

DYNAMIQUE DE L'IMPULSION ATHLETIQUE

Note: Tous les caractères en rouge représentent des vecteurs.

De même que toute autre motricité athlétique est soumise à un ensemble de lois en particulier celles de la mécanique Newtonienne, les mêmes que celles qui régissent les mouvements des objets inanimés qui sont donc parfaitement bien connues et appliquées avec la précision d'une science exacte.

Certes, l'application de la physique à l'étude du mouvement humain et en particulier à celle des gestes athlétiques ne rend compte que très partiellement de la réalité de ceux-ci; il en va de même du reste de la bio-énergétique de l'exercice musculaire comme de toute science appliquée à l'étude de l'homme; le risque en ce domaine est sans doute qu'une quelconque approche donne lieu à des prises de positions dogmatiques.

Cependant, dans le champ de la haute efficacité qui caractérise en premier lieu l'athlétisme l'application des lois de la mécanique et de la bioénergétique reste fondamentale et à cet égard la haute performance constitue un document privilégié donnant lieu à de nombreuses analyses techniques faisant toutes peu ou prou référence à des données mécaniques et énergétiques.

Néanmoins le mouvement humain est d'une complexité telle qu'il serait illusoire de vouloir rendre compte de la totalité des mécanismes mis en jeu au cours d'une séquence gestuelle; aussi les approches restent elles multiples et soumises aux choix privilégiés de l'observateur en ce qui concerne ses critères et modèles mécaniques de référence.

Le premier critère, le plus spontané mais aussi le plus subjectif est d'ordre esthétique; nul doute que le premier contact avec la prestation d'un athlète est de nature émotionnelle; ce qui frappe d'abord tant le néophyte que l'amateur averti c'est la beauté du geste et celle-ci fait généralement l'unanimité. Chacun connaît bien du reste cette sorte de séduction qu'exerce le spectacle d'images traduisant la perfection du geste et qui gêne considérablement l'observation technique. C'est sans doute cet aspect qui a été le moins étudié en athlétisme comme du reste dans l'ensemble des pratiques à haute efficacité motrice, comme s'il était masqué par ce qui semble être habituellement l'unique critère tangible retenu: la performance.

La référence à la performance constitue une des données permanentes en athlétisme, elle est la valeur sûre de l'évaluation et c'est en fin de compte celle qui donne raison à

tel ou tel; c'est elle qui décide de la validité d'une technique c'est-à-dire de sa capacité à produire un rendement maximal. Ce critère d'efficacité est en athlétisme l'ultime référence lors de l'apprentissage qui reste encore pour une grande part le fruit du "tâtonnement expérimental". Cependant la référence aux seuls critères métriques et chronométriques conduit à une conception exclusivement fonctionnaliste et à la seule "pédagogie de la réussite" dans laquelle parmi les tentatives variées on tente de ne retenir que les expériences heureuses réalisées au cours de nombreux essais.

Au regard de ces deux critères, esthétique et fonctionnel, qui en fait se limitent au constat, les approches sont nombreuses qui tentent de démontrer les mécanismes de la motricité athlétique caractérisée comme le haut rendement fonctionnel par opposition à la motricité habituelle utilitaire et non spécialisée; cette dernière n'excluant pas bien entendu la référence à l'efficacité mais s'exprimant bien plus en termes d'économie dans l'effort qu'en termes d'efforts maximaux; le geste utilitaire visant contrairement au geste sportif à réaliser une tâche donnée avec la dépense énergétique minimale.

Parmi ces approches on peut dégager deux catégories: l'une regroupant des analyses essentiellement descriptives dans lesquelles la foulée est généralement découpée en phases successives, comme une suite d'images, de séquences; chacune de ces images décrit habituellement les positions relatives des différents segments dans l'espace à des instants privilégiés; on décrit en général quatre phases: l'impulsion, la suspension, l'amortissement et le soutien (Robert Vaussenat EPS n° 99) ou encore le contact, l'appui, la poussée et la suspension (Raymond Dubois, traité d'athlétisme "les courses"). Il existe d'autres descriptions segmentaires de ce type telles que celles que l'on rencontre dans les manuels de mécanique articulaire mais qui sont d'un intérêt secondaire pour l'étude de la course athlétique parce qu'elles sont habituellement trop générales; le problème pour nous n'étant pas seulement d'identifier les mécanismes de la course mais de définir la technique la plus efficace.

Ainsi la plupart des analyses citées précédemment s'attachent à reconnaître cette technique au travers de l'observation des athlètes réalisant les meilleures performances. A côté de ces analyses séquentielles et descriptives privilégiant la cinématique du mouvement sans toutefois la systématiser, d'autres s'orientent vers des études dynamiques telles que celle de Geoffrey H G Dyson dans son livre "Principes de mécanique en athlétisme" ou encore celle que nous propose Alain Piron au cours de ses conférences. Rappelons qu'en mécanique la dynamique étudie les relations entre les forces et les mouvements qu'elles provoquent; elle constitue une synthèse entre la statique qui étudie les forces en équilibre et la cinématique dont l'objet est l'étude des mouvements dans leur déroulement chronologique.

L'objectif de notre étude est d'identifier les convergences dans les différentes théories, d'explicitier les apparentes contradictions, et enfin de tenter d'établir une terminologie conforme au langage employé en dynamique. Il Convient donc en préalable à cette étude de rappeler quelques éléments de mécanique applicables au mouvement humain. Ceci sera l'objet de la première partie de notre étude, la seconde sera

consacrée à l'application en course.

Principes de mécanique applicables au mouvement humain.

Etudier la mécanique du mouvement revient à mettre en évidence la manière dont se traduisent les différentes forces auxquelles est soumis le corps humain au cours de ses actions; ou encore à déterminer les forces qui sont à l'origine d'un mouvement donné, ceci est en mécanique l'objet de la dynamique où l'on se propose d'étudier les relations entre les forces et les mouvements. Il apparaît donc que toute étude dynamique devra être précédée d'une analyse cinématique c'est-à-dire de la géométrie du mouvement en relation avec le temps. Comment peut-on appliquer les notions de cinématique et de dynamique au mouvement humain ?

Au cours d'un mouvement toutes les parties du corps n'ont pas des déplacements identiques aussi devons-nous considérer les mouvements de points matériels tels que les articulations ou le centre d'inertie de tout le corps ou bien celui d'une de ses parties ou encore de l'ensemble athlète engin; ceci afin de ramener l'étude à celle d'un cas simple; toute la difficulté résidant à ce point dans l'identification de la séquence; par exemple une course de 100 mètres peut être considérée comme un mouvement rectiligne du centre d'inertie de l'athlète mais aussi comme un mouvement curviligne de celui-ci ou encore comme une combinaison de mouvements de rotation.

