



SKI ALPIN: EFFETS AERODYNAMIQUES DE LA POSTURE SUR LA PERFORMANCE

(synthèse des résultats des essais en soufflerie: 1992-1999)

INFO DOCUMENT :

Edité par le Département Sportif et Scientifique de la F.F.S

1^{ère} version :: février 2001

Groupe de travail : C. Barelle, A. Ruby, M. Tavernier , N. Coulmy

Lors d'une descente, le skieur est soumis à 3 forces : son poids P qui joue essentiellement un rôle moteur, la force de contact ski-neige Fc qui, bien utilisée, va permettre de gérer la trajectoire, enfin la force aérodynamique Fa qui, pour l'essentiel, ne fait que s'opposer à l'avancement du skieur. Il convient donc, sans nuire à la capacité gestuelle du skieur, de minimiser cette force en adoptant une posture "aérodynamique" la moins pénalisante possible.

Ce document présente la synthèse des résultats des essais en soufflerie réalisés par la FFS à la soufflerie de Dassault-Aviation (1992, 1994) et à la soufflerie S10 de l'Institut Aérotechnique de Saint Cyr L'Ecole (1995, 1999). Ces essais ont permis de mettre en évidence l'évolution des effets aérodynamiques en fonction de la posture et de définir des critères optimaux de postures skiabiles en recherche de vitesse. Ces résultats couplés à des simulations donnent des indications sur les écarts de performance induit par des variations de postures.

I Rappel des définitions

La force aérodynamique est généralement représentée par 2 composantes : **la traînée** Tr (projection de la force aérodynamique sur le vecteur vitesse), **la portance** Po (projection de la force aérodynamique sur le vecteur perpendiculaire au plan tangent à la trajectoire). En ski alpin, la portance reste 3 à 5 fois plus faible que la traînée (typiquement à 90km/h: Tr ≈ 100 N, Po ≈ 30 N) et sa direction fait qu'elle intervient peu dans l'équation du mouvement. Elle ne sera pas prise en compte dans ce travail.

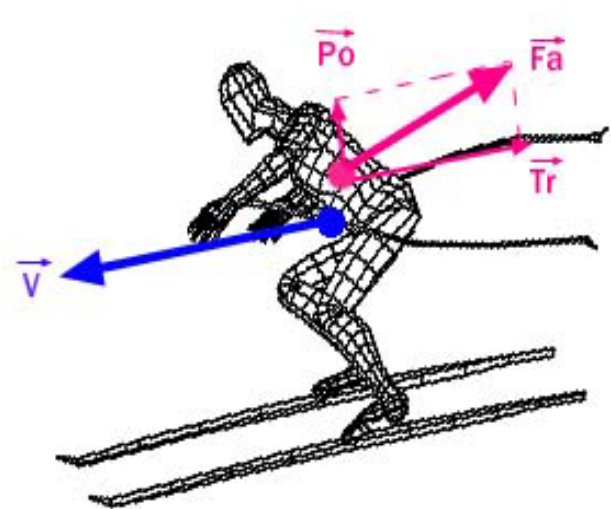


Figure 1: force aérodynamique exercée sur un skieur dont le centre de masse est animé d'une vitesse V.

La traînée varie en fonction de 3 paramètres, la section droite du skieur S (projection de la surface frontale du skieur sur un plan perpendiculaire à sa vitesse), son coefficient de forme et d'état de surface Cx (coefficient de traînée aérodynamique) et sa vitesse V:

$$Tr = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot C_x \cdot V^2$$

avec ρ : masse volumique de l'air ($\rho = 1.22 \text{ Kg/m}^3$). L'équation dynamique du mouvement d'un skieur de masse M montre que sa pénétration dans l'air est d'autant meilleure que le rapport SCx/M est petit (SCx/M: coefficient de freinage aérodynamique). Dans ce document, SCx/M est exprimé en $(\text{m}^2/\text{kg}) \cdot 1000$.

II Influence de SCx/M sur la performance

L'équation du mouvement d'un skieur en trace directe permet de déterminer l'influence du coefficient de freinage aérodynamique sur la performance (Figure 2).

