEMANN, G.-P., D. KOSZEWSKI, H. MÜLLER (1999). Biomechanics Research Project Athens 1997. Scientific bulletin 400m sprint. *IAAF foundation book Meyer&meyer sport 2.1* :54-62.

GAJER, B., THEPAUT-MATHIEU C. Evolution of stride and amplitude during course of the 100 m event during course of the 100m event in athletics. *New studies in athletics* (IAAF) 14 : 43-50.

GAJER , B., C. HANON, J. MARAJO, J-C. VOLLMER (2000). Le 800 mètres, Analyse descriptive et entraînement. *Publications INSEP collection entraînement* 95 pp.

GAJER B.(1995). Evolution de la foulée au cours du 800m.
Mémoire pour le diplôme de l'institut national du sport et de l'éducation physique.

HIRVONEN, J., A. NUMMELA (1992). Fatigue and changes of ATP, créatine phosphate and Lactate during 400m sprint. *Can. J. Sport Sci.* 17 :141-144.

MERO, A., P. LUHTANEN (1998). Kinematics of top sprint (400m) running in fatigued conditions. *Track Field Q. Rev.* 1 :42-45.

NUMMELA, A., T. VUORIMAA, H. RUSKO (1992). Changes in force production, blood lactate and EMG activity in the 400m sprint *J. Sport Sci.* 107 :217-228.

SPRAGUE, P. and R. V. MANN (1983). The effects of muscular fatigue on the kinetics of sprint running. *Res. Q. Exerc. Sport* 54 :60-66.

Scientific Report on the II World Championships in Athletics – Rome 1987 (2nd edition)

Scientific Research Project at the Games of the XXIVth Olympiad – Seoul

URTEBISE, F. Atlanta (1996) : 400m *Revue AEFA* n°143 :11.

Biomechanical analysis of throwing and sprint events in the World Championships Sevilla99"
CD Room IAAF

ANNEXES

Annexe 1 (1/4)

Dispositif technique pour la synchronisation des caméras.

Description générale

Le système technique mis en place doit permettre de donner à chaque caméra, disposée autour de la piste, l'information temporelle du départ. Cette information se traduit par un allumage d'une LED dans le champ de chaque caméra. L'analyse cinématique des athlètes qui se fait à partir de l'enregistrement des bandes vidéo pourra ainsi être datée par rapport à une origine temporelle, le départ de la course.

Le système devait répondre aux contraintes suivantes :

- Permettre de transmettre le signal de départ avec un temps de transmission inférieur à 20 millisecondes (durée entre deux frames du signal vidéo);
- Transmettre le signal dans un rayon de 150 mètres (distance maximale à parcourir entre le départ et la caméra la plus éloignée);
- Etre d'un faible coût de fabrication ;
- Etre facile à installer.

Pour une mise en œuvre facile nous ne pouvions pas utiliser de liaison filaire pour acheminer le signal de départ aux différentes caméras. Nous avons donc utilisé une transmission du signal par liaison haute fréquence. Nous avons pour cela réalisé un émetteur haute fréquence et 20 récepteurs pour acheminer le signal à chacune des 20 caméras présentes autour de la piste d'athlétisme