D'un point de vue général on peut considérer chaque geste athlétique comme un lancement de projectile, ce qui nous amène à étudier les impulsions en fonction des trajectoires balistiques recherchées ou encore à déterminer la manière dont le corps s'organise au cours de l'appel pour communiquer à sa masse la plus grande quantité de mouvement possible compatible avec les exigences balistiques propres à chaque spécialité. D'où deux types de séquences à étudier :

- les suspensions et les actions possibles durant celles-ci.

- les actions permettant au cours de l'appel de réaliser le meilleur rendement possible de l'énergie cinétique disponible à l'entrée dans l'appel d'une part et d'autre part de la force musculaire du sujet.

Or au cours de ces deux phases, les seuls mouvements segmentaires possibles sont des rotations; ainsi nous sommes ramenés à l'étude des mouvements circulaires et de leurs effets au cours de l'une et l'autre phase. Il est clair qu'en mécanique du mouvement humain vouloir rendre compte de toutes les forces qui s'exercent à tout moment ne peut être envisagé aussi nous faut-il juger à tout moment des approximations qu'il est raisonnable de faire pour ramener l'étude à un problème ou un ensemble de problèmes particuliers plus simples à étudier; par exemple dans un lancer de poids on ne tiendra pas compte de la résistance de l'air tandis qu'en course de vitesse celle-ci ne peut être négligée.

En dynamique un athlète peut être considéré comme une masse en mouvement possédant à tout instant une vitesse et une accélération qui sont des grandeurs vectorielles donc orientées; elle se situe sur une trajectoire sur laquelle on définit son abscisse. Si la vitesse est nulle le mobile est au repos; si l'accélération est nulle le mouvement est uniforme si elle est constante il est uniformément varié, si elle est négative le mouvement est retardé, si elle est positive il est accéléré. La trajectoire peut être rectiligne ou curviligne elle est généralement parabolique ou circulaire.

Ainsi que nous l'avons vu auparavant seuls les mouvements segmentaires de rotation sont possibles; cependant la combinaison de ces rotations permet de construire des mouvements de translation linéaires rectilignes ou curvilignes; par exemple pendant l'appel les rotations combinées de la cheville et du genou se traduisent par une translation de la coxo-fémorale; de même lors d'une flexion de jambes, le centre de gravité subit une trajectoire grossièrement verticale trouvant son origine dans les rotations combinées des articulations des membres inférieurs. Nous verrons ultérieurement que ceci est d'une importance considérable pour expliquer les mécanismes de prise d'impulsion en permettant de transformer un problème complexe de combinaisons de rotations en un problème de translation.

Notons d'autre part que les mouvements uniformes sont pratiquement inexistant dans la motricité humaine; ils sont toujours ou accélérés ou retardés et il est parfois plus facile de reconnaître les forces qui les provoquent que les accélérations elles-mêmes. L'étude des forces mises en jeu permet de compléter l'approche cinétique constituant ainsi une véritable dynamique du mouvement humain.

Le corps humain est un système déformable qui peut être considéré comme un ensemble de systèmes rigides liés par des forces intérieures assurant sa cohésion. On pourra donc étudier séparément les mouvements du centre de gravité de l'ensemble et les effets relatifs des mouvements segmentaires. Ceci nous ramène à l'étude des mouvements des projectiles (suspensions), des effets des réactions d'appuis durant l'appel ainsi que des rotations segmentaires durant ces deux phases.

Les réactions d'appuis sont le fruit de deux types de forces; celles liées à l'énergie cinétique ou à la quantité de mouvement à l'entrée dans l'appel et celles liées à la force musculaire exercée par le sujet en direction du sol, c'est-à-dire de la puissance musculaire qu'il peut développer pendant l'appel; on appelle cette force la "poussée".

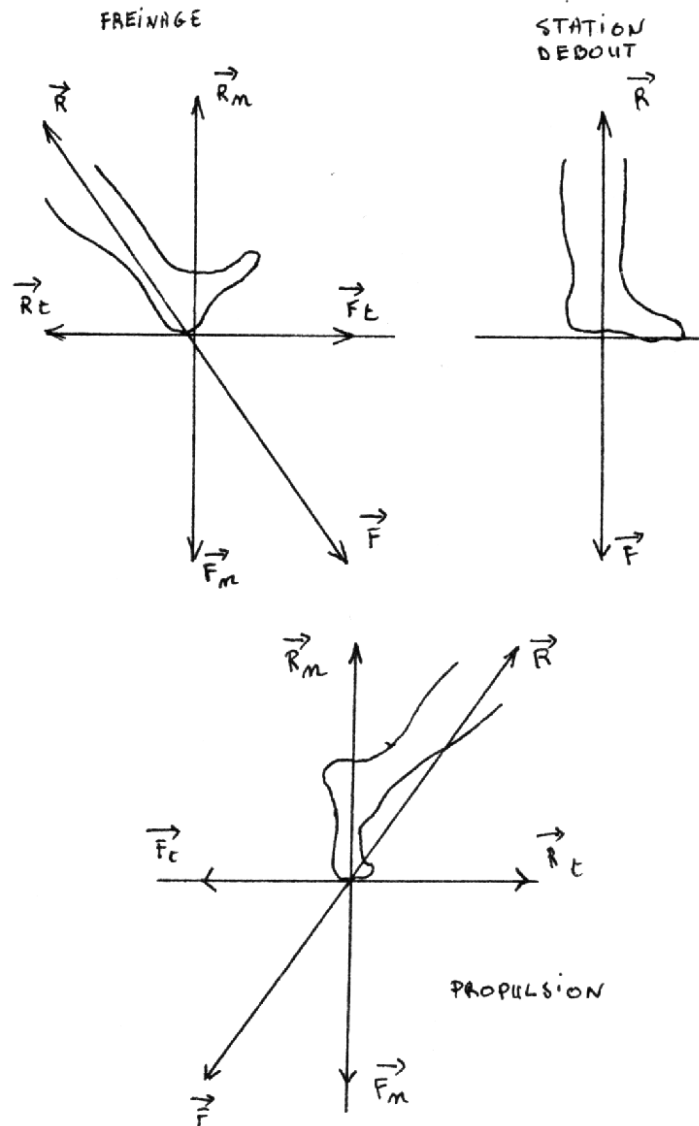
L'impulsion variation de la quantité de mouvement est d'autant plus grande que la force exercée est considérable et qu'elle est exercée longtemps; cependant les conditions de l'appel ne permettent pas de prolonger indéfiniment la poussée; en fait la durée de celle-ci est limitée par la vitesse de déplacement du sujet, mis à part le cas particulier du démarrage en course ou bien des sauts sans élan. Il reste néanmoins que l'augmentation de l'impulsion passera par la recherche de la poussée la plus longue possible et la plus puissante possible. On constate également que les conditions d'exercice de la force musculaire ne sont pas les mêmes à tous les instants de l'appel

