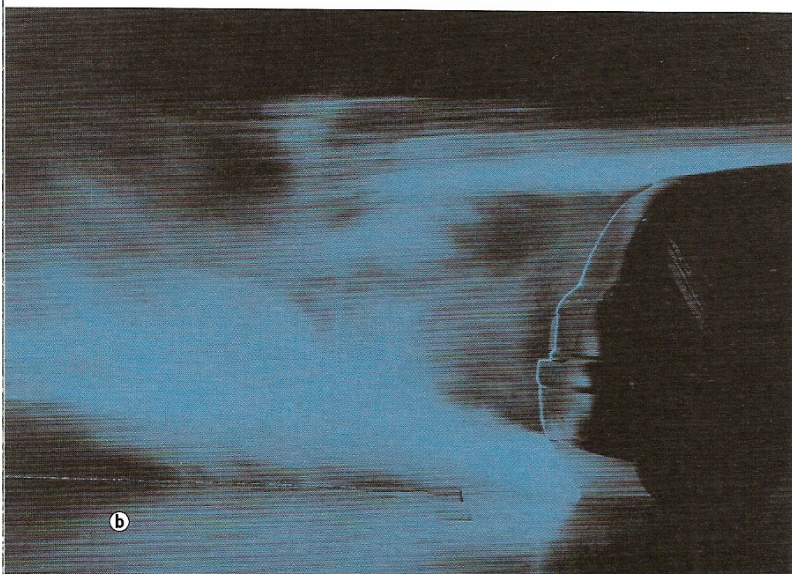


L'automobile... et son C_x

Pour fendre l'air, soignez vos arrières



La forme d'une voiture résulte d'exigences contradictoires : si le souci de l'esthétique du véhicule et d'une allure « sportive » favorise les profils allongés, les exigences de confort et d'habitabilité conduisent au contraire aux formes plus parallélépipédiques des véhicules familiaux. Face à ces contraintes, l'ingénieur cherche à imposer la sienne : elle tient en une expression – « *un faible C_x* » – et vise à réduire la force de freinage exercée par l'air (la *trainée*) et, ainsi, la consommation aux vitesses élevées. La forme d'un nouveau modèle résulte en pratique d'allers-retours entre des essais en soufflerie (Figures 1a et b) et des calculs sur ordinateur (Figure 2), d'où émerge un profil. Ce dernier est alors ajusté pour tenir compte de l'esthétique, mais aussi des impératifs de confort, de sécurité et de facilité de production.

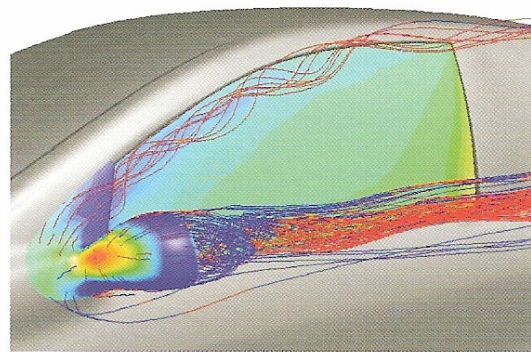
La force de freinage aérodynamique dépend en premier lieu du profil global du véhicule : comme pour les balles (p. 92), l'influence de l'arrière de la voiture est prépondérante devant celle de l'avant.

1. [a] Essai en soufflerie d'un modèle réduit de véhicule Clio (Renault). Une fumée colorée est injectée en amont : elle permet d'observer la déflexion de l'écoulement sur l'avant et le développement d'une couche limite le long des parois du véhicule.

[b] Vue du sillage en arrière de la maquette pour un essai du même type.

