



LA TECHNIQUE DU PAS DE PATINEUR EN SKI NORDIQUE : REVUE DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE

INFO DOCUMENT :

Edité par le Département Sportif et Scientifique de la F.F.S
version : Août 2002

Groupe de travail : Nicolas Coulmy, Laurent Schmitt, Michel Tavernier, Samuel Vergès.

Le pas de patineur à ski de fond est un mode de locomotion pratiqué dans trois disciplines olympiques de ski nordique : le biathlon, le combiné nordique et le ski de fond spécial.

Dès l'apparition de ce style, dans les années 80, l'intérêt d'un meilleur coût énergétique qu'en style classique a semblé se confirmer. Au fil des années, un accroissement d'environ 30 % de la vitesse moyenne de course a été observé.

Aujourd'hui, si l'organisation générale des mouvements de patinage est sensiblement la même qu'à leurs premières apparitions en course, ces coordinations inter-segmentaires et des

adaptations physiologiques se sont peaufinées années après années.

Ce document a pour but de faire le point sur les connaissances scientifiques acquises en matières de techniques de patinage en ski de fond.

La détermination de facteurs de la performance dans les études scientifiques s'est souvent effectuée par le repérage de caractéristiques gestuelles au sein de population de haut niveau comparées à celles d'une population de moindre niveau. La recherche de ces invariants de la performance est d'autant plus valide si elle est réalisée dans le cadre de situation de compétition. La mise en

relation (corrélation) entre l'évolution de certains paramètres gestuels avec la performance permet de faire ressortir les observables techniques les plus liés à la réalisation d'une bonne performance.

Quelques études ont réalisé l'analyse cinématique et/ou dynamique des différentes techniques utilisées en pas de patineur tant en situation de course (Smith, 1994 ; Ruby, 1995 ; Bilodeau, 1996 ; Rundell, 1996 ; Coulmy, 2000) qu'en situation expérimentale (Bilodeau, 1991, 1992 ; Boulay et al., 1994 ; Street, 1995 ; Hoffman, 1995 ; Perrey et al., 1998 ; Millet et al., 1997, 1998 ; Lindinger et al., 2000).

Les travaux ont souvent été axés sur l'analyse du geste spécifique à « ski de fond spécial » et non sur le geste réalisée lors d'épreuve de biathlon ou de combiné nordique.

Les investigations réalisées sur le pas de patineur en ski de fond ont permis d'améliorer les connaissances sur les relations entre la vitesse, la longueur et la fréquence du cycle de pas^(*). Certains travaux ont permis de mettre en évidence des corrélations existantes entre les valeurs d'angles et la vitesse obtenue au cours d'un cycle.

Une approche plus originale permet d'appréhender le mouvement selon l'aspect de l'énergie mécanique développée au cours d'un cycle.

Ce document participe à faire la synthèse des recherches effectuées sur ce mode de locomotion en ski nordique selon plusieurs axes d'approche.

Les données rassemblées ici devront, non seulement permettre l'orientation des consignes techniques données à l'entraînement mais aussi permettre une adéquation plus fine entre la préparation physique et le geste réalisé en compétition.

◆ PRELABLES

La synthèse des différentes études scientifiques portant sur cette technique de ski a permis de mettre en avant plusieurs principes fondamentaux qui constituent des objectifs principaux à atteindre en adaptant la gestuelle :

(*) voir la définition de certains termes dans le lexique en fin de document

Les objectifs généraux pour une technique adaptée en skating (fondamentaux toutes disciplines) :

- **Diminuer le coût énergétique** par une gestuelle adaptée (notion d'économie).
- **Permettre l'augmentation de vitesse de déplacement (notion d'efficacité).**

⇒ Ces deux notions sont parfois difficiles à faire évoluer en même temps. Quoiqu'il en soit le bon geste sera celui qui sera le plus adapté à la stratégie et à l'environnement du skieur. Il apparaît que l'orientation de la technique ne sera pas la même selon une optique d'efficacité à court terme (ex : KO sprint) ou à long terme (geste économique sur 50 km).

Pour cela, plusieurs axes de développement (quelque soit la technique) émanent des différentes études :

- **Recherche d'une vitesse la plus uniforme possible au cours du cycle (réduire les successions d'accélération et de décélération).**
- **Orienter le geste vers une stabilité générale (gestion du déséquilibre) amenant vers des formes de contraction musculaire permettant une relative récupération.**
- **Limitier les gestes exigeant au niveau énergétique qui ne participent pas à l'avancement.**
- **Permettre des modes de contractions musculaires engendrant le meilleur rendement.**

Pour atteindre ces objectifs et permettre ainsi une amélioration de la performance, la gestuelle doit être optimisée en fonction des conditions environnementales, des particularités de chaque discipline mais aussi en fonction des qualités intrinsèques de l'athlète. Notre analyse se structurera autour des principaux thèmes de réflexion issus des discussions avec les entraîneurs nationaux de la Fédération Française de Ski



◆ LES NOTIONS DE FREQUENCE ET D'AMPLITUDE.

Beaucoup d'études consacrent leurs analyses à l'établissement de corrélation entre la fréquence gestuelle (nombre de cycle par seconde) et l'amplitude du cycle (distance parcourue pendant un cycle).

La plupart des études ont montré une corrélation significative entre l'amplitude et la vitesse de cycle (*) (Bilodeau et al., 1992 ; Boulay et al. 1994 ; Bilodeau et al., 1996 ; Norman et al. 1989 ; Smith et al, 1988, 1989, 1994).

Plusieurs auteurs suggèrent que l'amplitude du cycle est liée à la "force" (« vigorous » en anglais) de l'extension du genou ou une poussée plus efficace (Smith et Heagy, 1994).

Malgré les réserves que l'on peut émettre à propos des méthodes expérimentales utilisées dans certaines études (voir à ce propos les analyses critiques de Vaughan, 1984 ; Duboy, 1994 ; Leplanquais, 1995), plusieurs pistes d'étude apparaissent :

- ◆ Il apparaît que la **fréquence gestuelle augmente alors que l'amplitude diminue avec le degré de pente ou sur neige peu glissante**

Valeurs moyennes en ski de fond pour une augmentation de 5° à 7° de pente à partir du plat :

- en 2 temps : + 0.08 Hz et -1 m d'amplitude.
- en 1 temps : +0.05 Hz et -0.50 m d'amplitude.
- en 2 temps combiné : +0.05 Hz et de -1 à -2 m d'amplitude. (Smith, 1992 ; Bilodeau, 1992-1996 ; Millet, 1998).