et en particulier à l'entrée et à la sortie; l'effort musculaire visant à résister aux déformations segmentaires à l'entrée afin de conserver le maximum de quantité de mouvement liée à l'énergie cinétique du sujet tandis qu'après l'instant où le renvoi est commencé les actions musculaires visent surtout à prolonger la durée de l'appel durant lequel le centre d'inertie reçoit donc un renvoi cinétique ainsi qu'une poussée musculaire et qu'il est d'autre part soumis à une 3ème force: la gravité.

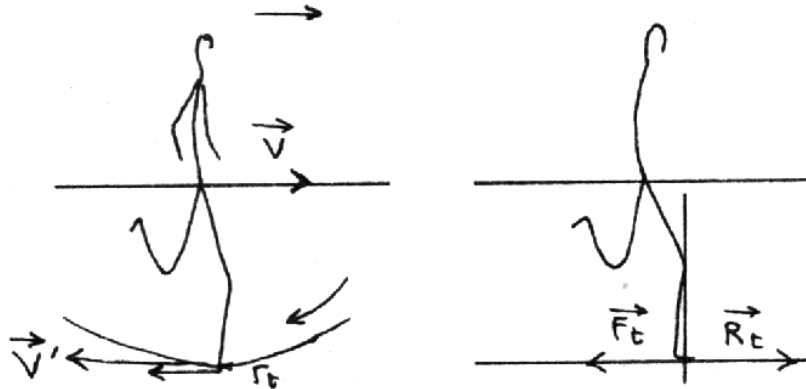
Parmi les forces auxquelles est soumis le corps lors des exercices athlétiques nous devons considérer en outre la force de pesanteur, la résistance de l'air et les actions réciproques entre le sol et le pied.

Pour ce qui est de la résistance de l'air notons simplement que lors des déplacements humains qui s'effectuent à des vitesses n'excédant pas 40 km/h la résistance de l'air est proportionnelle au carré de la vitesse; elle joue un rôle non négligeable en course puisque sans elle la vitesse à l'entrée dans l'appel serait la même qu'à la sortie et ainsi l'accélération serait possible tant que le sujet serait capable de fournir sa puissance maximale c'est-à-dire jusqu'à environ 250 m pour le plus haut niveau ce qui, on le sait bien n'est pas le cas: à une vitesse de 10 m/s la résistance de l'air par temps calme peut être estimée à 1,750 Kgf (Dyson). De même comme seul intervient le déplacement relatif du mobile par rapport à l'air qui l'entoure le vent joue un rôle considérable d'une part sur la performance et d'autre part sur l'attitude en course; le tronc sera plus incliné vers l'avant par vent de face et plus vertical par vent arrière.

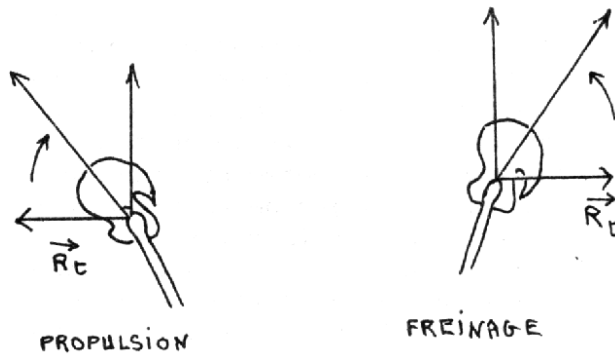
Le déplacement résulte d'une action réciproque entre le sol et la semelle de la chaussure; l'adhérence et la dureté jouent un rôle particulier; plusieurs auteurs, Marey fut le premier, ont étudié la pression du pied sur le sol pendant la marche; de telles études sont applicables à la course d'un point de vue théorique. On admet que la propulsion est possible si la force **F** (pression exercée par le pied sur le sol) répond à une force **R** égale, de même direction et de sens opposé exercée par le sol. Les forces **F** et **R** en projection donnent des forces **F_t** et **R_t** forces de résistance au glissement tangentielle ou forces de frottement, et des forces **R_n** et **F_n** normales au plan du sol. Pendant l'appel **R_t** est égale à **F_t** grâce au port de chaussures à pointes, en effet le coefficient de frottement devient alors maximum; si la résultante **R** est en avant de la verticale il y a propulsion dans le cas contraire il y a freinage; les forces tangentielle de frottement et leurs réactions directement opposées peuvent évoluer de manière différente en fonction des vitesses relatives du pied et du sol.



Si le pied entre en contact avec le sol alors qu'il est animé d'un mouvement de retour accéléré vers l'arrière à une vitesse supérieure et de sens opposé à celle du centre de gravité du sujet cela se traduit par une accélération positive transmise à G si la chaîne cinétique est par ailleurs correctement organisée, la composante de freinage est alors annulée pour faire place à une composante de propulsion venant s'ajouter à la force de renvoi balistique ainsi qu'à la force de poussée; cette action de retour actif de la jambe d'appui en course est maintenant bien identifiée et connue sous le terme de "griffé".



