

L'AÉRODYNAMIQUE

LES LOIS DE L'AÉRODYNAMIQUE

**Vitesse, résistance de l'air, surface frontale,
coefficient de traînée, portance, déportance**

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

AÉRODYNAMIQUE, VITESSE ET RÉSISTANCE DE L'AIR

L'aérodynamique est la branche de la physique qui étudie la relation entre la résistance de l'air et la forme des véhicules terrestres.

En effet, bien qu'incolore, inodore et d'une densité relativement faible (environ 800 fois inférieure à celle de l'eau), l'atmosphère terrestre se comporte comme un milieu visqueux qui freine le mouvement.

Plus précisément, l'atmosphère terrestre génère une force physique qu'on appelle *résistance de l'air* ou *traînée*.

Une loi immuable...

Diverses expériences ont permis de dégager une loi universelle et immuable : la résistance de l'air augmente comme le *carré de la vitesse*. Cette résistance prime très vite sur la résistance au roulement, devenant ainsi le principal obstacle au mouvement des véhicules terrestres.

Réduire la résistance de l'air...

Réduire la résistance de l'air, autrement dit la *traînée*, est donc une préoccupation constante, soit pour gagner de la vitesse, soit pour économiser de l'énergie : les cyclistes, les skieurs, les patineurs adoptent instinctivement la position dite de "l'œuf" afin d'optimiser leur rendement.

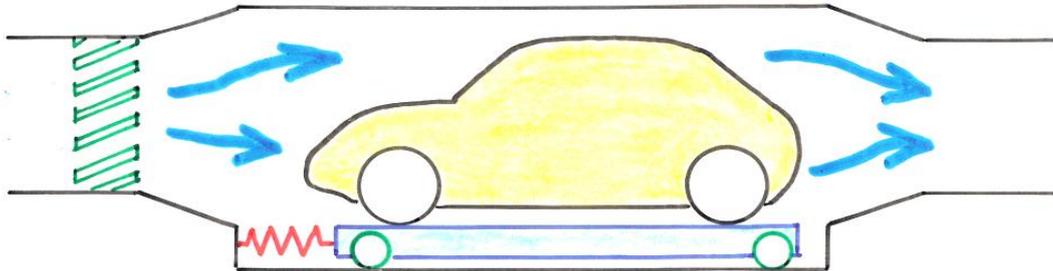
La résistance de l'air dépend de la densité de l'atmosphère, celle-ci diminuant avec l'altitude. C'est ce qui incite les avions de ligne à voler aussi haut que possible⁽¹⁾. À 20 000 mètres de hauteur, par exemple, la densité de l'air est si réduite que la traînée y est divisée par dix. Le Concorde pouvait ainsi atteindre la vitesse de 2 000 km.h⁻¹. Au niveau de la mer, à puissance égale, il n'aurait pas pu dépasser 600 km.h⁻¹.

À encore plus haute altitude, les satellites qui évoluent dans l'espace, c'est-à-dire dans un vide presque parfait, s'affranchissent presque complètement de la résistance de l'air. Une fois sur orbite, leur mouvement devient perpétuel, ou presque.

Mesurer la résistance de l'air...

Il est impossible de mesurer directement la résistance que l'air exerce sur la carrosserie d'un véhicule en mouvement, c'est pourquoi les expériences aérodynamiques nécessitent le recours à des installations appelées "tunnels aérodynamiques", ou plus couramment, "souffleries".

Plus ou moins sophistiquées, ces installations sont toutes conçues sur le même principe : une turbine brasse un vent artificiel dirigé sur la carrosserie d'un véhicule immobile. Il suffit alors de mesurer la force qu'exerce le flux d'air pour en déduire le Cx.



Principe d'une soufflerie aérodynamique ⁽²⁾

La voiture est immobilisée sur un plancher coulissant.

Une turbine (pales vertes) crée un vent artificiel (flèches bleues).

Un dynamomètre (ressort rouge) mesure la force que le vent exerce sur la carrosserie.

La forme idéale...

La mise au point des fuselages d'avions a montré qu'il existe une forme aérodynamique idéale, dite "ovoïde" (ressemblant à un œuf) ou "pisciforme", car proche de celle des poissons.