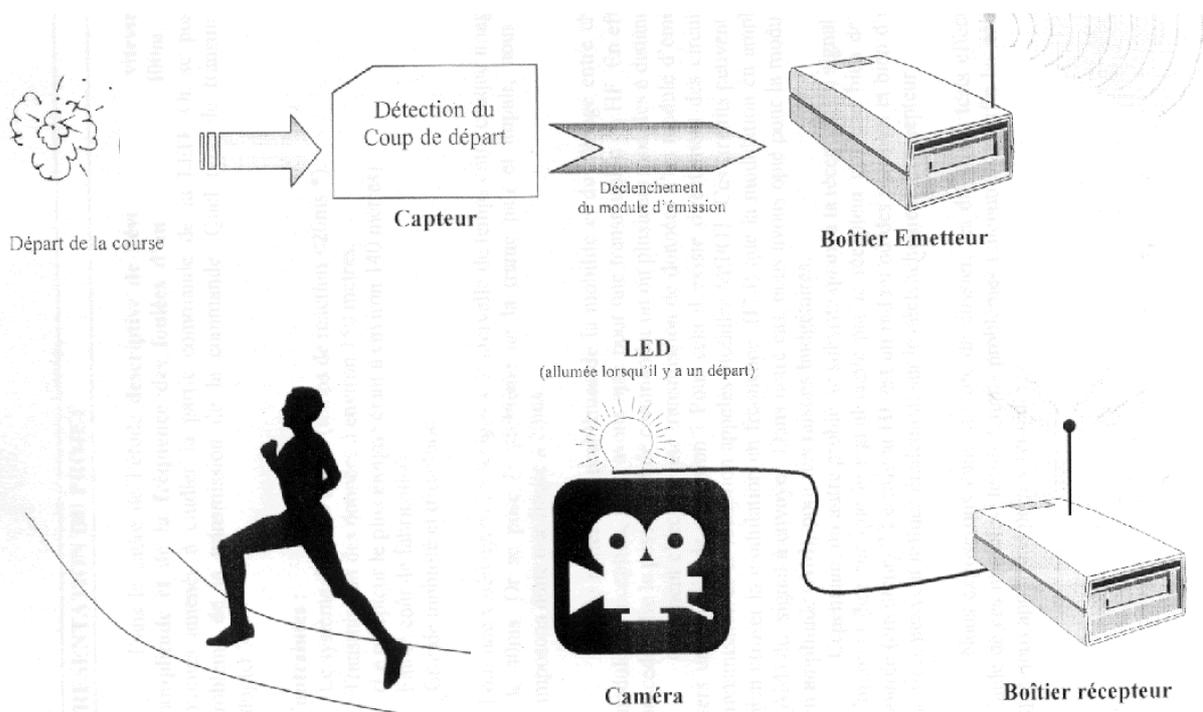


Schéma synoptique du système.

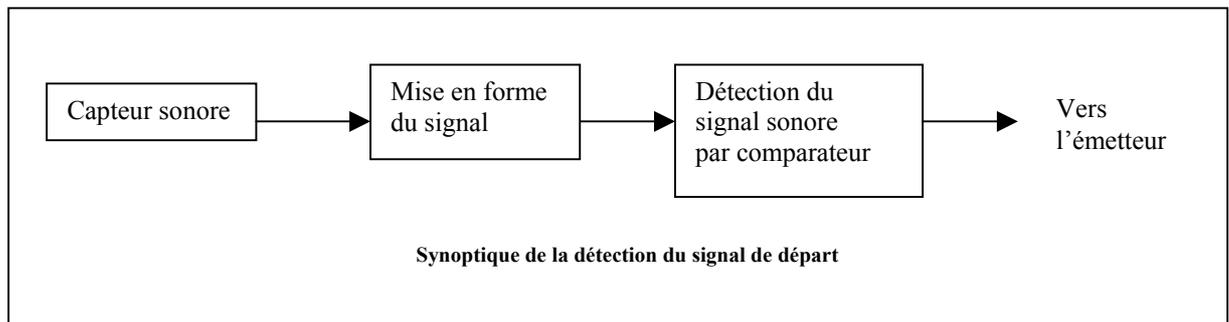
Pour limiter le coût du dispositif nous avons choisi des modules HF MIPOT à modulation d'amplitude. Ces modules ont une portée maximale de 100 mètres en terrain dégagé mais ont l'avantage d'être d'un faible coût.

Annexe 1 (2/4)

Pour limiter le coût du dispositif nous avons choisi des modules HF MIPOT à modulation d'amplitude. Ces modules ont une portée maximale de 100 mètres en terrain dégagé mais ont l'avantage d'être d'un faible coût. Le système fonctionne de la façon suivante. Au départ de la course, le bruit généré par le coup de pistolet déclenche un signal qui est retransmis par liaison haute fréquence à tous les récepteurs. Nous avons un récepteur par caméra, la réception du signal de départ est transformé en un signal visuel. Le signal visuel correspond à l'allumage d'une LED rouge qui est disposé dans le champ de la caméra.

Détection du signal de départ.

On utilise un microphone pour détecter le signal de départ. Le microphone est attaché au pistolet du starter. Au coup de canon du départ, le signal sonore est transformé en signal électrique et est envoyé à l'émetteur.