- ◆ **L'augmentation de la fréquence en montée ou sur terrain peu glissant est selon Kirvesniemi (1996) et Millet (1997) expliquée par la nécessité de maintenir la vitesse la plus constante possible.** Ce dernier critère correspond à un critère d'économie d'énergie mécanique (Ruby, 1995, Rundell, 1998).
- ◆ **Une grande amplitude de cycle semble être caractéristique des meilleurs** (Gregory, 1994 ; Smith, 1989). La fatigue diminue ce paramètre chez tous les skieurs. Cependant la vitesse supérieure

(*) vitesse de cycle : vitesse moyenne du centre de masse au cours d'un cycle gestuel.

constatée chez les meilleurs lors du cycle peut être la cause de cette particularité et non la conséquence.

- ◆ **L'amplitude** (distance parcourue lors d'un cycle) est selon Rundell (1996), davantage une **conséquence des capacités physiques** que de la stratégie technique.
- ◆ **La fatigue engendre une baisse d'amplitude** avec une influence moindre sur la fréquence.
- ◆ **La fréquence gestuelle** dans la plupart des études, **n'est pas discriminante de la performance.**
- ◆ Les meilleurs skieurs ont une fréquence plus élevée en montée ou sur neige peu glissante mais celle-ci reste très variable selon l'individu (pas de discrimination de performance possible) : il s'agit davantage d'adaptation aux terrains et à ses qualités physiques que de stratégie technique.
- ◆ La **fréquence spontanée correspond au meilleur coût métabolique.** Une modification de cette fréquence spontanée engendre un coût supplémentaire en ski de fond (Millet, 1998).

◆ LES MESURES D'ANGLES INTERSEGMENTAIRES

Pour la plupart des auteurs, les valeurs d'angles retenues pour décrire le mouvement sont mesurées au moment où se réalisent des événements caractéristiques (ex : planté du bâton d'attaque, pose du ski d'attaque, ...) ; il s'agit alors **d'angles instantanés.**

Angles ayant une forte corrélation avec la performance (vitesse de cycle et/ou vitesse moyenne de course)

- Orientation des skis par rapport à l'axe de déplacement et leur inclinaison par rapport à la surface de la neige.
- Inclinaison latérale des bâtons par rapport à la verticale (plan frontal et sagittal).
- Articulations des genoux et des coudes.
Articulation du buste par rapport à l'horizontal (plan sagittal).

Gregory (1994) montre que selon le niveau de performance des skieurs de fond en 2 temps, **l'angle minimum obtenu au cours d'un cycle pour le**



genou controlatéral(*) au cours du cycle évolue de manière significative. **Plus cet angle est faible plus la performance est importante.** L'observation portée sur **l'angle minimum du genou d'attaque** oriente cet auteur sur la même conclusion malgré des différences entre les groupes non significatives. Smith (1989) fait état de la même relation en établissant une différence entre les hommes et les femmes (angle minimum des hommes inférieur à celui des femmes).

La pente demeure un critère faisant évoluer ces paramètres de manière significative. L'angle minimum des genoux décroît avec l'augmentation du degré de pente. La vitesse de cycle a quant à elle, une incidence inverse : son augmentation réduit l'angle minimum des genoux.

Quelques auteurs (Candau ,1994 ; Perrey et al. , 1998 ; Rapp et al., 2000) mettent en avant l'existence d'un **cycle étirement-raccourcissement** des muscles extenseurs des membres inférieurs et supérieurs (Smith, 1995 ; Rapp, 2000). Ce phénomène s'exprime par une flexion prononcée et rapide du genou entraînant un allongement des muscles extenseurs contractés (contraction excentrique). Ce processus permettrait d'emmagasiner de l'énergie dite élastique qui serait restituée lors de la contraction concentrique qui suit immédiatement après. Le phénomène repris par le modèle de Shorten (1987) décrivant les caractéristiques élastiques du muscle qui, dans certaines conditions, **augmenterait la capacité de production de « force ».**

Selon les mêmes auteurs, un cycle étirement raccourcissement des muscles extenseurs des genoux serait observable sur toutes les techniques de pas de patineur avec des amplitudes de flexion précédant l'extension plus ou moins importantes.

La mise en évidence de ce mode de fonctionnement musculaire rappelle les

(*)Les segments (bras, jambes, bâtons, skis...) seront appelés de côté « d'attaque » s'ils se trouvent du côté où l'action de propulsion bras et jambe a été superposée. Par extension le côté opposé se nomme « controlatéral ». Ainsi le côté d'attaque peut être indifféremment le côté droit ou gauche du corps du skieur.

résultats de l'étude de Bosco (1992) au sujet des valeurs obtenues par les meilleurs skieurs de fond italien à l'indice de Bosco qui compare l'élévation atteinte par l'athlète lors d'un saut précédé d'un contre mouvement (counter movment jump) et celle lors d'un saut effectué à partir d'une position basse (squat jump). Dans cette étude, les skieurs de fond atteignaient des valeurs comparables à des spécialistes de saut (athlètes, volleyeurs).

En ce qui concerne l'évolution des **angles des membres supérieurs**, Gregory (1994) montre que l'angle minimum du coude controlatéral atteint lors du cycle constitue un critère permettant de discriminer le niveau de performance. Les meilleurs skieurs obtiennent des angles de flexion de cette articulation plus réduits que chez les moins bons.

L'angle minimum du coude d'attaque ne constitue pas un critère significativement discriminant.

A noter que deux études font référence à l'existence du cycle étirement raccourcissement au niveau des membres supérieurs (Smith, 1996 ; Coulmy, 2000).

L'angle minimum du tronc (angle jambe-tronc) est, selon les auteurs un paramètre qui distingue les meilleurs skieurs ; ceux ci amenant le tronc à une position plus fléchie que les autres concurrents. Ce constat a été fait chez les filles (Ruby, 1995) et chez les hommes (Gregory)

◆ COMPOSANTE PROPULSIVE DES FORCES

Les différentes études sur la participation des membres sup. et membres inf. à l'avancement montrent que (ex. pour le 2 temps) :

- Les forces appliquées sur les bâtons participent pour 66 % à la propulsion (forces dans l'axe de déplacement du CM) alors que les jambes ne participent qu'à 34 %.
- A l'inverse, la composante latérale des forces appliquées par les jambes est de



l'ordre de 87 % (contre 13 % seulement pour les bâtons).