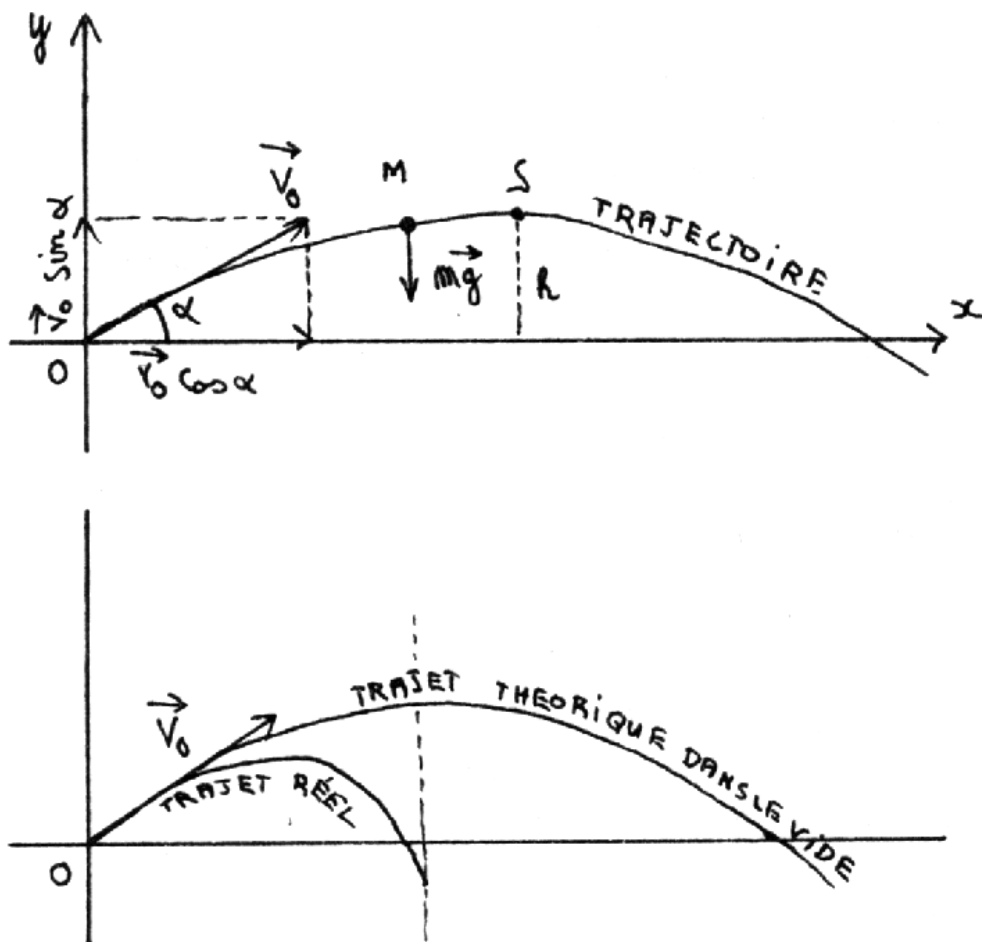
Les forces de propulsion et de freinage sont transmises au tronc par l'articulation de la hanche; le freinage tend à provoquer une rotation du bassin vers l'arrière, la propulsion une rotation vers l'avant. On comprend que ces rotations par les pertes énergétiques qu'elles entraînent sont défavorables à la transmission de l'intégralité de la force R au centre de gravité de l'ensemble; pour que la force transmise à ce dernier soit maximale il convient que le bassin soit fixé dans une posture fonctionnelle. La chaîne cinétique jambe d'appui - tronc doit être telle que les tendances à la rétroversion et à l'antéversion lors des prises d'appui soient minimales; d'où cette attitude caractéristique en légère voussure dorsale, bas du dos enroulé permettant de compenser l'action lordosante de R_t lors de l'attaque et la recherche du redressement du buste lors de la poussée; nous verrons ultérieurement que ce mécanisme est sujet à variations d'un sujet à un autre d'une part et d'autre part selon qu'on se trouve en phase d'accélération ou bien en phase de plateau de vitesse.



L'ensemble des principes évoqués jusqu'ici trouvent leur application dans l'étude des mécanismes des impulsions; les suspensions, elles, sont commandées par les lois de la balistique. Les mouvements des projectiles s'effectuent selon des trajectoires paraboliques durant lesquelles les mobiles sont soumis à leur seul poids $P = mg$; ils sont animés d'une vitesse horizontale constante $V = V_0 \cos \alpha$ et en l'absence de résistance de l'air, en course, la vitesse serait la même à la reprise d'appui qu'à l'envol. Pour une vitesse initiale donnée la durée de la suspension dépend uniquement de la hauteur à laquelle s'élève le centre de gravité et non pas de la longueur du saut; cette durée est donc d'autant plus grande que l'angle d'envol est proche de la verticale, et

elle est d'autant plus courte que ce dernier est proche de l'horizontale. La portée est proportionnelle au carré de la vitesse initiale et elle est maximale pour un angle d'envol de 45° . On comprend donc qu'en course on recherche la trajectoire la plus tendue possible avec un angle d'envol très petit pour obtenir une durée de suspension la plus brève possible compatible avec les autres exigences mécaniques (chacun sait bien que les foulées bondissantes, bien qu'exigeant une grande puissance énergétique ne permettent pas d'aller vite) tandis qu'en saut en hauteur on recherchera l'angle optimal d'envol le plus grand possible et en saut en longueur le plus près de 45° , ce qui pour d'autres raisons mécaniques n'est pas possible; en particulier l'augmentation excessive de cet angle se ferait au détriment de la vitesse horizontale et partant de la quantité de mouvement ou d'énergie cinétique disponible à l'entrée dans l'appel. De même une trajectoire trop tendue en course de vitesse ne permettrait plus au coureur de fonctionner avec une amplitude suffisante et mènerait à une course étriquée où la puissance du sujet ne pourrait plus s'exprimer; en fait il existe des variations individuelles liées à la morphologie ainsi qu'à la vitesse gestuelle et à la force des sujets; l'idéal étant puissance et vitesse afin d'obtenir des trajectoires tendues avec une grande vitesse initiale.

Il existe pour chaque coureur un rapport amplitude des foulées et fréquence des appuis optimal lié à ses capacités de vitesse gestuelle et de force explosive qu'il est bien difficile de déterminer autrement que par de nombreux essais successifs; Dyson estime à environ 3 cm les variations verticales du centre de gravité pour des sprinters de haut niveau; on conçoit que les qualités principales à développer chez ces derniers soient celles de vitesse et de puissance qui permettront de diminuer l'amplitude de ces variations verticales et d'augmenter ainsi la quantité totale de mouvement communiquée au corps pendant la course.