Cette forme idéale, capable d'optimiser la traînée globale, doit être de coupe circulaire et respecter certaines proportions, notamment en ce qui concerne le rapport entre la section et la longueur.

Malheureusement, cette forme idéale n'est pas applicable aux véhicules terrestres pour des raisons techniques et pratiques.

La pénétration dans l'air...

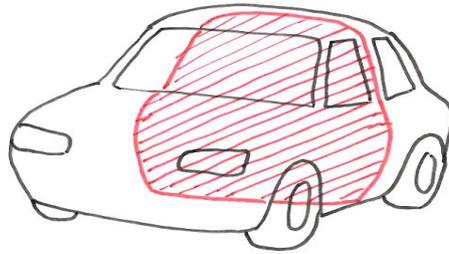
Toutes conditions égales par ailleurs (vitesse, température et pression atmosphériques), l'aptitude à la pénétration dans l'air ne dépend que de deux paramètres, et deux seulement :

- la surface frontale, également appelée *maître-couple* ⁽³⁾ ;
- la traînée, caractérisée par le Cx.

La surface frontale...

La surface frontale est la surface d'une coupe transversale effectuée à l'endroit où le véhicule présente ses dimensions maximales en largeur et en hauteur.

Une bonne approximation de la surface frontale consiste à multiplier la hauteur du véhicule par sa largeur, le résultat étant exprimé en *mètres-carrés* (symbole m^2).



© association adilca reproduction interdite

La surface frontale est la surface d'une coupe transversale.

La traînée...

En pratique, la traînée aérodynamique globale générée par le déplacement d'un véhicule terrestre dépend de quatre phénomènes distincts :

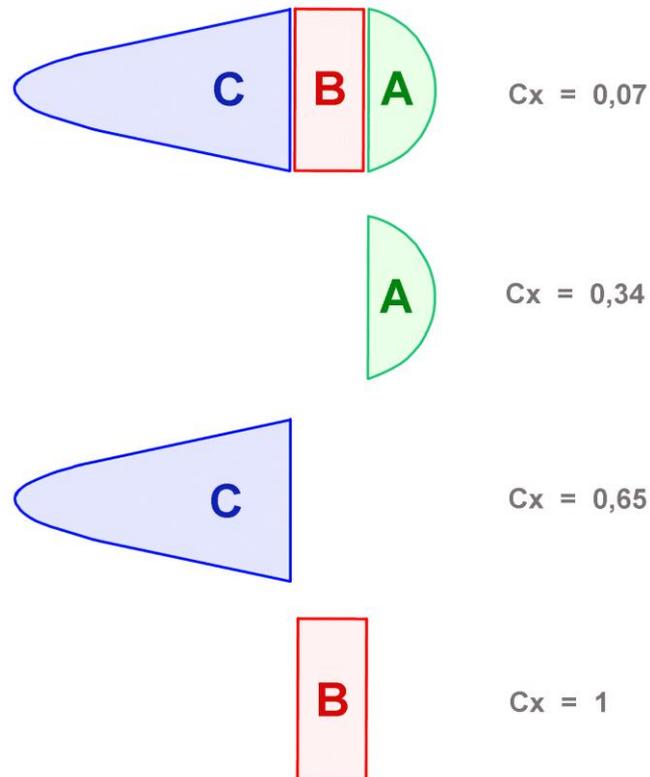
- la pression directe que l'air exerce sur l'avant de la carrosserie et le pare-brise, c'est la *traînée de forme* ;
- l'écoulement de l'air sur la surface de la carrosserie, c'est la *traînée de frottement* ;
- les turbulences créées par cet écoulement au contact de diverses saillies ou protubérances (encadrements de vitres, essuie-glace, antenne, rétroviseurs, poignées de portes, roues, freins et passages de roues, organes mécaniques divers, ligne d'échappement, etc.), c'est la *traînée de turbulence* ;
- la pénétration de l'air à l'intérieur de la carrosserie, indispensable pour alimenter le moteur en oxygène (délivrer une puissance de 100 ch oblige le moteur à ingurgiter environ 60 litres d'air par seconde), mais aussi pour refroidir le radiateur et ventiler l'habitacle, c'est la *traînée interne*.