En somme, les jambes interviennent à l'avancement selon le principe du « tire bouchon », c'est à dire qu'il faut s'appuyer sur le coté pour avancer. Les bâtons fonctionnent selon le principe du « clou » : pour avancer, il faut que les forces soient exercées dans l'axe.

En skating, les bâtons participant de manière plus effective à la propulsion, il convient de les orienter au plus tôt dans la direction du déplacement (Borowski, Smith, Coulmy). Une étude récente (Boissière, 2001) montre que le 1 temps n'est pas, pour une même vitesse, aussi économique que le 2 temps combiné du fait, selon l'auteur, d'une moins bonne orientation des bâtons...

◆ POSITIONS DES COUDES

L'écartement des coudes lors de la poussée de bras correspond souvent à une coordination segmentaire facilitant la poussée. Différentes études réalisées sur une poussée simultanée exécutée avec des poignées à pronation (qui accentuent l'écartement naturel des coudes) montrent que le transfert de force est meilleur avec une telle position (Komi, 1992).

L'explication pourrait venir du fait que cette position réduit le moment de force développée par les articulations (réduction de la distance entre la main et l'épaule) et permet de réaliser le mouvement de manière plus rapide (accélération angulaire plus grande). Cette stratégie gestuelle est à rapprocher du type de levier mis en œuvre lors du mouvement d'extension du coude (levier inter appui) qui correspond à un type de levier à faible avantage mécanique dont la fonction est d'augmenter rapidement la rapidité du mouvement...

De plus rappelons que c'est en créant des séquences d'accélération dont la synergie doit être optimale que l'on fabrique la somme des forces extérieures et que les différentes études montrent qu'une durée réduite de cycle de poussée de bâtons (vitesse gestuelle lors de la poussée importante) est corrélée à la performance.

◆ NOTION DE FLUIDITE DU GESTE

Les consignes techniques liées à la nécessité d'avoir une vitesse la plus constante possible au cours d'un cycle impliquent d'avoir la possibilité d'utiliser des observables de terrain. La notion de « fluidité » du geste prend ici toute sa valeur. En effet, si la tendance de l'entraîneur est bien souvent de se centrer sur l'évolution précise de tel ou tel segment, il apparaît nécessaire de compléter l'observation avec une image « globale » du système « skieur + équipement ». Smith (1994) a d'ailleurs souligné l'intérêt d'une évolution globale régulière du skieur. Cela revient à évaluer les à-coups existants au cours du cycle de mouvement. Et s'il n'est pas question de confondre trajectoire de centre de masse et évolution globale de la silhouette du skieur, ce type de démarche reste un observable simple à mettre en place pour apprécier la régularité intra-cyclique de la vitesse du skieur.

L'utilisation de carte factorielle comme outil de traitement de données permettant d'obtenir une vision globale et objective du comportement moteur du skieur (Ruby, 1995, Coulmy, 2000) devrait constituer un outil supplémentaire pour l'entraîneur pour apprécier la fluidité gestuelle du skieur.

◆ ROTATION DES EPAULES ET DU BASSIN

La plupart des études récentes axées sur la gestuelle en skating montrent que les meilleurs skieurs ont peu de rotation du tronc et du bassin selon l'axe longitudinal (plan transversal : vu de dessus). De telles orientations ne sont en tout cas pas corrélées avec la vitesse de cycle. Ceci s'explique par la forte inertie du buste qui, pour se mettre en mouvement et pour arrêter son mouvement de rotation nécessite une forte énergie et peut impliquer par le jeu des liaisons inter-segmentaires une composante de rotation aux skis, néfaste à la poussée et la glisse.



◆ TRAJECTOIRE DE LA JAMBE LIBRE ET RETOUR DES BRAS

Il apparaît que le « pas en avant » n'est pas très marqué chez les meilleurs mondiaux. Ceux-ci privilégient un geste plus latéral et surtout avec la fatigue (le lacet latéral décrit par le centre de masse ne correspond pas à une grande dépense d'énergie mécanique mais c'est cependant un facteur qui réduit l'efficacité à court terme (\neq économie)). Leppävuori rappelle par ailleurs que plus le pied est en avant plus il y a risque que la vitesse du CG diminue au cours du cycle.

- L'utilisation du transfert d'énergie issue des bras lors du pendule de retour a été bien décrit par les différentes études. L'existence de ce même phénomène pour les jambes apparaît chez quelques skieurs : « ramené » de la jambe libre légèrement par l'arrière et de manière dynamique. Sous réserve de limiter les rotations de hanches, ce mouvement peut, mécaniquement, améliorer le maintien d'une vitesse constante au sein du cycle. Aucune étude ne l'a cependant démontré

◆ OUVERTURE RAPIDE DES ARTICULATIONS

Comme cela a été rappelé plus haut, au cours de l'impulsion, c'est en créant des séquences d'accélération (a_i) dont la synergie doit être optimale, que l'on fabrique la somme des forces extérieures.

soit :

$$\sum \vec{F}_{ext} = m_i a_i$$

en d'autres termes, pour créer de grandes forces de réaction, il faut de grandes accélérations des différents segments et donc être capable de faire rapidement monter la vitesse angulaire des articulations. Les composantes de force devront bien sûr être orientées de manière propulsive pour que les impulsions soient efficaces.

◆ ADAPTATION FINE DES DIFFÉRENTES TECHNIQUES (1 TEMPS, 2 TEMPS, 2 TEMPS COMBINÉ)

Selon le principe d'obtenir une vitesse la plus grande et la plus uniforme possible au cours du cycle, une plus grande variété de techniques de patinage a vu le jour de manière empirique (1 temps, 2 temps, 2 temps combiné). Chaque technique permet, en fonction des résistances à l'avancement (pente, glisse, forces aérodynamiques) de créer et répartir plus ou moins les actions motrices pour éviter une décélération du centre de masse.

De la même manière, l'adaptation de la coordination gestuelle pour une même technique selon le terrain permet d'optimiser plus finement cette adaptation de vitesse. Si l'organisation générale du geste est la même (1 temps, 2 temps, ...) les coordinations fines peuvent différer. C'est également ce que nous avons trouvé quand il a fallu comparer les trois disciplines nordiques pour une même technique : les contraintes physiques et biomécaniques n'étant pas les mêmes (poids de la carabine, caractéristiques élastiques musculaires probablement différentes, ...) chaque discipline à sa propre organisation dans une même technique : il existe le 2 temps du biathlon, celui du fondeur, etc...