Dynamique de la course :

La plupart des théories attribuent à la poussée seule le rôle propulsif: "Le problème technique à résoudre se présente ainsi: diminuer l'amortissement et augmenter l'efficacité de l'impulsion" (Robert Vaussenat in EPS n° 99). R. Vaussenat appelle amortissement la première phase de l'impulsion allant de l'entrée dans l'appel à l'instant où le centre de gravité se situe à la verticale de l'appui; cet instant constituant le "soutien", quant à l'impulsion elle commencerait à cet instant pour se terminer à la sortie de l'appel; le fait même de désigner la première phase de l'appel par le terme d'amortissement suggère le caractère négatif de cette dernière, on comprend bien, lorsque l'auteur invite à diminuer cette phase d'amortissement par une prise d'appui à la verticale du genou qu'il s'agit en fait de supprimer la force de freinage que constitue la composante R_t lors de l'entrée dans l'appel par une recherche du sol vers l'avant, ce mécanisme a été décrit dans le chapitre précédent. "Beaucoup de théories existent, une seule est valable: celle qui permet au coureur de sprinter en décontraction tout en poussant jusqu'au bout des orteils" (Jim Busch, entraîneur de l'UCLA, propos recueillis in "spécial sport" athlétisme INSEP 1978) "l'action du sprinter est une "poussée", jamais une "traction"; nous rechercherons une action explosive de la jambe arrière, de la

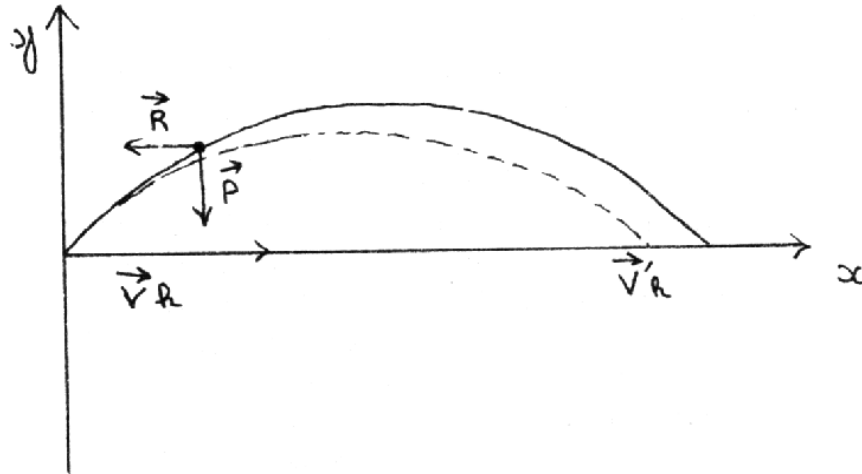
cheville et du pied" ajoute ce même entraîneur réputé. "La foulée se compose de 4 phases: le contact, l'appui, la poussée et la suspension..... La phase d'appui débute au contact du pied au sol et se termine dès que la jambe commence son action propulsive, c'est-à-dire quand le bassin dépasse la verticale du talon..." (Raymond Dubois) traité d'athlétisme "Les courses" Vigot Ed. 1976). "Phase d'appui" ou "amortissement", peu important les termes, dans l'esprit des auteurs la propulsion commence après la verticale de l'appui, la phase qui précède ayant des effets négatifs, il convient de la raccourcir au maximum; d'où cette prise d'appui à la verticale de G, en "piston" ou encore l'attaque "talon" préconisée par certains pour permettre l'extension ultérieure du pied dans la poussée qui seule retient l'attention. Alain Piron quant à lui considère que la première phase de l'appui n'est pas négative, bien au contraire, c'est pendant cette période que l'essentiel de l'impulsion se réalise par le mécanisme de la mise en tension musculaire en résistant à l'allongement les muscles se comportent comme un ressort et permettent ainsi la conservation de l'énergie cinétique acquise par le sujet au cours du mouvement balistique antérieur (la suspension) cette énergie permet la conservation de la quantité de mouvement durant l'appui au sol, le sujet est donc "renvoyé" au cours de ce que les auteurs précédents ont appelé impulsion ou poussée. La reprise du contact avec le sol par un retour actif du pied d'avant en arrière ayant pour rôle essentiel de réduire la durée du passage dans l'impulsion, la quantité de mouvement étant conservée le centre d'inertie est ainsi accéléré (l'impulsion est le produit de la masse par l'accélération c'est la force musculaire responsable de la "traction" exercée par la jambe d'attaque qui apporte l'impulsion).

Sur le plan pratique ces différentes théories se traduisent par des objectifs sensiblement différents; dans un cas l'attaque se fait en "piston", les genoux montant haut, la reprise se faisant à la verticale du genou, elle est prolongée par une poussée loin derrière; dans l'autre cas l'attaque dite "griffée" se fait par un retour actif de la jambe préalablement relâchée pendant la suspension et se comportant à la manière d'un pendule articulé, d'un fléau ou d'une lanière de fouet, elle est suivie d'une mise en tension puis d'un renvoi selon un mécanisme "récéssivo-balistique".

Bien que ces théories semblent contradictoires, une analyse dynamique permet de dire que l'ensemble des mécanismes précédemment décrits composent la réalité de la foulée et que les différences observées entre coureurs "tracteurs" et "pousseurs" servant de justification aux différents points de vue ne constituent que des prédominances de facteurs lors de la prise d'impulsion déterminée par des différences morphologiques, neuro-musculaires ou culturelles issues d'hypothèses d'écoles, L'analyse proposée par A. Piron dont malheureusement nous n'avons aucune traduction écrite semble pour l'instant satisfaire le plus à la conformité aux modèles mécaniques habituels tels que ceux décrits par Dyson dans son ouvrage "Principes de mécanique en athlétisme".

Si on aborde l'étude de la foulée par celle de la suspension on s'aperçoit que la vitesse du coureur à la sortie de l'appui est nécessairement supérieure à celle qu'il possède à l'entrée; ceci par le simple fait que l'athlète est soumis à la résistance de l'air. Toutes