La traînée aérodynamique globale dépend donc de la forme et de l'état de surface de l'ensemble des éléments qui composent la carrosserie : l'avant du véhicule (proue), l'arrière (poupe), les flancs, les passages de roues, la partie supérieure (toit), inférieure (prises d'air, carénage sous le moteur, plancher, etc.), tous ces éléments étant complémentaires et susceptibles d'interagir les uns avec les autres.

Le Cx : définition

Le *coefficient de traînée* (C_x) est un nombre sans dimension qui se rapporte à la surface frontale. Par définition, un objet à surface frontale plane qui se déplace face au vent présente un C_x égal à 1.

Par suite, un C_x de 0,5 signifie qu'un objet profilé génère deux fois moins de résistance à l'air qu'un objet plat de même surface frontale, etc.



© association adilca reproduction interdite

Relation entre forme et C_x , à surface frontale égale
(objets se déplaçant de la gauche vers la droite).

Les calculs montrent que le C_x est toujours compris entre 0,07 et 1,4, le C_x le plus favorable étant celui d'un objet de forme ovoïde (0,07), le plus défavorable étant celui d'une demi-sphère creuse qui se déplace côté ouvert face au vent (1,4).

Les progrès du C_x ...

Grâce à des méthodes empiriques, le C_x moyen des voitures de tourisme n'a cessé de progresser, jusqu'à atteindre des valeurs proches de 0,30.

De même, le C_x moyen des camions, qui était de 1,1 au début des années soixante-dix, est aujourd'hui voisin de 0,9.

Cette dernière valeur pourrait être encore améliorée si ce n'était une réglementation qui limite la longueur hors-tout plutôt que celle du chargement : un constructeur propose d'ores et déjà un véhicule articulé dont le C_x est de 0,6.

Pour obtenir un tel résultat, la recette a consisté à réduire ou supprimer toutes les sources de turbulences : le tracteur ressemble à une motrice de TGV, l'espace entre le tracteur et la semi-remorque est protégé par un déflecteur, la semi-remorque étant pourvue de jupes latérales lisses recouvrant l'intégralité des flancs, roues comprises, du toit jusqu'au ras du sol, et carénée dans sa partie inférieure.

Ainsi profilé, la puissance nécessaire pour maintenir ce genre de camion à vitesse stabilisée sur route horizontale pourrait être réduite de 30 %.

Le vent latéral...

L'aérodynamique s'intéresse aussi aux effets des vents latéraux. La sensibilité au vent latéral dépend de la forme et de la surface latérale de prise au vent, mais aussi et surtout, de la masse du véhicule.

Ainsi un camion de 40 tonnes avec une surface latérale de 60 m² se révélera quatre fois moins sensible au vent latéral qu'une camionnette de 1 800 kilogrammes avec une surface latérale de 12 m². Mais attention, la sensibilité au vent latéral dépend aussi de la masse du chargement : si le camion est vide, ce rapport n'est plus le même.

La déportance...

La plupart des voitures de tourisme sont affectées d'une légère *portance*, elle aussi proportionnelle au carré de la vitesse.

Ce phénomène est dû à la pression de l'air qui s'engouffre sous la voiture et tend à la soulever, réduisant ainsi l'adhérence des pneumatiques à haute vitesse.

Pour éviter cet inconvénient, les carrosseries des voitures de sport sont conçues de manière à générer de la *déportance*, également appelée *charge aérodynamique* : au lieu d'être soulevée, la voiture est plaquée au sol à haute vitesse.

La charge aérodynamique s'ajoute au poids de la voiture sans pénaliser la masse surfacique. Les performances d'indentation et d'adhésion des pneumatiques sont alors améliorées (voir dossier ADILCA "*adhérence et glissement*").

La charge aérodynamique se mesure dans une soufflerie équipée d'une bascule et s'exprime grâce à un coefficient appelé C_z .

Exprimer la résistance de l'air...