◆ COMPARAISON BIATHLON-FOND-COMBINÉ NORDIQUE :

Peu d'étude font état de la comparaison entre les différentes disciplines nordiques (ski de fond, biathlon, combiné nordique).

Deux études ont porté sur une analyse biomécanique spécifique du biathlon (Frederick, 1987 et Rundell, 1998) et une (Coulmy, 2000) sur l'analyse comparative du 2 temps dans les trois disciplines lors de Coupes du Monde.

Un autre auteur (Millet, 1998) rapporte qu'un poids supplémentaire sous forme de gilet lesté n'engendre pas de coût énergétique de rotation supplémentaire mais plutôt d'énergie



potentielle et de transport. Dans ce cas, le cycle étirement détente ne serait pas particulièrement modifié.

De manière plus spécifique, le port de la carabine dans le dos semble réduire la longueur du cycle (l'amplitude peut, en effet, être la cause d'une grande variabilité de vitesse horizontale dans le cycle), et augmenter le coût dû à l'énergie potentielle et cinétique de transport (Frederick, 1987 ; Coulmy 2000) ; la plus grande source de coût énergétique total du transport de la carabine est consécutive aux variations de vitesse horizontale au cours du cycle (et donc de l'énergie cinétique de

transport) ; ce qui est vrai pour tout type de locomotion mais ce phénomène est exacerbé par le port de la carabine.

Selon ce même auteur, les femmes semblent avoir un coût énergétique relatif plus important du fait de la carabine que les hommes. Il existe une grande variabilité dans la comparaison du coût énergétique des biathlètes : certains skieurs seraient plus économiques que d'autres dans le port de la carabine (Rundell, 1998, Coulmy, 2000)

En résumé :

Selon les différents auteurs, pour réduire le coût énergétique du port de la carabine :

- ◆ ↘ la masse de la carabine de façon optimum (dans le respect du règlement et des exigences techniques liées au tir)
- ◆ Centre de Masse carabine : près de l'aire lombaire mais forte variabilité (Cryer, 1990).
- ◆ ↗ symétrie du portage (Legg (étude chez les militaires), 1985).
- ◆ ↘ variations d'énergie cinétique par une vitesse intra cyclique la plus uniforme possible.
- ◆ Rapprocher le centre de masse de la carabine du centre de masse du skieur.
- ◆ ↘ déplacements verticaux de la carabine durant le cycle (en réduisant les mouvements de buste essentiellement).



Synthèse des résultats de l'étude F.F.S sur le pas de patineur 2 temps (Coulmy 2000)

Les résultats présentés ci après sont issus de l'étude menée par la F.F.S au cours de Coupe du Monde dans chacune des trois disciplines nordiques.

NOTE : Nous attirons le lecteur sur le fait que ces données sont issues de l'observation en compétition de haut niveau et qu'en conséquence, la cinématique de la gestuelle décrite ici ne peut pas servir de « modèle gestuel » applicable à tout type de population et à n'importe quel moment.

L'objectif d'une telle étude est par contre de mettre en avant des phénomènes gestuels (étude phénoménologique) qui interviennent dans les différents disciplines afin de mieux comprendre les principes d'actions motrices.

RESULTATS :

Les tableaux 1 et 2 en annexe présentent les valeurs minimales, maximales et l'amplitude totale de chaque angle pour chaque discipline.

Les biathlètes ont tendance à obtenir des **valeurs d'angles de membres inférieurs et de membres supérieurs significativement ($p < 0.05^{(*)}$) plus importants** durant la totalité du cycle.

Le **biathlon** présente également une **amplitude totale plus faible** que les deux autres disciplines tant au niveau **du genou d'attaque que du genou controlatéral** ($p = 0.013$).

Il en est de même pour **l'amplitude totale de flexion du buste, qui, chez les biathlètes, est plus faible** que chez les autres skieurs même si ce résultat n'est pas significatif ($p > 0.05$).

⇒ Les comportements observés au niveau des membres inférieurs et du buste peuvent être rapprochés des études portant sur l'étude du geste en biathlon. Si Frederick (1987) et Rundell (1998)

recommandent de limiter les déplacements verticaux de la carabine du fait du surcoût d'énergie potentielle que cela occasionne, la limitation d'amplitude des l'angle des genoux et du buste décrite ici correspondrait à une stratégie (consciente ou inconsciente) de la part des biathlètes afin de limiter les variations d'altitude de l'ensemble du buste et de la carabine.

Les observations issues de l'étude menée par la F.F.S montrent que le **cycle étirement raccourcissement est d'amplitude moins importante en biathlon qu'en combiné nordique et sensiblement égale à celle du ski de fond.**

La figure 1 présente la variation angulaire du sujet C011 (groupe 1 du combiné nordique) avec le cycle étirement raccourcissement (CER). La figure 2 montre la correspondance d'un tel mouvement avec l'activité électrique des muscles extenseurs.

Des variations angulaires rapides lors de la poussée des bras et l'utilisation d'un cycle étirement raccourcissement au niveau des coudes sont des indices qui tendent à montrer l'importance donnée par les biathlètes à la poussée de bras et ainsi de compenser éventuellement la limitation d'amplitude du buste et des genoux.

Cette stratégie d'utilisation préférentielle de l'action motrice des bras, est à rapprocher des résultats de Smith (1989) qui indiquent qu'en ski de fond, les forces propulsives en 2 temps sont dues à 66 % à la force de réaction des bâtons contre 34 % pour l'action de patinage des skis.

(*) En statistique, un résultat est reporté avec l'intervall de confiance qui peut être accordé à celui ci. Un test statistique vérifie si les résultats sont significatifs. Une valeur P inférieure à 0.05 revient à avoir un risque d'avoir un résultat non significatif réduit à 5 %.