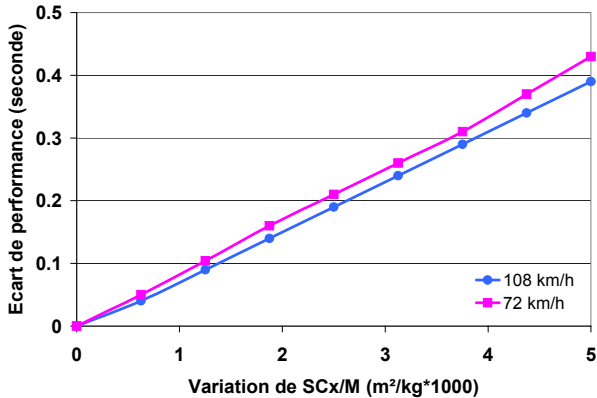


Figure 2: Variation de la performance d'un skieur sur 100 mètres en fonction de la variation de SCx/M pour 2 vitesses d'entrée, sur une pente de 20°.

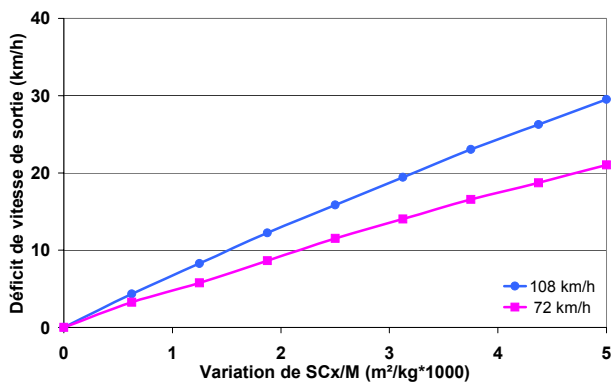


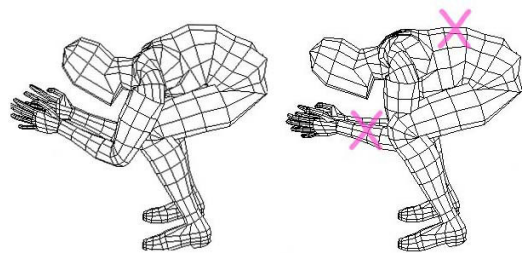
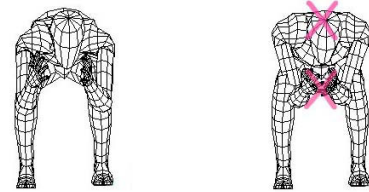
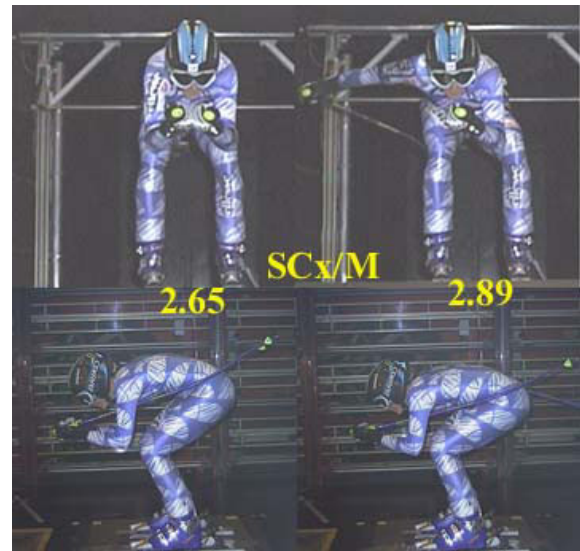
Figure 3: Variation du déficit de vitesse d'un skieur sur 100 mètres en fonction de la variation de SCx/M pour 2 vitesses d'entrée, sur une pente de 20°.

III Résultats expérimentaux

1 Évolution de SCx/M en fonction de la posture

En recherche de vitesse SCx/M est de l'ordre de 2, en position quasi debout il est 2 à 3 fois plus grand (page 3). Il convient de noter que ces valeurs sont des valeurs moyennes et que SCx/M peut fluctuer de 20 à 30% en fonction de la morphologie du sujet (dimensions; formes et masse).

Un bras écarté au lieu d'être dans l'axe du corps induit une augmentation de SCx/M de l'ordre de 0.34 soit une pénalité en temps de 2 centièmes de seconde et de 1.5 km/h en vitesse de sortie sur 100 mètres (pente : 20°, vitesse d'entrée de 108 km/h).