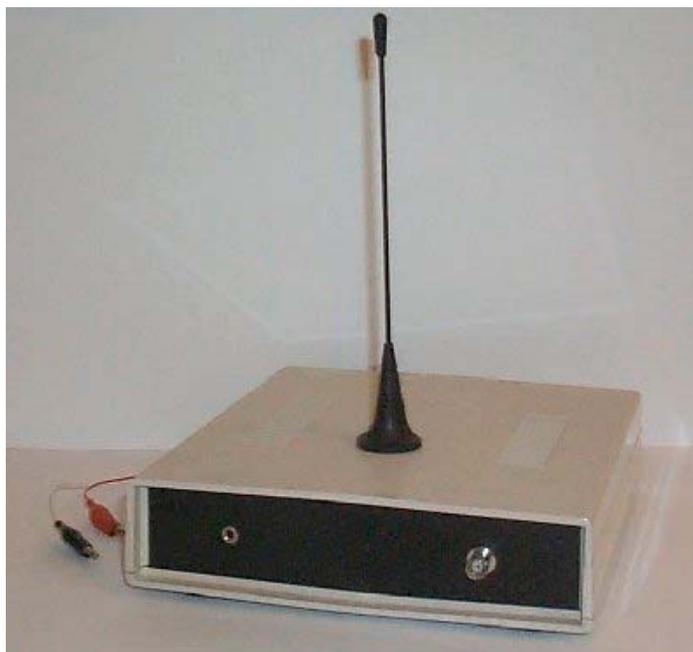
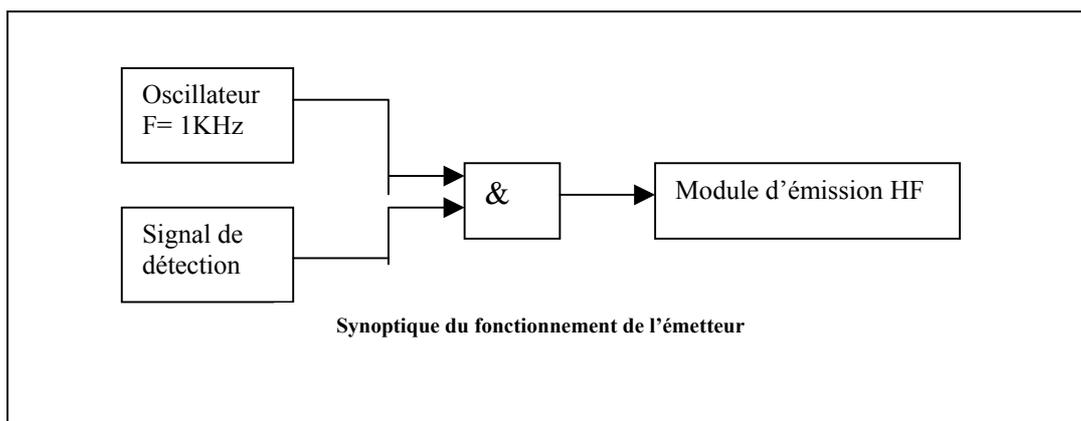


Le capteur positionné sur une pistolet de départ

Annexe 1 (3/4)

Fonctionnement de l'émetteur haute fréquence

L'émetteur est constitué d'un module HF MIPOT. L'émetteur est situé au centre de la piste d'athlétisme, on a ainsi une portée maximale de 70 mètres entre l'émetteur et chaque récepteur. L'émetteur fonctionne avec une batterie de 12 volts. Le capteur de départ est relié à l'émetteur par un câble. La détection du signal de départ de la course autorise l'émission d'un signal d'une fréquence d'un kilo hertz.