Pour plus d'information, consulter : <http://www.sportsci.org/resource/stats/index.html>



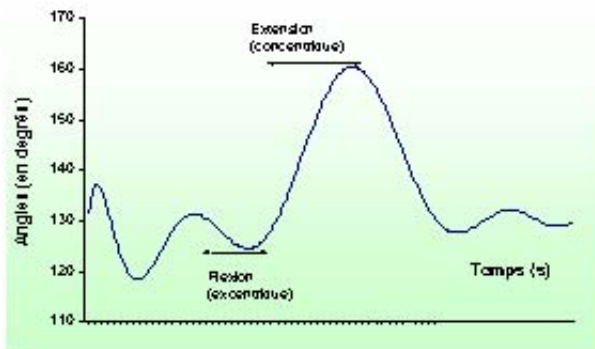


Figure 1 : Exemple de variation angulaire du genou d'attaque pour OGIWARA (Jap) Chaux neuve 1997

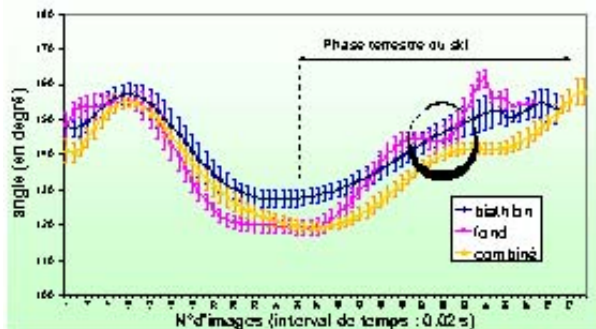


Figure 3 : variation angulaire du genou controlatéral pour les trois disciplines.

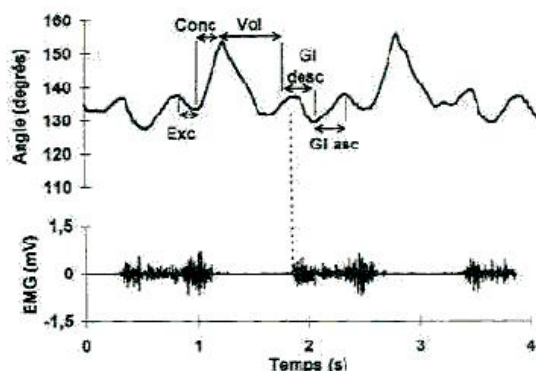


Figure 2 : Variation angulaire du genou associée à l'activité EMG des muscles extenseurs du genou en pas de patineur 2 temps en ski à roulettes (d'après Perrey et al. 1998).

La vitesse angulaire du genou est également particulièrement élevée par rapport au combiné nordique.

Les fondeurs semblent répartir davantage le travail des **jambes et des bras** que les biathlètes, l'amplitude moyenne des articulations ainsi que la vitesse angulaire permet moins de différencier les membres supérieurs des membres inférieurs. De même **l'amplitude des mouvements du buste** est légèrement plus accentuée chez le fondeur que chez le biathlète et le combiné (non significatif).

Les skieurs de ski de fond spécial

présentent une tendance à skier avec des **angles minimum relativement plus fermés** que le biathlon au niveau des **membres inférieurs** durant les phases d'impulsion avec une **amplitude angulaire des genoux plus grande** ($p = 0.03$).

Le cycle étirement-raccourcissement, du genou controlatéral lors de la phase terrestre du ski CL est davantage marqué chez les fondeurs que chez les autres skieurs (voir zone encerclée sur figure 3).

Les skieurs de combiné nordique

montrent une tendance à skier avec des **amplitudes angulaires de membres inférieurs** plus importantes qu'en biathlon mais avec articulations des **membres supérieurs plus fléchis** que les deux autres disciplines ($p = 0.03$) et ce de manière marquée pour les épaules pendant le retour aérien des bâtons (figure 4).

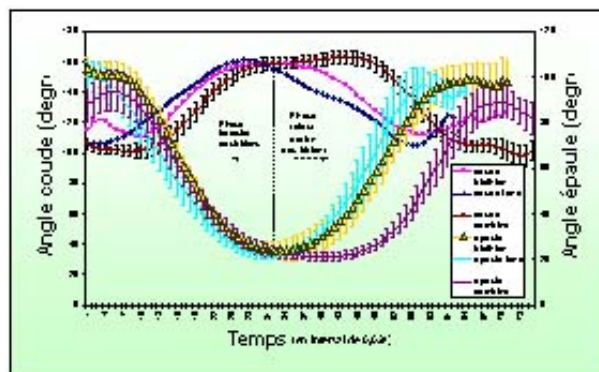


Figure 4 : Evolutions angulaires des épaules et coudes d'attaque pour les trois disciplines.



L'observation de l'évolution de l'angle du buste par rapport à l'horizontale (dans le plan sagittal) indique que **l'utilisation du buste est moins marquée qu'à ski de fond** mais de manière non significative statistiquement.

L'évolution de l'angle du genou d'attaque montre cependant **une amplitude plus marquée du cycle étirement raccourcissement (CER)**. L'amplitude de ce cycle est en moyenne de 10 degrés ce qui est supérieur aux valeurs moyennes de la littérature mesurées chez des fondeurs dans la même technique (Candau, 1994 ; Perrey et al., 1998 ; Lindinger et al., 2000).

Ce comportement pourrait être une conséquence de la logique interne de cette discipline qui, du fait de l'épreuve de saut, amène ces skieurs à suivre un volume d'entraînement important à base de sauts. Or, selon Pousson (1990), les athlètes s'entraînant dans ce registre d'exercice sont susceptibles d'avoir une proportion de fibres rapides importantes et donc une compliance musculaire importante^(*). Cette caractéristique d'élasticité musculaire pourrait correspondre à la possibilité d'un contre-mouvement plus ample lors de l'impulsion même si ce comportement n'est pas forcément associé à un rendement optimal du CER (Thys et al., 1975).

Ainsi, si le CER dépend en grande partie des capacités élastiques du muscle (Belli, 1992), une raideur accrue du système musculo-tendineux est significativement corrélée à la performance à contraction concentrique et isométrique (Wilson et al., 1994).

Une étude récente (Bisciotti et al., 2000) rapporte qu'il n'y a pas de différence significative de la raideur musculaire du quadriceps entre un groupe de skieurs alpins et un groupe de skieurs de fond. Cette même étude montre cependant une différence significative ($p < 0.001$) de la raideur du triceps sural ; plus importante chez les fondeurs que chez les alpins. L'évaluation des mêmes caractéristiques pour chacune des disciplines nordiques abordées dans nos travaux permettrait de

(*) Rappelons que la compliance est décrit comme la capacité à emmagasiner de l'énergie potentielle élastique alors que la raideur correspond à la capacité à restituer l'énergie élastique.

faire le lien entre caractéristiques musculaires et cinématiques du geste à ski de fond.