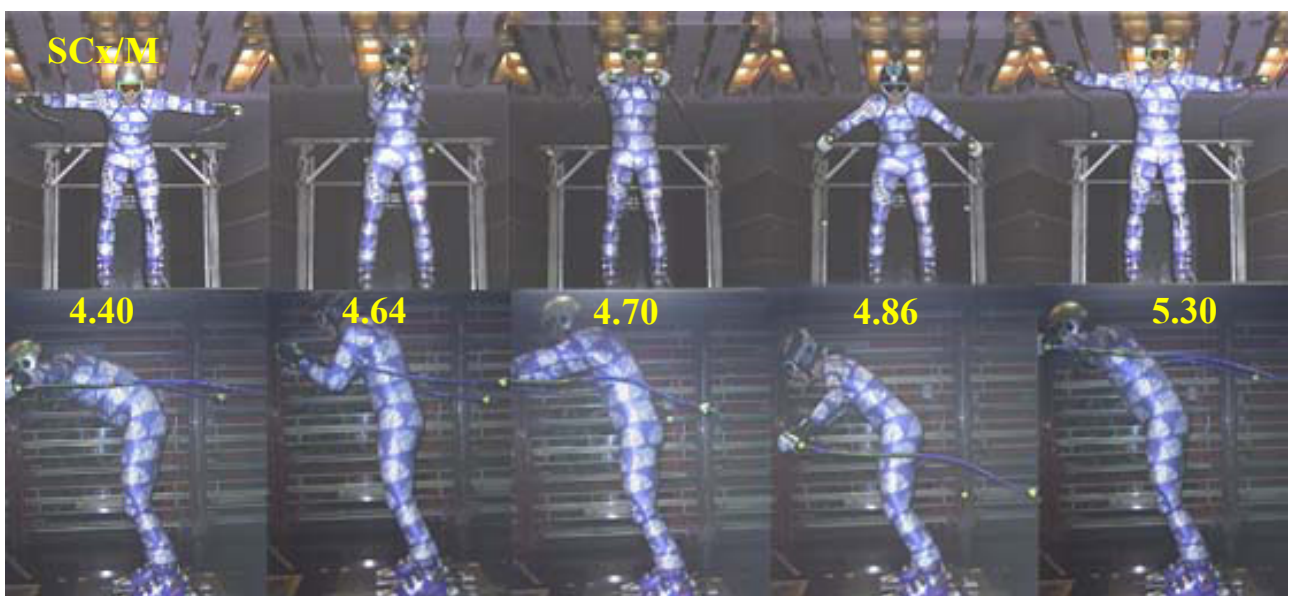
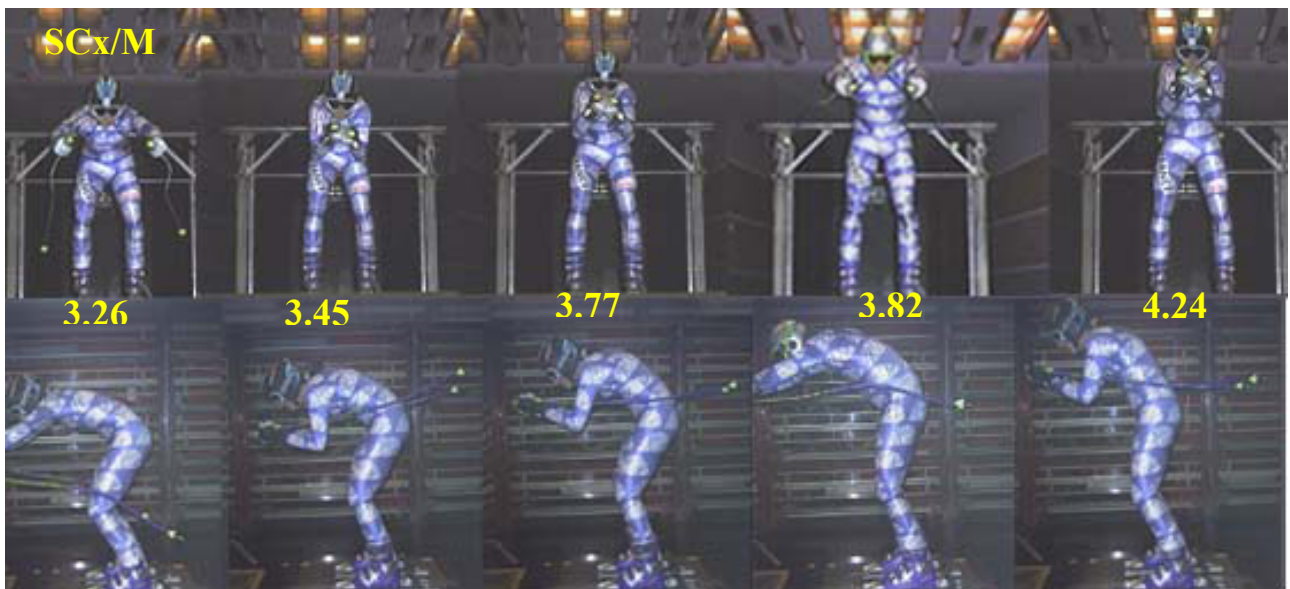
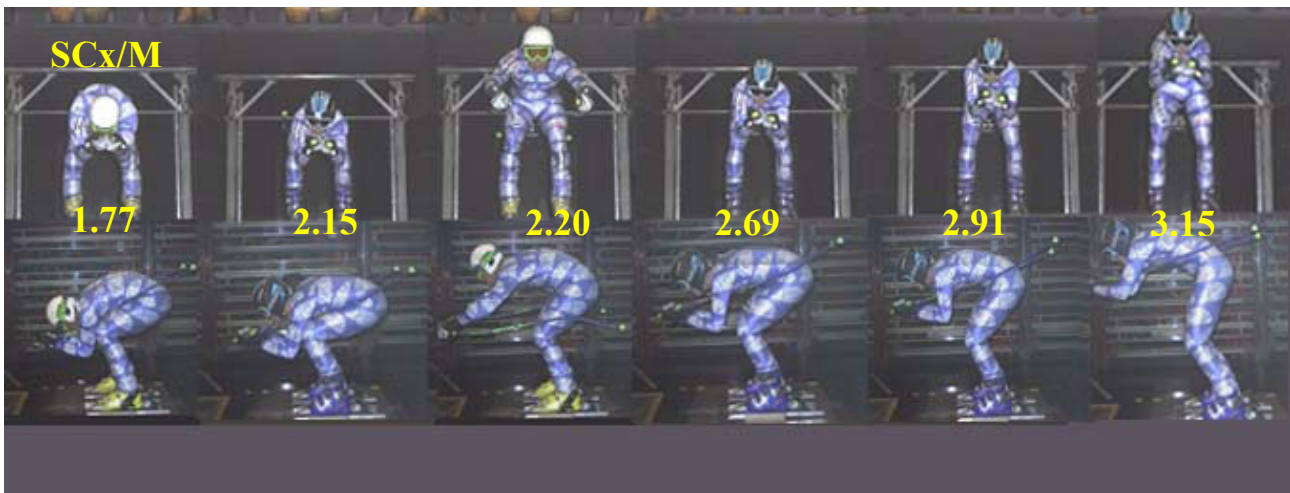
2 Optimisation de la posture de recherche de vitesse