Cette résistance s'exprime grâce à la relation :

$$R = A \cdot V^2$$

Dans le Système International d'unités dont l'usage est, rappelons-le, obligatoire partout dans le monde, quels que soient les domaines concernés (industrie, commerce, enseignement), la résistance de l'air **R** s'exprime en *newton* (symbole **N**), la constante aérodynamique **A** propre à chaque véhicule⁽⁴⁾ s'exprime en *kilogramme par mètre* (symbole **kg.m⁻¹**), et la vitesse **V** du véhicule s'exprime en *mètre par seconde* (symbole **m.s⁻¹**). La cohérence des unités se vérifie ainsi :

$$R \text{ (résistance de l'air)} = \text{kg.m}^{-1} \cdot (\text{m.s}^{-1})^2 = \text{kg.m.s}^{-2} = \text{newton.}$$

Stabiliser la vitesse...

Cette résistance s'oppose au mouvement. Cela signifie que, pour stabiliser la vitesse sur une route horizontale, le conducteur doit solliciter une force de traction **F** sensiblement de même intensité que la résistance de l'air (on néglige la résistance au roulement⁽⁵⁾) :

$$F = A \cdot V^2$$

Naturellement, l'intensité de cette force doit varier au fur et à mesure que la vitesse s'élève. Comment calcule-t-on la différence ?

Calculer une différence de vitesse...

La différence de traction (ΔF) absorbée par la résistance de l'air entre deux valeurs de vitesse (**Va** et **Vb**) est égale à la *différence des carrés de la vitesse*, comme le montre la relation suivante :

$$\Delta F = (A \cdot Vb^2) - (A \cdot Va^2) = A (Vb^2 - Va^2)$$

La relation simplifiée s'écrit :

$$\Delta F / A = Vb^2 - Va^2$$

La grandeur **A** étant une constante, on remarque qu'une faible différence de vitesse affecte de manière significative la force de traction nécessaire pour vaincre la résistance de l'air.

Mais comment exprimer cette différence de manière simple et pratique ?

La formule simplifiée...

La différence n'affectant que la variable vitesse, il est possible de calculer celle-ci en conservant son expression en *kilomètre par heure* (symbole **km.h⁻¹**).

En effet, du fait que la force de traction est proportionnelle au carré de la vitesse, le calcul de la *racine carrée de la différence des carrés* de la vitesse exprimée en *kilomètre par heure* renseigne de manière précise sur la consommation d'énergie absorbée par la résistance de l'air, et donc sur la différence de vitesse correspondante.

La relation simplifiée s'écrit alors :

$$V = (Vb^2 - Va^2)^{1/2}$$

Dans cette relation, V exprime la différence d'énergie absorbée par la résistance de l'air entre la vitesse Vb et la vitesse Va, grandeurs toutes trois exprimées en *kilomètre par heure*. La puissance ½ correspond à la *racine carrée* de cette différence.

La relation satisfait alors à l'exigence de cohésion des unités, ce qui peut se vérifier ainsi :

$$\text{vitesse} = [(km.h^{-1})^2]^{1/2} = km.h^{-1}$$

Un tableau pour résumer...

Le tableau suivant regroupe l'ensemble des valeurs calculées à partir de 30 km.h⁻¹ pour les vitesses habituellement pratiquées en France.

130	126,5	124	120	115	110	102,5	94	83	69	50	0
110	106	102,5	98	92	85	75,5	63	46	0	48	69
90	85	81	75	67	57	41	0	44	63	79	94
70	63	57	49	36	0	39	57	71	85	97,5	110
50	40	30	0	33	49	62	75	87	98	109	120
30	0	26	40	52	63	74	85	95	106	116	126,5
km.h ⁻¹	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130

© association adilca reproduction interdite

Comment lire ce tableau ? Il suffit de mettre en correspondance les vitesses apparaissant en caractères gras sur la colonne de gauche et la ligne du bas. La valeur indiquée est la vitesse exprimant l'énergie absorbée par la résistance de l'air entre les deux valeurs choisies.

Exemple 1 : entre **80** km.h⁻¹ et **90** km.h⁻¹, la différence est de 41 km.h⁻¹. Cela signifie que, pour maintenir une vitesse de 90 km.h⁻¹ au lieu de 80 km.h⁻¹, il faut consommer une énergie supplémentaire qui correspond à celle absorbée par la résistance de l'air à 41 km.h⁻¹.