Pour une comparaison intra disciplinaire

Les comparaisons inter individuelles réalisées à partir de résultats statistiques et des observations sur l'évolution des angles 3D montrent que :

En biathlon

- Les skieurs les moins rapides (groupe 2) utilisent une amplitude angulaire du buste plus importante que le groupe 1. Ce résultat confirme que les meilleurs biathlètes ne favorisent pas les **mouvements du buste**.
 - La tendance générale de la discipline à ne pas utiliser des amplitudes des genoux importantes mais plutôt **de plus grandes vitesses angulaires** lors de l'extension des genoux plus rapides.

En ski de fond

Le groupe des meilleurs skieurs a une **flexion de buste moins accentuée** que le groupe des moins bons (angle minimal du buste par rapport à l'horizontal plus grand). Les valeurs d'étendue de déplacement du tronc du groupe 1 correspondent aux valeurs de la littérature (Gregory, 1994 ; Smith, 1989, 1994 ; Ruby, 1995) c'est à dire qu'elles évoluent entre 23° et 28°. Il apparaît cependant, aux vues des études réalisées, que **les femmes utilisent en moyenne davantage le buste que les hommes** (29° environ de moyenne pour les femmes contre 25° pour les hommes). Une plus grande utilisation des masses musculaires de la ceinture pelvienne pourrait compenser des capacités de force ou d'endurance des membres supérieurs moins importantes.

De la même manière que pour le biathlon, le groupe 1 à tendance à avoir des amplitudes de genou d'attaque moins importantes que le groupe 2. Weineck (1992) précise, à cet effet, que de manière expérimentale, l'angle correspondant au développement de la force maximale pour les extenseurs des jambes est de l'ordre de 110° à 120°. Au début du mouvement d'extension du genou d'attaque, les fondeurs et les combinés nordiques se



situent de manière plus proche de ces valeurs que les biathlètes tous groupes confondus.

En combiné nordique

L'utilisation d'une amplitude plus grande lors de la **flexion du buste** et de l'ensemble des **membres inférieurs** caractérise les meilleurs skieurs. Ce constat est concomitant d'une variation d'énergie potentielle au cours du cycle plus importante que les moins bons skieurs de combiné (47 contre 32 joules).

Cependant les valeurs maximales atteintes au niveau de la vitesse angulaire lors de la poussée de bâtons sont plus importantes pour le groupe 2 que pour le groupe 1. La **dissymétrie** qui caractérise le groupe 2 sur ce paramètre correspond cependant à un indice de moindre performance selon Ruby (1995) qui souligne que la similitude des déplacements segmentaires cotés d'attaque et controlatéral semble être un critère corrélé à la performance en pas de patineur.

Le CER important des deux genoux qui caractérise l'ensemble des skieurs de combiné nordique est également un critère qui distingue le groupe 1 du groupe 2. La vitesse angulaire de l'extension des meilleurs est d'ailleurs concomitante de la présence d'un CER. Ces résultats vont dans le même sens que l'hypothèse déjà formulée et selon laquelle les skieurs de combiné nordique utilisent une plus grande amplitude de CER.

De manière générale, les skieurs de combiné tendent à privilégier les amplitudes d'actions des membres inférieurs.

◆ DONNEES COMPLEMENTAIRES DE PHYSIOLOGIE ET IMPLICATIONS PRATIQUES (MUSCULATION, PREPARATION PHYSIQUE ET TECHNIQUE) :

Au regard des résultats portant sur la comparaison des trois disciplines nordiques, il semble intéressant de donner un prolongement à la réflexion en termes d'application à l'entraînement.

A propos des disciplines nordiques, les travaux réalisés ici montrent que le geste du pas de patineur 2 temps est susceptible de subir des modifications en fonction des conditions dans lesquelles il est réalisé. En effet, les paramètres du skieur mais aussi de l'environnement sont à prendre en compte avant de proposer des orientations techniques dans le but de rendre la gestuelle performante et/ou économique.

Dans le cadre du ski de fond, il peut s'avérer intéressant de faire prendre conscience à l'individu des différents termes composants les énergies cinétiques de transport mais aussi de gesticulation.

Quelques situations pédagogiques **faisant varier tour à tour l'intensité de certains termes de l'énergie cinétique** peuvent amener à cerner de manière plus concrète la signification de l'énergie cinétique interne.

Skier à allure standardisée avec des masselottes au bout des segments bras et jambes puis avec la même charge totale répartie sur le buste n'engendre pas les mêmes sensations physiques. En effet, pour une séquence de geste à rythme comparable, une charge placée à l'extrémité distale du segment augmente davantage les travaux des forces internes que la même charge placée de manière répartie autour du buste (l'énergie de gesticulation peut doubler avec 1 kg supplémentaire dans chaque main).

De même, skier avec une amplitude verticale accentuée et avec un gilet lesté augmente sensiblement l'énergie potentielle produite. Ainsi, si le rendement de la machine humaine n'est pas connu, la sensation d'effort que procure des situations évolutives permet d'apprécier les conséquences des phénomènes physiques.

Les consignes techniques liées à la nécessité d'avoir une **vitesse de centre de masse la plus constante possible** au cours d'un cycle nécessite d'avoir la possibilité d'utiliser des « observables » de terrain (il n'est pas possible de situer le centre de masse sans analyse biomécanique). Si aucune corrélation statistique n'a été calculée entre la production d'énergie et l'évolution d'angles segmentaires, il semble toutefois que pour toute discipline nordique confondue, **la notion de «fluidité»** du geste prend ici toute sa valeur. En effet, si la tendance de



l'entraîneur est bien souvent de se centrer sur l'évolution précise de tel ou tel segment, il apparaît nécessaire de compléter l'observation avec une image «globale» du système «skieur + équipement». Smith (1994) a d'ailleurs souligné l'intérêt d'une évolution globale régulière du skieur. Cela revient à évaluer les à-coups existants au cours du cycle de mouvement. Et s'il n'est pas question de confondre trajectoire de centre de masse et évolution globale de la silhouette du skieur, ce type de démarche reste un « observable » simple à mettre en place pour apprécier la régularité intra-cyclique de la vitesse du skieur.

Les biathlètes présentent dans l'ensemble des amplitudes d'angles des membres inférieurs faibles et des vitesses angulaires de membres supérieures importantes (au même titre que les fondeurs). Certes l'impulsion ne peut être définie par la stricte évolution des angles articulaires : c'est par la synergie des moments des forces internes développées au niveau des articulations que la somme optimale des forces extérieures est créée pour déplacer le sujet.

Cependant les observables liés à **l'amplitude et la vitesse angulaire des segments au cours de l'appui, correspondent à des critères discriminants de la performance** (Smith, 1989, 1994 ; Ruby, 1995 ; Kirvesniemi, 1996).