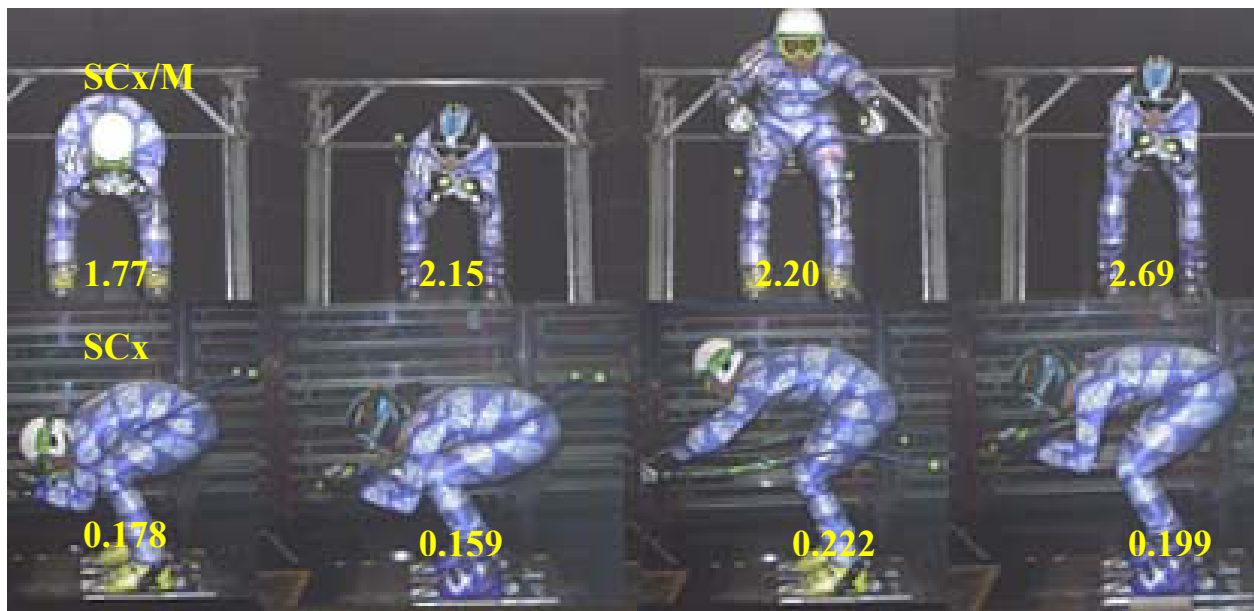
Les résultats obtenus sur les postures optimales montrent que le SCx/M n'a pas évolué entre 1992 et 1999. En moyenne, les garçons adoptent toujours des postures plus aérodynamiques que les filles (différence de 9% pour SCx/M). La posture optimale correspond à une position où le dos est arrondi (aile d'avion) et horizontal, les épaules sont bombées, les membres supérieurs ne débordent pas du contour extérieur du skieur et surtout n'obstruent pas le pont des jambes.