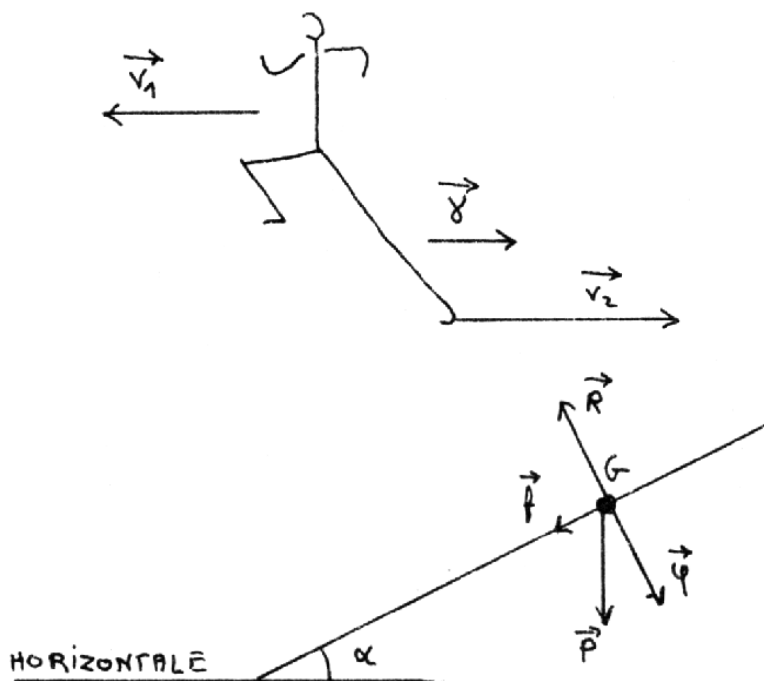
choses étant égales par ailleurs (à vitesse constante et maximale en particulier) d'un point de dynamique l'impulsion acquise pendant la phase d'appui a pour finalité unique de compenser le freinage dû à la résistance de l'air; le mouvement du centre d'inertie est donc accéléré durant cette phase sinon la vitesse moyenne du coureur diminuerait.



L'accélération horizontale du centre d'inertie est donc une nécessité impérative en course, ce qui n'est pas le cas dans l'appel des sauts que l'on peut interpréter comme une conservation de la quantité de mouvement communiquée par la prise d'élan associée à une déformation de trajectoire; l'impulsion en course est une prise de vitesse elle doit assurer non seulement la conservation de la vitesse mais aussi l'augmentation de la quantité de mouvement, d'où le terme d'impulsion retenu pour la phase d'appui; la modification de trajectoire étant pratiquement négligeable par rapport à l'énergie investie dans la prise de vitesse. Dès lors il nous faut identifier les forces responsables de cette accélération ainsi que les modèles mécaniques permettant d'expliquer le devenir de ces forces au cours de la phase d'appui.

La trajectoire du centre d'inertie où s'applique l'ensemble des forces extérieures pendant l'impulsion est le résultat d'une combinaison de rotations qui se traduit par une translation plus ou moins rectiligne suivant l'importance de la "flexion" ou de la "compression" lors de l'entrée en contact avec le sol. La trajectoire dans la suspension est suffisamment tendue et la flexion au contact suffisamment faible pour que l'on puisse considérer le cas d'un mobile soumis à un mouvement de translation uniformément accéléré sur un plan incliné ascendant et animé d'une vitesse initiale durant l'impulsion et à un mouvement rectiligne horizontal uniformément retardé durant la suspension. Cette approximation permet de rendre compte d'un mécanisme qu'il serait par ailleurs vain de prétendre expliquer dans sa totalité. On se rend compte en retenant ce modèle que c'est l'extension de la jambe d'appui qui assure la transformation de la trajectoire horizontale en trajectoire ascendante; mais là n'est probablement pas sa seule action car si cela était on verrait apparaître par la simple extension du pied des variations d'amplitude verticale du centre de gravité bien

supérieures à celles constatées habituellement chez les coureurs de haut niveau. On peut donc dès lors affirmer que la poussée excentrique issue de l'extension de la jambe d'appui est presque totalement consacrée à la prise de vitesse puisque la déformation de trajectoire est presque nulle lorsque la vitesse maximale est atteinte cette poussée ne permet en fait que le maintien de la vitesse moyenne compensant ainsi la perte de vitesse due à la suspension. On comprend que malgré l'extension violente du pied on n'enregistre qu'une faible pression sur le sol durant cette phase; en effet celle ci est proportionnelle à l'accélération ($F = m \gamma$) qui elle-même est très petite puisqu'elle est égale à la différence entre la vitesse du sujet et la vitesse d'extension de sa jambe arrière; ainsi un enfant roulant sur une trottinette a l'impression de pousser dans la vide lorsqu'il a atteint sa vitesse maximale.



Le centre d'inertie est soumis à son poids P vertical la résultante R de la force de réaction exercée par le sol sur le pied perpendiculaire à la trajectoire de G ; P peut être remplacée par 2 composantes dirigées suivant deux axes rectangulaires a pour effet d'exercer la pression sur le sol, elle est égale et opposée à R et n'a aucun rôle dans le mouvement f est la force extérieure freinatrice responsable d'une accélération négative.

$$\begin{aligned} \text{accélération négative } \vec{\gamma} &= -\vec{g} \sin \alpha \\ \left(\vec{f} = P \sin \alpha = m \vec{g} \sin \alpha ; \vec{\gamma} = \frac{\vec{f}}{m} = \frac{P \sin \alpha}{m} = \frac{m \vec{g} \sin \alpha}{m} \right. \\ &\left. \vec{\gamma} = \vec{g} \sin \alpha \right) \end{aligned}$$

On peut considérer à ce niveau, qu'en dehors de toute action extérieure au système, G reste animé d'un mouvement rectiligne uniforme de vitesse V égale à la vitesse initiale

à l'entrée dans l'appui (principe d'inertie); pour qu'il s'accélère ainsi que cela est nécessaire il lui faut recevoir une force résultante F appliquée de l'extérieur opposée et supérieure à f ; l'ensemble des forces mises en jeu est nécessairement d'origine musculaire; celles-ci bien qu'elles soient produites par le sujet restent extérieures au système mécanique, elles appartiennent au sujet en tant que système bioénergétique, du point de vue mécanique les forces intérieures ne sont que les effets de l'activité physico-chimique des muscles ce sont les forces de liaison dont l'existence et la suppression alternatives permettent de transformer du point de vue mécanique l'athlète en un système unique ou un ensemble de systèmes en interactions au gré des volontés des régulations neuro motrices. Nous avons déjà noté l'existence de la poussée excentrique de la jambe d'appui ainsi que celle de la traction consécutive au griffé dans la prise d'appui au sol; interviennent également le poids des segments libres ainsi que leurs variations de moment cinétique occasionnées par les accélérations segmentaires ou réflexes pour lesquelles l'énergie est fournie par les actions musculaires. En renforçant les réactions d'appui ces actions font apparaître des forces qui si elles sont exploitées dans le sens de la prise de vitesse renforceront à leur tour l'accélération du centre d'inertie. La masse des segments libres abandonnée à la pesanteur lors du relâchement musculaire fait intervenir leur poids qui peut alors être considéré comme extérieur au système et lui transmettre les quantités de mouvement qu'ils ont acquies au cours de leurs rotations; ainsi les bras relâchés pendant la suspension diminuent pendant leur chute la pression à l'entrée au contact du sol, ils jouent un rôle d'amortisseurs, puis lors de leur mouvement ultérieur accéléré vers le haut ils augmentent la pression renforçant ainsi la poussée durant la deuxième phase de l'impulsion; l'exemple d'un sujet assis sur une chaise dont il se rend solidaire par un moyen quelconque et qui peut ainsi progresser par rebonds successifs avec seulement l'aide de ses mouvements de bras illustre clairement ce mécanisme. La jambe libre relâchée pendant son retour de l'arrière vers l'avant puis brusquement accélérée dans une montée de genou joue le même rôle que les bras. Notons du reste que ces deux actions sont parfaitement coordonnées en fonction de chacune des phases de l'impulsion. L'effet du retour actif de la jambe avant qui vient rechercher le sol en "griffé" est de nature différente; puisque cela se produit en suspension il n'y a aucun effet sur G , mais en revanche il permet d'accélérer le retour de la jambe arrière et surtout de créer une vitesse relative du pied par rapport au sol favorable à la prise de vitesse (composante R_t de propulsion).