Aussi, les constats réalisés chez les biathlètes confirment le **rôle important que peuvent jouer les bras dans la propulsion en ski nordique** (Millerhagen, 1983 ; Pierce, 1987 ; Street, 1988 ; Ng et al., 1988 ; Smith, 1990 ; Gaskill, 1992, Millet, 1998) et démontrent **l'intérêt des capacités de force et d'endurance des groupes musculaires concernés.**

Les faibles niveaux de variations et de vitesses angulaires des membres supérieurs caractéristiques des combinés laissent supposer que les actions motrices des bras ne soient pas privilégiées.

Or plusieurs travaux portant sur le style classique ont montré l'importance d'un développement concomitant de la capacité de consommation maximale d'oxygène des membres supérieurs lors

d'un exercice en ski de fond (Astrand et Saltin , 1961 ; Sharkley et Heidel, 1981 ; Millerhagen, 1983). Une répartition de l'effort au niveau des membres inférieurs et supérieurs permet d'effectuer un travail supérieur ou de maintenir une puissance donnée plus longtemps que lors d'un effort réalisé par les membres inférieurs ou supérieurs seuls.

L'amélioration des capacités de vitesse de contraction et d'endurance de force en ski de fond constitue un sujet d'étude scientifique à développer.

Certains travaux indiquent que le mode d'entraînement peut être modulé selon la discipline. Les biathlètes, soucieux de limiter les mouvements de la carabine (Rundell, 1998), doivent mettre l'accent sur les qualités musculaires et d'endurance des membres supérieurs tout en favorisant la capacité à développer de la force de manière, prolongée dans le temps et avec de faibles amplitudes au niveau des membres inférieurs et du buste.

Cette remarque ne reste cependant pas spécifique au biathlon. En effet, une étude récente (Mahood et coll, 2001) a montré que les capacités physiques du haut du corps (Puissance aérobie et anaérobie) sont hautement liées à la performance en ski de fond.

Les conséquences positives pour l'endurance de planifier des exercices de musculation ont par ailleurs été confirmées par plusieurs études (Dudley et Djamil, 1985 ; Hunter, 1987, Kiröläinen et al., 1991 ; Marcinik, 1991 ; Hickson et al., 1988 ; Paavolainen et al., 1991 et 1999,).

Les skieurs de combiné nordique, au regard de nos résultats, semblent privilégier les amplitudes des membres inférieurs au détriment de celles des membres supérieurs. La logique interne de leur discipline amène les « fondeurs-sauteurs » à mettre davantage l'accent sur une prise de poids la plus faible possible : rappelons que d'un point de vue balistique 1 kg de poids de corps supplémentaire correspond à 1 m de performance en moins en saut (Tavernier, 1994a)...

Le développement des capacités de force programmé en parallèle au travail aérobie devra dans l'ensemble s'effectuer à partir des facteurs nerveux (Komi, 1986, Kiröläinen et al., 1991) mais en respectant une variation des modes d'entraînement



tout au long de l'année (mode de contraction, type des charges...). Nous vous invitons à vous reporter au DTN info portant ce thème (« *l'entraînement de force en ski nordique : revue de questions...* » Juin 2002, éditions CSS/FFS).

Bibliographie principale

- Bilodeau B, Rundell K.W, Roy B and coll. (1996) Kinematics of cross-country ski racing, Med. Sci. Sports Exerc. 28 (1) : 128-138.
- Coulmy N (2000) Contribution à l'analyse cinématique et énergétique du pas de patineur en ski nordique. Application à l'étude comparative des disciplines nordique, de systèmes de modélisations et d'études de cas. Thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier Grenoble.
- Frederick K (1992) Mechanical constraints on nordic ski performance. Medecine and science and sports and exercise.april 92 1010-1014.
- Gregory RW, Humphreys S E, Street GM (1994) Kinematic analysis of skating technique of Olympic skiers in the women's 30-km race. Journal of applied biomechanics 10 : 382-392.
- Komi (1992) congrès international olympique, Grenoble.
- Rundell KW, Leon Szmedra (1998) Energy cost of rifle carriage in biathlon skiing, Medicine and science in sports and exercise vol 30 4 : 570-576.
- Millet G., S Perret, R. Candau et coll. (1998c), External loading does not change energy cost and mechanics of roller ski skating, Eur.J.Appl. Physiol. 78 (3) : 276-282.
- Millet G., R Candau et J.D. Rouillon (1997), Cycle length and cycle rate in roller skiing : relationships with performance and maximal lower limb power, JHMS 32 : 267-281.
- Minetti AE et al. (2000) Individual economy and general mechanics in cross country skiing, Abstracts of 2nd International Congress on Skiing and Science, St Christoph. Arlberg, pp .96-97.
- Rapp W, Lindinger S, Birklbauer J, Kösters A, Raschner C, Wagner H, Gollhofer A, Müller E (2000), Evidence of stretch-shortening cycle in cross country skiing, Abstracts of 2nd International Congress on Skiing and Science, St Christoph. Arlberg, pp .100-101.
- Ruby A (1995) Contribution à la méthodologie de l'analyse de la performance sportive ; application à la situation de compétition en ski de fond. Thèse de doctorat de l'université Claude Bernard Lyon 1.
- Rundell KW, L Szmedra (1998), "Energy cost of rifle carriage in biathlon skiing", Med Sci Sports Exerc. 30(4) : 570-6.
- Smith GA, Heagy SH (1994) Kinematic analysis of skating technique of olympic skiers in the men's 50-km race, Journal of applied biomechanics, 10 : 79-88.

Cette valeur varie toujours entre - 1 et +1. Le coefficient de corrélation r est une quantité sans dimension.

Si la valeur r est presque nulle ou nulle, il est possible de dire tout au plus qu'il n'y a pas de corrélation linéaire entre les variables. Cependant cela ne signifie pas qu'il n'y ait pas de corrélation puisqu'il peut y avoir en fait, une forte corrélation non linéaire entre les variables. Ceci montre qu'un fort coefficient de corrélation (c'est à dire proche de 1 pour une évolution des deux séries de données dans le même sens ; ou - 1 pour une évolution en sens inverse) n'indique pas nécessairement une dépendance directe des variables. En effet, il peut se faire qu'il existe une forte corrélation entre le nombre de forfaits de ski vendus chaque année et le nombre de naissance sur la même période. Un tel exemple correspond à des corrélations fausses ou trompeuses. Des tests statistiques existent pour déterminer les intervalles de confiance de valeurs trouvées.