Pour un même skieur les variations de postures indiquées ci-dessus peuvent entraîner des écarts sur SCx/M de 10 à 20%.

Au début des années 90, un skieur autrichien, utilisait une posture de recherche de vitesse plus assise sur les talons. Si d'un point de vue aérodynamique cette position s'est avérée aussi efficace que la posture classique, d'un point de vue musculaire elle est plus difficile à tenir.

Évolution du SCx/M en fonction de la posture.





Pour la série d'images ci-dessus (images 1, 2, 3, 4 de la page 3), les faibles valeurs de SCx/M correspondant aux postures des images 1 et 3 peuvent surprendre par rapport aux valeurs des images 2 et 4. La différence entre les 2 skieurs provient du fait que le sujet des images 1 et 3 a une masse plus importante de 25% et aussi qu'il a su adopter une posture bien arrondie. Les valeurs de SCx vont bien dans le sens des observations mais il convient de rappeler que la pénétration dans l'air d'un skieur est caractérisée par SCx/M et non par SCx .

IV Conclusions

La variation relative de SCx/M est d'autant plus sensible sur la performance que la pente de la piste est faible. Un skieur avec une vitesse d'entrée de 108Km/h sur une pente de 15° décélère s'il est en position semi debout ($SCx/M \approx 5$) et accélère s'il est en position de recherche de vitesse ($SCx/M \approx 2$). Au bout de 100 mètres le retard du skieur semi debout est de 0.26 seconde et son déficit en vitesse est de 16 km/h. Sur une piste de descente, la distance parcourue en position de recherche de vitesse n'excède pas 500 m, un écart de 10% sur le SCx/M entraîne une variation de performance de $1/10^{\text{ème}}$ de seconde. Un relevé intempestif de la posture ($SCx/M=3.75$ au lieu de 2.5) sur 100 mètres induit la même pénalité. Il est évident que lors d'une course de descente, la différence de temps entre deux skieurs due aux effets aérodynamiques ne peut pas excéder un à quelques dixièmes de seconde et dans ce cas extrême, les erreurs de postures sont nécessairement bien observables. Ces travaux ont été effectués dans le cadre de la réglementation édictée par la F.I.S.

Les combinaisons étanches et spoilers, bien que permettant de réduire considérablement le SCx/M n'ont pas été étudiés. Il est cependant important de préciser qu'un bon ajustement des combinaisons sur les skieurs (suppression des plis, bon état des coutures, ...) est à prendre en compte dans l'optimisation du SCx/M , bien que l'effet reste faible (moins de 2 à 3% du SCx/M). L'influence des paramètres (crochets de chaussure, état de surface des combinaisons, cheveux, ...) autres que la posture sur la variation de SCx/M , sont traités dans un autre rapport.

Ce travail a été cofinancé par la FFS, le MJS et Dassault-Aviation.

Bibliographie

M.Tavernier, P. Cosserat, P. Bally, E. Joumard. Influence des effets aérodynamiques et des appuis ski-neige sur la performance en ski alpin. Science et Motricité, n° 21, 21-26, 1994.

S. Savolainen. Theoretical drag analysis of a skier in the downhill speed race. International Journal of Biomechanics, 5, 26-39, 1989.

L.P. Remizov. Optimal running on skis in downhill. Biomechanics,13, 941-945, 1980.

T. Ohtsuki, K. Watanabe. Postural changes and aerodynamic forces in alpine skiing. Ergonomics, 20, n°2, 121-131,1977.

Des rapports internes présentant les résultats des campagnes d'essais en soufflerie sont consultables à la F.F.S.