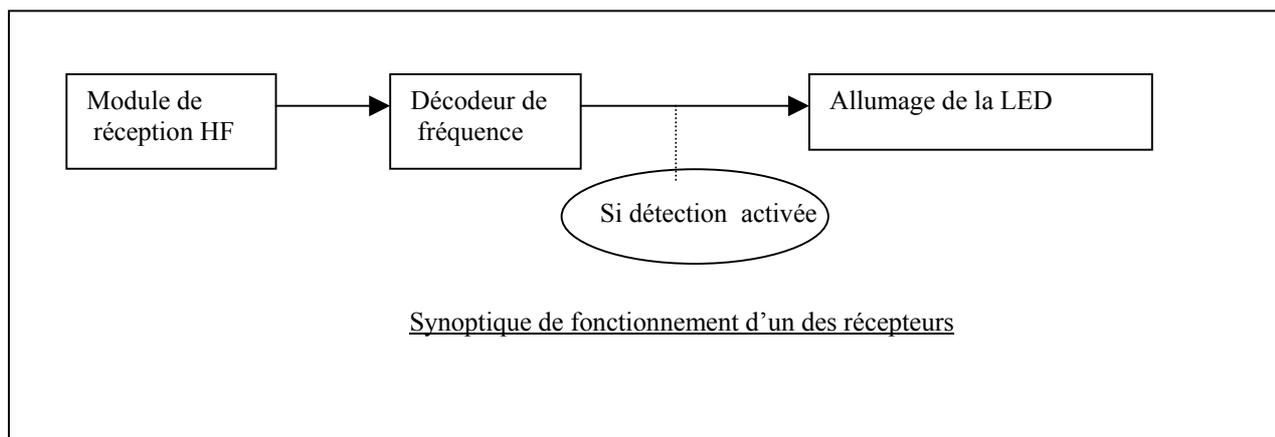


L'émetteur.

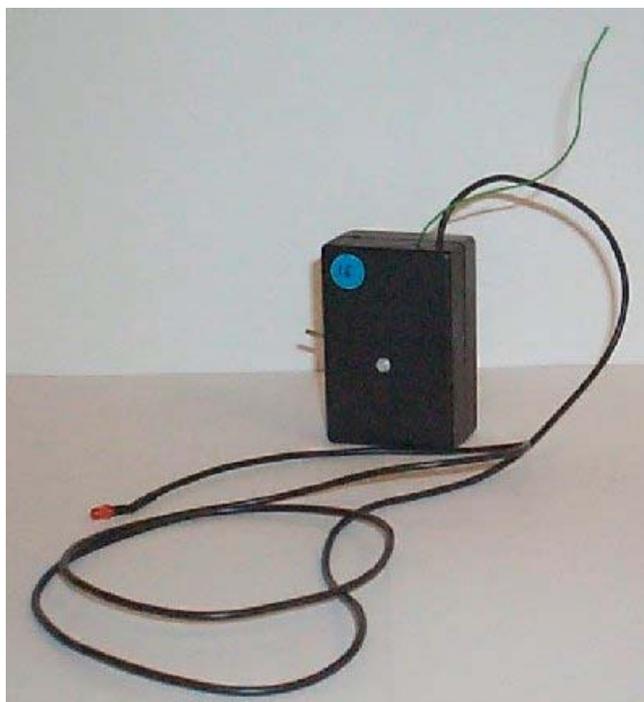
Annexe 1 (4/4)

Fonctionnement d'un récepteur.

On dispose d'un récepteur pour chaque caméra. Le récepteur utilise un module récepteur HF de la marque MIPOT. Le signal départ est ainsi détecté et allume une LED rouge de 5 millimètres dans le champ de la caméra. Le récepteur fonctionne avec une pile de 9 volts.



Un récepteur



Annexe 2 (1/2)

38

Annexe 2 (1/2)

SEVILLE 99 RECORD DU MONDE 400M Hommes

TEMPS DE PASSAGE et TEMPS INTERMEDIAIRES

NOMS	100	100 inter	200	100 inter	300	100 inter	400	2 ^{ème} 200	DIFF	200 inter
JOHNSON Mikael	11.04	10.2	21.24	10.43	31.67	11.51	43.18	21.94	0.7	20.63

Nbre de foulées	47.1	42.23	44.01	47.14
Amplitude Moy.	2.12	2.37	2.27	2.12
Fréquence Moy.	4.27	4.14	4.22	4.10

Données recueillies par Jo Maisetti

Annexe 2 (2/2)