• Energie :

L'énergie est une propriété des corps responsable de tous les phénomènes. Elle nous apparaît sous forme de travail ou de chaleur. Les différentes formes d'énergie, introduites dans les différentes parties de la physique, dépendent de paramètres ou variables d'état, comme la vitesse et l'altitude pour l'énergie cinétique et l'énergie potentielle que l'on étudie en mécanique. L'énergie interne est alors l'énergie des corps due à la température (appelée autrefois énergie calorifique ou thermique), à la pression, mais aussi à la structure même des corps (appelée autrefois énergie chimique).

L'énergie s'exprime en joule.

• Energie potentielle :

L'énergie potentielle (E_p) est l'énergie due à la gravité et en conséquence, elle augmente avec la hauteur du corps par rapport au sol ou par rapport à un autre support de référence.

$$E_p = m g h$$

Où m = masse, kg
 g = accélération de la gravité, 9,8 m/s²
 h = hauteur du centre de masse, en m.

• Energie cinétique :

Il existe deux formes d'énergie cinétique (E_c). Celle due à la vitesse de translation du corps étudié (E_{ct}) et celle due à la vitesse de rotation du corps (E_{cr}).

$$E_{ct} = \frac{1}{2} m v^2$$

Où m = masse. En kg
 v = vitesse de translation du centre de masse. En m/s

$$E_{cr} = \frac{1}{2} I \omega^2$$

Où I = moment d'inertie, en kg.m² ω = vitesse de rotation du segment, en rad/s.

Notons que ces deux énergies augmentent quand la vitesse s'accroît.

Le plus bas niveau d'énergie cinétique (= 0) est obtenu lorsque le corps étudié est au repos.

• Energie mécanique totale :

L'énergie mécanique totale (E_m) est la somme des trois types d'énergie décrit jusqu'alors, soit

LEXIQUE

• Amplitude :

Dans notre article, l'amplitude fait référence à la distance parcourue par le centre de masse durant un cycle de mouvement.

• Coefficient de corrélation (r) :

Cette mesure permet d'apprécier la relation entre l'évolution de deux séries de donnée.



$$E_m = E_p + E_{ct} + E_{cr}$$

- **Fréquence :**

Taux de répétition, par unité de temps, de la séquence élémentaire d'un phénomène périodique, c'est-à-dire qui se reproduit à l'identique de façon régulière.

On appelle période ou cycle le laps de temps T qui sépare l'instant où commence une de ces séquences élémentaires (ex. début du cycle planté du bâton droit) et celui qui marque le début de la séquence suivante, identique à la précédente (le planté du bâton droit) . La fréquence est alors le nombre de périodes par unité de temps : $f = 1/T$; on la mesure en hertz (symbole : Hz), nombre de périodes par seconde.

Toute reproduction, même partielle de ce document sans autorisation du CSS de la Fédération Française de Ski

Toutes les références citées dans ce document sont disponibles auprès du Conseil Sportif et Scientifique de la FFS.

INFORMATION :

Les documents « DTN infos » édités par le Département Sportif et Scientifique sont disponibles en téléchargement sur le site de la F.F.S : <http://www.ffs.fr/>.

Pour plus d'information :

Nicolas Coulmy

(nicolas.coulmy@ifrance.com)

ou

(css@ffs.fr)

*Fédération Française de Ski
Département Sportif et Scientifique
50 rue des Marquisats
BP 2451
74011 ANNECY cedex*



ANNEXES

Les tableaux 1 et 2 présentent les valeurs minimales, maximales et l'amplitude totale de chaque angle (en degré) pour chaque discipline et chaque groupe de skieur en 2 temps groupe 1 : Haut de classement en coupe du monde et groupe 2 : fin de classement coupe du monde (Coulmy, 2000)

Tableau 1

	biathlon			fond			combiné		
	min	max	amplitude	min	max	amplitude	min	max	amplitude
genou attaque	127	156	29	119	154	35	121	156	36
genou controlatéral	127	157	30	119	161	42	120	158	38
épaule attaque	24	104	80	21	100	79	21	94	73
épaule controlatéral	32	83	51	31	82	52	24	77	53
hanche attaque	106	147	41	98	143	45	103	152	49
hanche controlatérale	101	149	49	98	158	60	96	154	58
coude attaque	111	159	48	105	161	56	98	163	65
coude controlatéral	84	158	74	72	161	89	84	160	76
buste	70	48	23	73	45	28	77	48	29



Tableau 2

		min	max	ampl			min	max	ampl			min	max	ampl
biathlon groupe 1	genou attaque	119	154	35	groupe 1 fond	genou attaque	121	155	33	groupe 1 combiné	genou attaque	119	154	35
	genou controlatéral	129	155	26		genou controlatéral	116	160	44		genou controlatéral	118	163	45
	épaule attaque	29	100	71		épaule attaque	20	101	80		épaule attaque	21	104	82
	épaule controlatéral	32	91	59		épaule controlatéral	27	88	61		épaule controlatéral	24	88	65
	hanche attaque	102	147	46		hanche attaque	99	140	41		hanche attaque	97	150	53
	hanche controlatéral	102	148	47		hanche controlatérale	100	161	60		hanche controlatérale	89	158	70
	coude attaque	111	160	49		coude attaque	60	157	97		coude attaque	94	160	66
	coude controlatéral	77	157	81		coude controlatéral	72	165	93		coude controlatéral	103	160	57
	buste	48	69	21		buste	47	74	27		buste	44	75	31
	genou attaque	126	158	31		genou attaque	115	157	42		genou attaque	122	159	37
biathlon groupe 2	genou controlatéral	126	159	33	genou controlatéral	121	164	43	genou controlatéral	121	157	36		
	épaule attaque	19	118	99	épaule attaque	22	104	82	épaule attaque	21	85	64		
	épaule controlatéral	32	86	53	épaule controlatéral	35	112	77	épaule controlatéral	24	67	43		
	hanche attaque	106	147	41	hanche attaque	95	148	53	hanche attaque	109	155	46		
	hanche controlatéral	100	153	53	hanche controlatérale	93	155	62	hanche controlatérale	102	152	51		
	coude attaque	108	158	50	coude attaque	91	168	77	coude attaque	93	166	72		
	coude controlatéral	79	161	82	coude controlatéral	70	159	89	coude controlatéral	55	162	108		
	buste	47	73	26	buste	41	71	31	buste	51	78	26		