En effet, sur l'avant, le toit et les côtés du véhicule, les lignes d'écoulement suivent de près la surface de la carrosserie : la dissipation d'énergie est localisée dans une mince *couche limite* sur la paroi où la vitesse de l'air passe d'une valeur égale à celle de la voiture à sa valeur à plus grande distance. Vers l'arrière en revanche, cette couche limite « décolle » : il apparaît un sillage turbulent de grande taille (Figure 1b) où la dissipation d'énergie est beaucoup plus forte. L'aérodynamicien cherchera donc en priorité à réduire ce sillage, par exemple en arrondissant le décrochement arrière du toit.

Une fois la forme générale du véhicule optimisée, il est possible de réduire significativement la traînée en soignant la forme des accessoires de petite taille : balais d'essuie-glace, poignées de portes, enjoliveurs de roue, ou encore rétroviseurs (Figure 2). Ces éléments sont en effet susceptibles de provoquer une dissipation d'énergie sensible et font l'objet d'études poussées.



2. Simulation numérique de l'écoulement autour d'un rétroviseur. Les lignes représentent les lignes de courant, tandis que les couleurs sur la paroi codent la pression exercée par l'air (le bleu correspond à une forte dépression et le rouge à une dépression nulle).

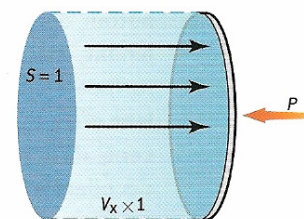
Le phénomène en détail

Le C_x est le quotient de la force aérodynamique de traînée réelle F_T s'exerçant sur le véhicule, sur une valeur de référence correspondant à une plaque solide perpendiculaire à un écoulement de vitesse V_x à grande distance. Dans ce dernier cas, la pression sur la plaque est de l'ordre de la pression dynamique $P = \rho V_x^2$ qui correspond au transfert de toute la quantité de mouvement de l'écoulement à la plaque (il faut en effet multiplier la quantité de mouvement par unité de volume ρV_x par la vitesse V_x pour obtenir le flux (Figure 3). Le C_x est donc égal au rapport $F_T / (S \rho V_x^2)$ où S est la surface de la projection du véhicule sur un plan perpendiculaire à l'écoulement.

Ce nombre est approximativement indépendant de la vitesse pour des écoulements turbulents ; il est d'autant plus faible que la voiture est bien profilée. Le tableau suivant indique pour trois véhicules du même constructeur les valeurs de C_x , ainsi que du produit SC_x qui caractérise la force de freinage à vitesse donnée : il illustre les progrès accomplis d'une génération à l'autre.

	R18	R21	Laguna
C_x	0,34	0,30	0,31
S [m ²]	1,86	1,95	1,59
SC_x (m ²)	0,695	0,59	0,5

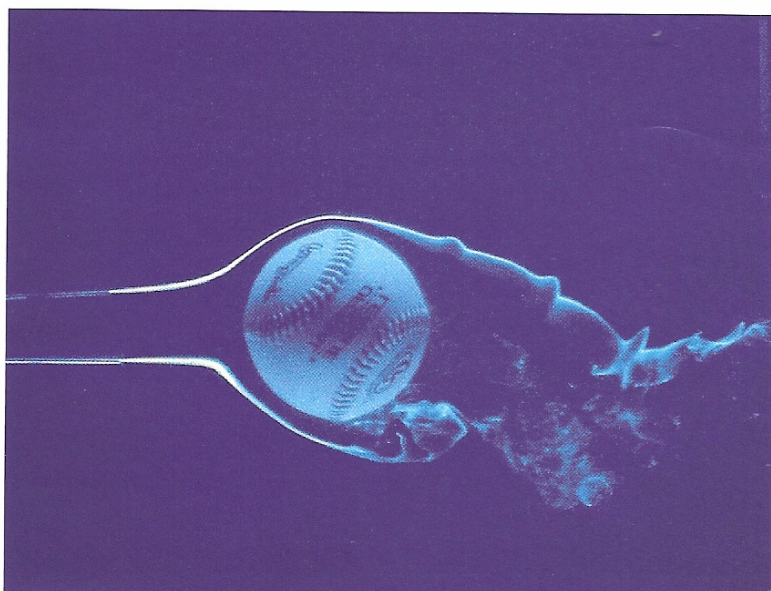
La baisse est considérable par rapport aux véhicules du début du XX^e siècle qui présentaient des valeurs de C_x de l'ordre de 0,8 à 0,6. Cependant, il est difficile aujourd'hui de le diminuer significativement pour les véhicules courants. Si les véhicules des « courses d'économie » présentent des valeurs de SC_x encore plus faibles, c'est au détriment de l'habitabilité.