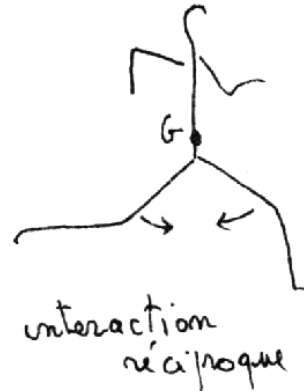
$$\vec{P}_1 = \text{masse du Tronc} \times \vec{g}$$



$$\vec{P}_2 = \text{masse Totale} \times \vec{g}$$



$$\vec{P}_3 = \text{masse totale} \times \vec{g} + \text{masse des bras et de la Jambe} \times \vec{g}$$



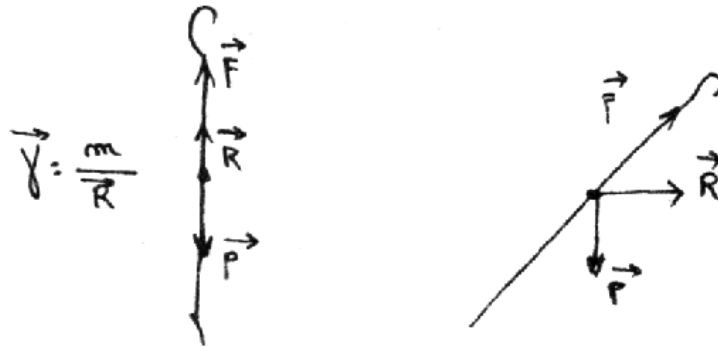
interaction réciproque

A chacun des moments de la course, le modèle de référence reste le même cependant les conditions d'application des forces diffèrent sensiblement; on peut considérer 3 périodes:

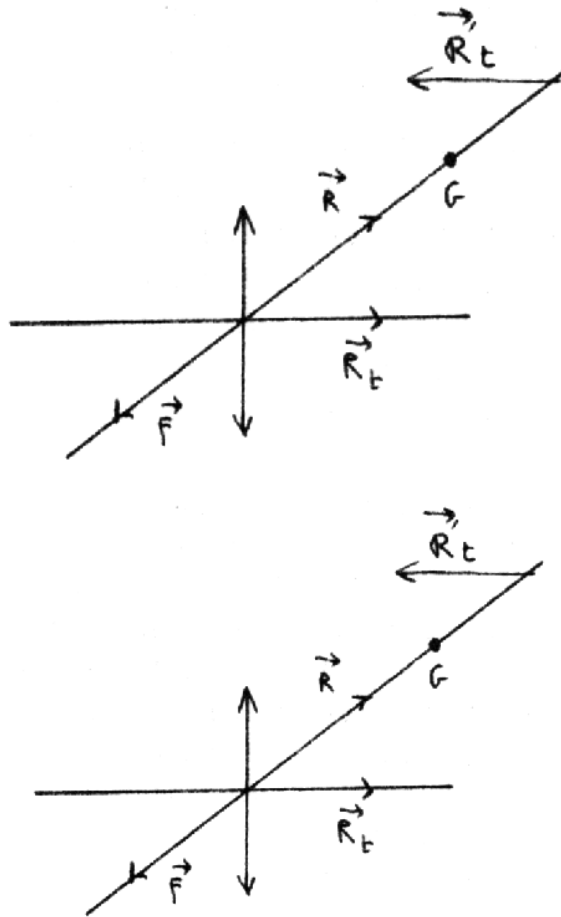
- la mise en action
- la prise de vitesse
- le plateau de vitesse.

Pour cette troisième période il convient de faire une distinction entre les plateaux à une vitesse moyenne donnée dictée par les impératifs de la distance (le train) et le plateau à vitesse maximale. Ce qui différencie ces différentes phases c'est le rôle que joue la pesanteur dans l'équilibre du corps en mouvement.

Lors de la mise en action la force de propulsion (composante R_t de la réaction d'appui issue de la poussée excentrique et des variations de moments cinétiques des bras et de la jambe libre) doit être orientée vers l'arrière de manière à ce que la résultante R_t s'exerce vers l'avant, ce qui n'est pas possible si la ligne de gravité est verticale; en effet dans ce cas la poussée serait dirigée de bas en haut et ne permettrait qu'un bond vertical.



Il faut donc que la ligne de gravité soit en avant du polygone de sustentation, que le sujet soit donc en déséquilibre avant, la chaîne musculaire fonctionnelle fixée autour de l'axe de pression, (ceci afin d'éviter que ne se créent des moments de rotation autour des axes articulaires); en effet la poussée crée un couple de rotation autour de G qui est équilibré par le moment de rotation de P .



Le moment de P par rapport au point d'appui O est égal au moment de $R't$ par rapport à O . On comprend que, plus la force de poussée est grande plus l'axe de poussée est incliné sur l'horizontale et que plus le centre de gravité du sujet est élevé, à poussée égale, moins il aura besoin d'être incliné au départ; on se rend compte également qu'au cours de la phase de prise de vitesse l'accélération instantanée diminue progressivement, le buste se redresse ainsi de plus en plus jusqu'à venir à la verticale lors du plateau de vitesse; en effet le mouvement de G n'est pas uniformément accéléré certes l'accélération reste positive mais elle décroît constamment pour devenir nulle lorsque le coureur a atteint sa vitesse de plateau, puisque l'impulsion représente la différence entre la vitesse gestuelle V_G et la vitesse de translation V_t de G , V_G étant une constante caractérisant le sujet et V_t augmentant régulièrement. On comprend alors que la force exercée et la vitesse sont inversement proportionnelles (la résistance extérieure diminuant au fur et à mesure que la vitesse s'accroît) et que la force mise en jeu dépend de la phase de la course: force explosive à la mise en action - force vitesse durant l'accélération et vitesse pure lors du sprint décrivant ainsi tout le gradient de potentiel de force du sujet.