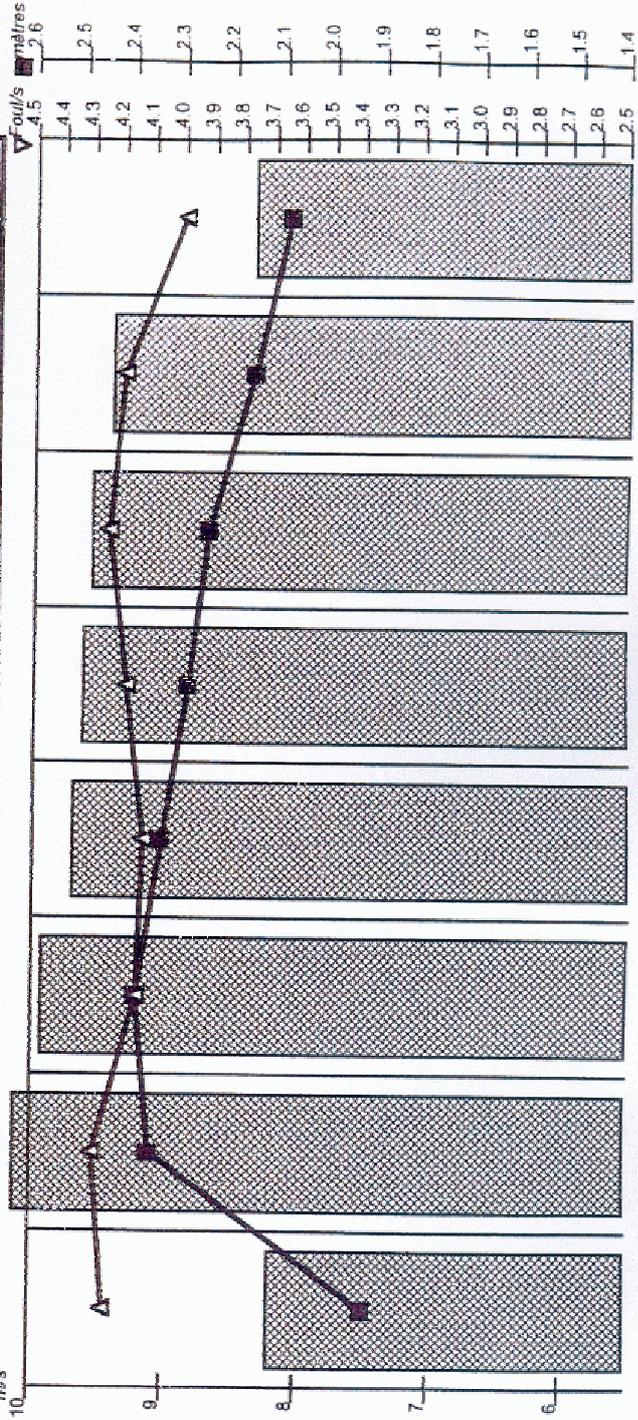
Analyse Foulees © Bruno Gajer - P.Dupuis 1995-99

Championnat du Monde : 400 m Finale

Norm	Couloir	Place	Temps	Réaction	Nb Foulees	Vent m/s
JOHNSON Mikael	4	1	43.18	0.000	180.0	+0.00 m/s

Résultats Analyse

	0 à 50m	50 à 100m	100 à 150m	150 à 200m	200 à 250m	250 à 300m	300 à 350m	350 à 400m
Chrono	6.100	11.040	16.080	21.240	26.440	31.670	37.180	43.180
Intervalle	6.100	4.940	5.040	5.180	5.200	5.230	5.520	5.990
Vitesse	8.20	10.12	9.82	9.69	9.62	9.56	9.41	8.35
Amplitude	1.93	2.36	2.39	2.34	2.29	2.25	2.16	2.09
Fréquence	4.88	4.28	4.15	4.13	4.19	4.25	4.20	4.00



Annexe 2 (2/2)

RESUME

Cette étude a pour objectif d'analyser l'évolution de la vitesse du coureur de 400 m en compétition, ainsi que l'évolution de la fréquence et de l'amplitude de sa foulée. Il s'agit aussi de comparer 3 niveaux d'expertise : un niveau mondial, un niveau national et un niveau régional (et ce pour les hommes et les femmes).

L'étude se base sur un découpage de la course en tronçons de 50 m et nous enseigne que le niveau de vitesse maximale atteint est différent et d'autant plus élevé que le niveau d'expertise est confirmé. Cependant les différents groupes de niveau suivent tous la même évolution de la vitesse.

La fréquence des foulées n'est pas significativement différente entre les groupes. Par contre l'amplitude de la foulée sur l'ensemble de la course est le facteur qui distingue ces différents niveaux d'expertise.

La vitesse de fin de course n'est plus discriminante entre les niveaux, même si les plus performants finissent plus difficilement les derniers mètres.