3. La force par unité de surface qui s'exerce sur un plan solide perpendiculaire à l'écoulement d'un fluide est la pression dynamique P . Elle est égale à la quantité de mouvement du fluide par unité de surface ρV_x , multipliée par V_x qui représente la distance parcourue par l'air dans l'unité de temps.

Le secret des longs drives

Quand la traînée fait sa crise



1. Ce cliché a été obtenu en injectant du colorant en amont d'une balle de base-ball placée dans un écoulement d'eau, de nombre de Reynolds 3 400. On observe le décollement des deux filets de colorant au niveau des coutures de la balle. Cette dernière est également animée d'un mouvement de rotation à 0,5 tour/s qui explique la dissymétrie des filets de colorant.

autour d'une balle de base-ball (Figure 1). Ces filets contournent la balle sur sa face amont, mais, au-delà d'un certain point, tout se passe comme s'ils « décollaient » de la surface pour s'en éloigner. Après ce « point de décollement » apparaît un sillage turbulent où la dissipation d'énergie est très importante : sa taille et son orientation influencent directement le mouvement de la balle. Pour une balle de base-ball, ce décollement se produit sur les coutures supérieure et inférieure : c'est ce qui explique pourquoi les *pitchers* (lanceurs) les plus habiles parviennent à contrôler l'écoulement autour de la balle en plaçant avec soin leurs doigts par rapport aux coutures. Même s'ils sont peu au fait des subtilités aérodynamiques en jeu, ils produisent ainsi des trajectoires difficiles à anticiper pour le « batteur » qui leur fait face.

Le phénomène en détail

Les balles de golf exploitent un autre effet de la rugosité : leur sillage est moins large que celui d'une balle lisse, ce qui diminue la dissipation d'énergie dans cette zone. C'est le secret des longs *drives* des grands golfeurs, dont certains dépassent les 250 m.

Pourquoi une balle de golf est-elle piquetée de petites alvéoles ? Pourquoi n'utilise-t-on quasiment jamais de balles lisses ? Il est en effet tentant de penser que le frottement de l'air sur leur surface serait ainsi plus faible : les coques des voiliers de course ne sont-elles pas soigneusement polies avant une compétition ? Pourtant, soumise à une même impulsion, une balle rugueuse atteint une vitesse plus grande qu'une balle lisse.

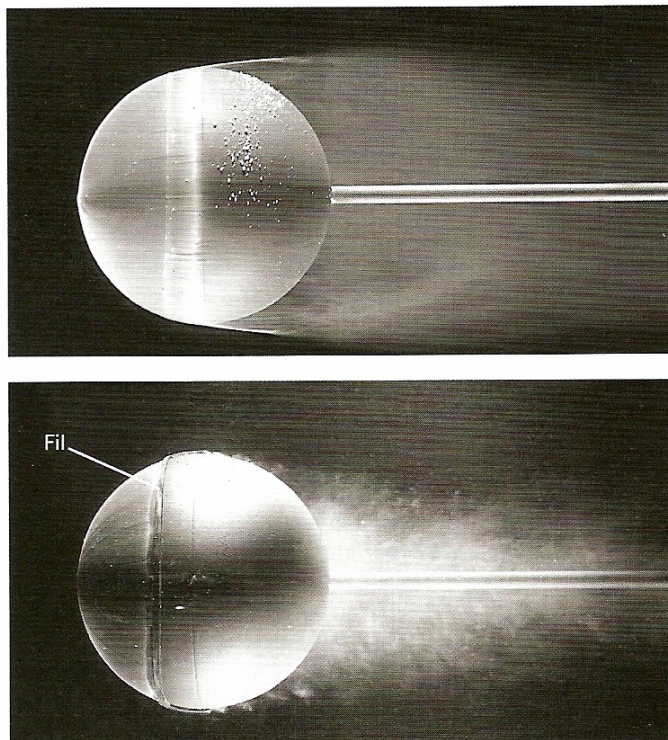
Grâce à des filets d'eau colorée, observons l'effet de la rugosité sur l'écoulement