Ceci permet d'expliquer en partie pourquoi certains sont "vite" au départ (les haltérophiles par exemple) et sont rapidement rattrapés par la suite. Nous devons tenir

compte de cela dans la préparation des sprinters; "exploser" hors des blocs ne garantit pas la possibilité de courir vite ultérieurement, il est plus important d'être le plus tôt en vitesse maximale la suite étant affaire d'amélioration de la capacité à durer en puissance maximale. Il existe donc à tout moment pour chaque sujet un angle d'inclinaison optimal de la ligne fonctionnelle d'impulsion dépendant de la poussée qu'il exerce et de sa morphologie. Si cet angle est trop marqué, au départ en particulier, le sujet pour tenter d'éviter la chute soit accélère la fréquence de ses appuis au détriment de l'amplitude de ses foulées et la suspension devenant trop brève ne permet plus de réaliser des impulsions complètes et efficaces; le sujet piétine et n'avance pas; ou bien il va chercher à diminuer l'effet de la pesanteur sur G en prenant son appui loin devant, ce qui le fait obtenir l'effet contraire c'est-à-dire la diminution de la composante R_t de propulsion et a pour effet de l'arrêter en attitude cassée.

En revanche, il est tout à fait compatible avec l'efficacité mécanique d'accentuer l'effet du poids par une flexion du buste sur le dernier appui en sprint car alors la poussée peut s'exercer complètement puisque passé la ligne d'arrivée on peut se mettre en attitude de freinage ligne de gravité en arrière de l'appui. L'utilisation de l'inclinaison sur l'horizontale de la ligne de pression est au contraire tout à fait acceptable en demi-fond; puisque le sujet ne fonctionne pas à vitesse maximale elle a pour effet de lui permettre une accélération et on se retrouve en fait dans la situation de prise de vitesse du départ; on observe du reste ce mécanisme lors des accélérations tactiques.

On comprend d'autre part qu'imposer un départ accroupi à un jeune sujet ne possédant pas une force explosive suffisante constitue un handicap qu'il se charge parfois de compenser en se relevant pratiquement avant d'engager sa première impulsion; en ce qui concerne ce problème d'équilibre en course, notons encore que la stricte verticalité n'est pas possible puisqu'elle ne permettrait pas de mettre en oeuvre la composante horizontale R_t de la poussée responsable de l'accélération de la vitesse horizontale; l'axe de pression doit nécessairement s'incliner vers l'avant après l'entrée dans l'appui au cours de la mise en tension plyométrique résistante sinon la composante terminale de poussée ne pourrait pas s'exercer dans le sens de la propulsion ce qui est différent du saut en longueur, par exemple, où on recherche la composante normale la plus grande possible puisque en ce qui concerne la vitesse il ne s'agit que de conserver celle acquise au cours de la course d'élan; la poussée excentrique peut être tout entière consacrée à la transformation de la trajectoire et la ligne fonctionnelle d'impulsion n'a nullement besoin de franchir le plan de la verticale ainsi le sauteur cherchera à quitter le sol le plus parfaitement équilibré possible; la vitesse d'entrée dans l'impulsion est en fait limitée par la capacité de force récésivobalistique nécessaire à la transformation de la trajectoire durant l'appui. En saut le facteur limitant le plus déterminant est la force plyométrique, il ne sert à -rien d'augmenter la vitesse d'entrée dans l'appel si l'on améliore pas ce type de force, ce n'est que lorsque celle-ci aura été améliorée que le sauteur pourra entrer plus vite dans l'impulsion.

A l'exclusion du cas particulier du départ le coureur possède toujours une certaine quantité d'énergie cinétique d'autant plus grande que sa vitesse est élevée et que sa

masse est importante ($E_c = 1/2 m V^2$ pour les solides en translation) ou bien encore une quantité de mouvement proportionnelle à sa masse et à sa vitesse ($p = m.v$), il est d'autre part capable d'exercer deux types de fonctionnement musculaires: la force plyométrique d'une part, responsable du travail résistant qui lui permet de se comporter dans le choc d'entrée dans l'appui comme un ressort et partant de conserver un maximum d'énergie cinétique et d'autre part la force myométrique qui lui permet d'exercer une poussée analogue à celle qu'exerce sur le sol la projection des gaz d'une fusée lors de son départ; on peut donc considérer l'appel comme un choc durant lequel le mobile recevrait du sol une poussée orientée selon son grand axe. C'est cette poussée excentrique myométrique qui permet d'assurer avec l'aide des variations des moments cinétiques des segments libres la transformation de la trajectoire du centre d'inertie ou la prise de vitesse horizontale selon une dialectique réglée par l'angle d'envol que doit avoir le centre d'inertie à l'impulsion, la résistance plyométrique à l'écrasement (mise en tension ou amortissement) assurant la conservation de la quantité de mouvement acquise au cours de la suspension.

BIBLIOGRAPHIE

- DYSON.- Principes de mécanique en athlétisme (Vigot).
- HAINAUT Karl.- Introduction à la bio-mécanique. (Naloine).
- Revue AEFA n ° 45.- "L 'entraînement plyométrique" Veru Gambetta.
- Revue E.P.S. n° 99,- "L'école du coureur". R. Vaussenat.
- Revue E.P.S. n° 127.- "Analyse différentielle de la foulée selon les critères d'amplitude et de fréquence". P. Trouillon.
- Revue INSEP.- Spécial Sport "athlétisme".-"La formation du sprinter de haut niveau" - Jim Bush et Don Weiskopf.
- Revue Scientific American. Février 1979. "Des pistes d'athlétisme plus rapides" Thomas Mac Mahon et Peter Greene.
- SHERRER.- Physiologie du travail (Masson).
- Traité d'athlétisme. "Les courses" (Vigot).
- VAADERVAEL.- Analyse des mouvements du corps humain. Desoer ed. Liège.
- ZATSIORSKI.- Méthodique du développement des qualités physiques (document INS).