Inversement, un véhicule qui circule à 80 km.h^{-1} au lieu de 90 km.h^{-1} économise l'énergie qui correspond à celle absorbée par la résistance de l'air à 41 km.h^{-1} .

Exemple 2 : entre 110 km.h^{-1} et 130 km.h^{-1} , la différence est de 69 km.h^{-1} . Cela signifie que, pour maintenir une vitesse de 130 km.h^{-1} au lieu de 110 km.h^{-1} , il faut consommer une énergie supplémentaire qui correspond à celle absorbée par la résistance de l'air à 69 km.h^{-1} .

Inversement, un véhicule qui circule à 110 km.h^{-1} au lieu de 130 km.h^{-1} économise l'énergie qui correspond à celle absorbée par la résistance de l'air à 69 km.h^{-1} .

Une conséquence surprenante...

Une des conséquences surprenantes de cette loi est que, plus la vitesse s'élève, plus la différence augmente.

Ainsi par exemple, à 30 km.h^{-1} , élever la vitesse de 20 km.h^{-1} représente une différence de 40 km.h^{-1} ; mais à 50 km.h^{-1} , la même variation représente une différence de 49 km.h^{-1} ; à 70 km.h^{-1} , elle en vaut 57 ; à 90 km.h^{-1} , elle en vaut 63 , et à 110 km.h^{-1} , 69 .

Traduite en langage arithmétique courant, cette loi pourrait s'écrire :

$$50 \text{ km.h}^{-1} = 30 \text{ km.h}^{-1} + 40 \text{ km.h}^{-1}$$

$$70 \text{ km.h}^{-1} = 50 \text{ km.h}^{-1} + 49 \text{ km.h}^{-1}$$

$$90 \text{ km.h}^{-1} = 70 \text{ km.h}^{-1} + 57 \text{ km.h}^{-1}$$

$$110 \text{ km.h}^{-1} = 90 \text{ km.h}^{-1} + 63 \text{ km.h}^{-1}$$

$$130 \text{ km.h}^{-1} = 110 \text{ km.h}^{-1} + 69 \text{ km.h}^{-1}$$

Ou encore :

$$130 \text{ km.h}^{-1} = 30 \text{ km.h}^{-1} + 40 \text{ km.h}^{-1} + 49 \text{ km.h}^{-1} + 57 \text{ km.h}^{-1} + 63 \text{ km.h}^{-1} + 69 \text{ km.h}^{-1}.$$

Magie des nombres ! En effet, cette équivalence peut se vérifier ainsi :

$$130^2 = 30^2 + 40^2 + 49^2 + 57^2 + 63^2 + 69^2 = 16\,900^{(6)}.$$

Concrètement, cela signifie qu'une seule voiture circulant à 130 km.h^{-1} doit vaincre la même résistance aérodynamique que six voitures identiques circulant respectivement à $30, 40, 49, 57, 63$ et 69 km.h^{-1} .

L'aviation civile en a tiré les enseignements : un avion de ligne qui vole à 750 km.h^{-1} au lieu de 800 km.h^{-1} durant 3 heures perd seulement 12 minutes, mais économise l'énergie qui lui permettrait de voler à 280 km.h^{-1} pendant 3 heures.

En résumé, les lois de l'aérodynamique sont universelles : quels que soient les véhicules considérés (voitures, camions, trains, avions...), les économies d'énergie liées aux réductions de vitesse sont considérables.

(1) La densité de l'air dépend de la température et de la pression atmosphérique du lieu considéré, deux paramètres à partir desquels se calcule la masse volumique. La valeur de référence, dite "normale", est celle mesurée au niveau de la mer (altitude 0) à une température de 0 °C (273 K) et à une pression atmosphérique de 101 300 Pa, elle vaut exactement $1,293 \text{ kg.m}^{-3}$. La pression d'une masse d'air exprime le degré d'agitation des molécules de gaz dont elle est constituée (atmosphère terrestre : 76 % de diazote et 23 % de dioxygène). La pression atmosphérique diminue avec l'altitude, ceci est dû au fait que ces molécules, soumises à la force de gravitation qui émane du globe terrestre, s'empilent les unes sur les autres, un peu comme des assiettes sur une étagère. Les basses couches de l'atmosphère supportent donc le poids des couches supérieures.