La force de freinage sur ces balles est la traînée introduite dans le sujet précédent. Elle est la somme de deux composantes : la friction de l'air à la paroi, là où le fluide épouse le contour de la balle, et la force résultant de la dissipation d'énergie dans la zone turbulente en aval. Cette dernière est prédominante de sorte qu'un *drive* réussi passe par un sillage étroit (c'est également ainsi qu'on minimise la traînée des voitures).

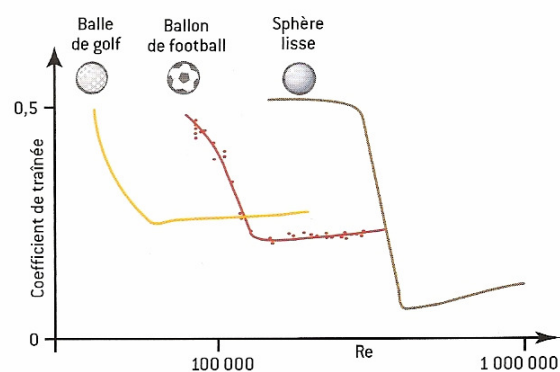
Pour une sphère, il suffit d'un léger relief sur la face amont lisse (un fil dans le cas de la figure 2) pour réduire le sillage : il rend turbulent l'écoulement dans la couche limite proche de l'obstacle. Cette turbulence améliore le brassage du fluide et transfère avec davantage d'efficacité la quantité de mouvement des zones plus rapides loin de la paroi, vers les zones plus lentes près de la paroi – c'est aussi le cas pour les écoulements turbulents dans un tube (Figure 1 p. 10). Cette accélération du fluide proche de la paroi repousse plus en aval le décollement de la couche limite, ce qui réduit la largeur du sillage qui est le facteur dominant de la traînée.

Plus précisément, quelle que soit la rugosité des balles (et même si elles sont lisses), la couche limite devient turbulente au-delà d'une valeur seuil du nombre de Reynolds Re . Cette transition est marquée par une chute, ou « crise », de la traînée qui se produit pour une valeur de Re plus faible pour les balles rugueuses que pour les balles lisses (Figure 3). Il existe donc une gamme de valeurs de Re intermédiaires, correspondant d'ailleurs aux situations pratiques, pour lesquelles le coefficient de traînée des balles rugueuses est beaucoup plus faible que celui des balles lisses.

La rugosité des balles n'est qu'un des facteurs dont les sportifs tirent parti pour obtenir les trajectoires souhaitées. Nous avons vu ainsi qu'en la faisant tourner, on peut défléchir une balle en même temps qu'on la stabilise.



2. Comparaison du décollement des couches limites laminares et turbulentes derrière une sphère. Les vitesses d'écoulement sont les mêmes dans les deux cas, mais un fil disposé sur la face avant de la sphère (en bas) provoque une transition laminaire-turbulente de la couche limite et par suite un sillage plus étroit.



3. Variation des coefficients de traînée (C_x) de l'air sur une balle de golf, un ballon de football et une sphère lisse en fonction du nombre de Reynolds. Le C_x correspond à la définition donnée dans le sujet précédent (p. 90) traitant de l'aérodynamique des voitures.