(2) L'appareillage complet comprend un baromètre destiné à mesurer la pression atmosphérique et un thermomètre pour en mesurer la température, ces deux valeurs permettant de calculer la masse volumique de l'air ambiant. Par ailleurs, la vitesse du vent artificiel est mesurée à l'aide d'un anémomètre. Ainsi tous les paramètres sont réunis pour calculer le Cx. Les installations les plus sophistiquées, destinées aux voitures de course, incluent un tapis roulant défilant à la même vitesse que le flux d'air, ceci afin de tenir compte de l'incidence de la rotation des roues dans le calcul final (lors des tests destinés aux voitures de tourisme, les roues ne tournent pas, ce qui signifie que les valeurs de Cx publiées par les constructeurs doivent être majorées), ainsi qu'un dynamomètre vertical pour mesurer la déportance générée par le flux d'air.

(3) "Maître-couple" est un terme de marine qui désigne la pièce reliant les deux parties symétriques de la coque d'un navire à l'endroit le plus large. Par extension, il désigne la surface frontale.

(4) Cette grandeur est généralement comprise entre $0,7$ et $1,3 \text{ kg.m}^{-1}$ pour les voitures de tourisme, et entre 5 et 12 kg.m^{-1} pour les camions.

(5) Lorsqu'un véhicule circule à vitesse stabilisée sur une route horizontale, la force de traction sert uniquement à équilibrer les deux résistances naturelles qui s'opposent au mouvement : la résistance au roulement et la résistance de l'air. La résistance au roulement est sensiblement proportionnelle à la vitesse, tandis que la résistance de l'air est proportionnelle au carré de la vitesse. Cela signifie que la résistance de l'air devient prépondérante au fur et à mesure que la vitesse augmente.

(6) Le résultat exact donne 16 880 au lieu de 16 900, la différence étant due aux approximations sur la valeur précise des racines carrées.

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

RELATIONS ENTRE GRANDEURS

Surface frontale :

Surface d'une coupe transversale perpendiculaire à l'axe de symétrie du véhicule (effectuée à l'endroit le plus large et le plus haut), la surface frontale est approximativement égale au produit de la largeur par la hauteur :

$$\text{camion maxi-code : } 2,6 \text{ m} \times 3,9 \text{ m} = 10 \text{ m}^2$$

$$\text{autocar : } 2,5 \text{ m} \times 3,2 \text{ m} = 8 \text{ m}^2$$

$$\text{voiture de tourisme : } 1,8 \text{ m} \times 1,5 \text{ m} = 2,7 \text{ m}^2$$

$$\text{motocyclette : } 0,8 \text{ m} \times 1,5 \text{ m} = 1,2 \text{ m}^2$$

Coefficient de traînée :

$$C_x = 2 F / (S \cdot M \cdot V^2)$$

C_x : coefficient de traînée, grandeur sans dimension ;

F : force exercée par le flux d'air, exprimée en **N**

S : surface frontale, exprimée en **m²**

M : masse volumique de l'air, exprimée en **kg.m⁻³** (M ~ 1,3 kg.m⁻³)

V : vitesse du flux d'air, exprimée en **m.s⁻¹**

cohérence des unités :

$$C_x = \text{kg}^{+1} \cdot \text{m}^{+1} \cdot \text{s}^{-2} \cdot (\text{m}^2)^{-1} \cdot (\text{kg}^{+1} \cdot \text{m}^{-3})^{-1} \cdot (\text{m}^{+1} \cdot \text{s}^{-1})^{-2}$$

$$C_x = \text{kg}^{+1} \cdot \text{m}^{+1} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{+3} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{+2}$$

$$C_x = \text{kg}^{+1-1} \cdot \text{m}^{+1-2+3-2} \cdot \text{s}^{-2+2} = \text{grandeur sans dimension.}$$

Exemple : calculons le C_x à partir des données suivantes : vent artificiel de vitesse 20 m.s⁻¹ exerçant une force de 250 N sur une carrosserie de surface frontale 2,7 m² :

$$C_x = 2 \times 250 / (2,7 \times 1,3 \times 20^2) = 500 / (3,5 \times 400) = 500 / 1\,400 = 0,36$$

Résistance de l'air :

$$R = \frac{1}{2} S \cdot C_x \cdot M \cdot V^2$$

R : résistance de l'air, exprimée en **N**

S : surface frontale, exprimée en **m²**

C_x : coefficient de traînée, grandeur sans dimension ;

M : masse volumique de l'air, exprimée en **kg.m⁻³** (M ~ 1,3 kg.m⁻³)

V : vitesse, exprimée en **m.s⁻¹**

$$\text{cohérence des unités : } R = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot (\text{m}^{+1} \cdot \text{s}^{-1})^2 = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Exemple : calculons la résistance de l'air à la vitesse de 30 m.s⁻¹, la voiture présentant une surface frontale de 2,7 m² et un C_x de 0,40 :

$$R = \frac{1}{2} \times 2,7 \times 0,40 \times 1,3 \times 30^2$$

$$R = \frac{1}{2} \times 1,4 \times 900 = 630 \text{ N}$$

SCx

Grandeur essentiellement destinée à comparer différents modèles de voitures, le SCx est le produit de la surface frontale par le Cx. Le Cx étant une grandeur sans dimension, le SCx s'exprime en mètre carré.

Exemple : calculons le SCx d'une voiture de surface frontale 2,7 m² et de Cx 0,40 :

$$SCx = 2,7 \times 0,40 = 1,08 \text{ m}^2$$

Constante aérodynamique :

$$A = S \cdot Cx \cdot M$$

A : constante aérodynamique, exprimée en **kg.m⁻¹**

S : surface frontale, exprimée en **m²**

Cx : coefficient de traînée, grandeur sans dimension ;

M : masse volumique de l'air, exprimée en **kg.m⁻³** (M ~ 1,3 kg.m⁻³)

cohérence des unités : **A = m⁺² . kg.m⁻³ = kg.m⁻¹**

Exemple : calculons la constante aérodynamique d'un camion présentant une surface frontale de 10 m² et un Cx de 0,9 :

$$A = 10 \times 0,9 \times 1,3 = 11,7 \text{ kg.m}^{-1}$$

Masse volumique de l'air :

$$M = M_0 \cdot (A / A_0) \cdot (T_0 / T)$$

M : masse volumique de l'air, exprimée en **kg.m⁻³**

M₀ : masse volumique de l'air au niveau de la mer à 273 K (M₀ = 1,293 **kg.m⁻³**)

A : pression atmosphérique au lieu considéré, exprimée en **hPa**

A₀ : pression atmosphérique au niveau de la mer à 273 K (A₀ = 1 013 **hPa**)

T₀ : température de la glace fondante (T₀ = 273 **K**)

T : température de l'air au lieu considéré, exprimée en **K**

cohérence des unités :

$$M = \text{kg.m}^{-3} \cdot \text{hPa}^{+1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{K}^{+1} \cdot \text{K}^{-1} = \text{kg.m}^{-3}$$

Exemple : calculons la masse volumique de l'air lorsque la pression atmosphérique est égale à 1 013 hectopascals sous une température de 20 degrés Celsius (293 K) :

$$M = 1,293 \times (1\ 013 / 1\ 013) \times (273 / 293)$$

association adilca www.adilca.com

$$M = 1,293 \times 1 \times 0,932 = 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$$



association adilca reproduction interdite

Becquet aérodynamique ou accessoire purement esthétique ? (photo prise à Merusaglia 2A)

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

BIBLIOGRAPHIE

- ASSOCIATION ADILCA (ouvrage collectif, édition à compte d'auteurs) : *Guide des Lois Physiques de l'Automobile*, Paris 2002.

- HOWARD (Geoffrey) : *Automobile Aerodynamics, Theory and Practise for Road and Tracks* (Motorbook International Publisher, Londres 1980).

- LEMASSON (Georges) : *Les machines transformatrices d'énergie*, Tome 1 (Librairie Delagrave, Paris 1966).

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *