AÉRODYNAMIQUE, VITESSE ET RÉSISTANCE DE L'AIR

L'aérodynamique est la branche de la physique qui étudie l'influence de l'air sur la vitesse des véhicules.

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 des véhicules en circulation.

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''.

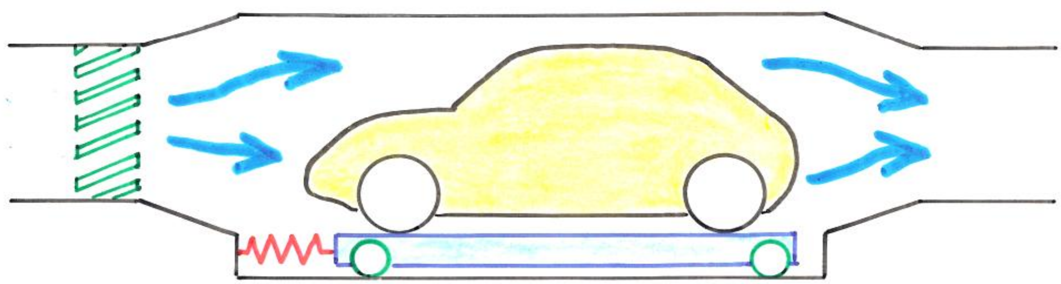
La résistance de l'air dépend de la densité de l'atmosphère qui diminue avec l'altitude, ce qui incite les avions de ligne à voler aussi haut que possible[(1)]. À 20 000 mètres de hauteur, par exemple, la densité de l'air est si réduite que la traînée y est divisée par dix, ce qui permettait au Concorde d'atteindre la vitesse de 2 000 $km.h^{-1}$. Un calcul montre qu'au niveau de la mer et à puissance égale, il n'aurait pas pu dépasser 600 $km.h^{-1}$.

À l'instar des planètes, 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 du véhicule immobile. Il suffit alors de mesurer la force qu'exerce le flux d'air pour en déduire le Cx.



Principe de la soufflerie : une turbine (couleur verte) brasse un vent artificiel (flèches bleues). Un anémomètre mesure la vitesse du vent tandis qu'un dynamomètre (couleur rouge) mesure la force qui s'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 ou des oiseaux.

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.

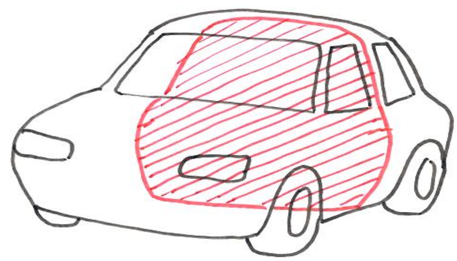
Hélas, cette forme idéale n'est pas applicable aux véhicules terrestres pour des raisons techniques et pratiques.

De toutes manières, les carrosseries des voitures modernes sont dessinées avec comme premier souci celui de l'esthétique, car il faut avant tout plaire à l'acheteur. Tout l'art des ''*designers*'' consiste donc à concilier à la fois les exigences de la mode et celles de l'aérodynamique.

La pénétration dans l'air…

Toutes conditions égales par ailleurs (vitesse, température et pression atmosphériques), l'aptitude à la pénétration dans l'air d'un véhicule ne dépend que de deux paramètres, et deux seulement : la surface frontale, également appelée *maître-couple* (2), et la traînée, caractérisée par le Cx.

La surface frontale étant fixée par le cahier des charges du constructeur selon le gabarit et l'usage auquel le véhicule est destiné, il n'y a guère de marge de manœuvre.



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

La traînée est donc le seul paramètre sur lequel les constructeurs s'activent car, à surface frontale égale, il conditionne la résistance de l'air et, par suite, la vitesse ou la consommation de carburant.

Les quatre traînées…

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

- l'air exerce une pression directe sur l'avant de la carrosserie et le pare-brise, c'est la *traînée de forme* ;

- l'air glisse à la surface de la carrosserie, c'est la *traînée de frottement* ;

- l'air entre en turbulence au contact de divers obstacles, saillies ou protubérances (encadrements de vitres, rétroviseurs, passages de roues, etc.), c'est la *traînée de turbulence* ;

- l'air doit pénétrer à l'intérieur de la carrosserie, non seulement pour alimenter le moteur en oxygène (pour délivrer une puissance de 100 ch, un moteur doit absorber environ 60 litres d'air par seconde), mais aussi pour refroidir le radiateur et ventiler l'habitacle, c'est la *traînée interne*.

La traînée 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, la partie supérieure (toit), inférieure (prises d'air, carénage sous le moteur, plancher, etc.), les passages de roues, les flancs et l'arrière (poupe).

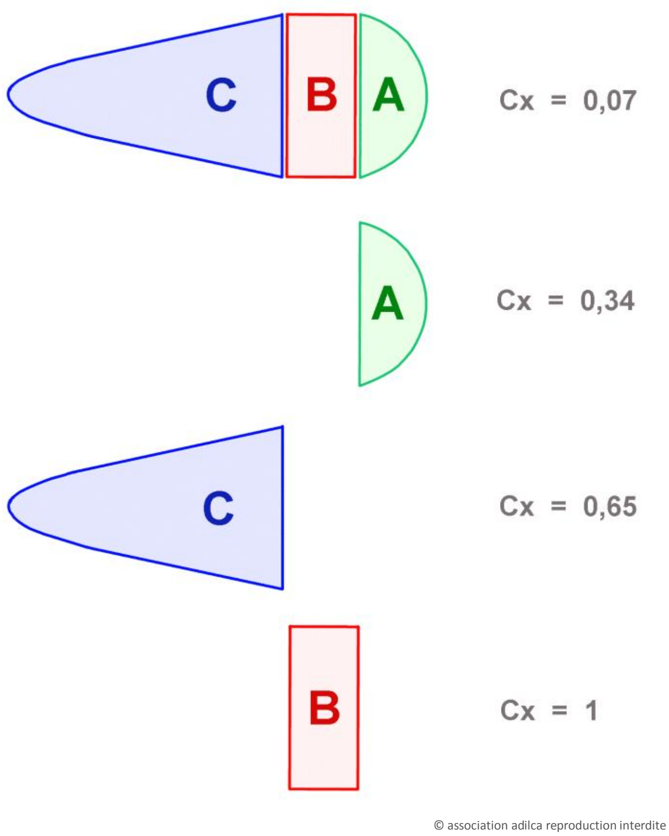
En effet, tous ces éléments sont complémentaires, chacun d'eux devant être conçu pour faciliter l'écoulement global de l'air autour de la voiture.

Le Cx : définition

Le *coefficient de traînée* (Cx) se définit comme un nombre sans dimension qui renseigne sur la traînée globale d'un objet quelconque, autrement dit sa capacité à générer le moins de résistance possible lors de son déplacement dans l'air.

Ce nombre est toujours compris entre 0,07 et 1,4. En effet, le Cx le plus favorable est celui d'un objet de forme ovoïde (0,07), le plus défavorable étant celui d'une demi-sphère creuse qui se déplace face au vent (1,4).

Du point de vue de la physique, le Cx est un coefficient qui se rapporte à la surface frontale de l'objet en question. Ainsi, par convention, une surface plane qui se déplace face au vent présente un Cx égal à 1.



Relation entre forme et Cx
(objet se déplaçant de la gauche vers la droite).

Les progrès du Cx…

Grâce à des méthodes empiriques, le Cx moyen des voitures de tourisme n'a cessé de progresser. Voisin de 0,45 dans les années soixante, il est aujourd'hui inférieur à 0,30.

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

Cette dernière valeur pourrait être encore améliorée si ce n'était une réglementation qui s'obstine à limiter la longueur hors-tout plutôt que celle du chargement : un constructeur propose d'ores et déjà un véhicule articulé dont le Cx est inférieur à 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 parfaitement lisses recouvrant l'intégralité des flancs, roues comprises, du toit jusqu'au ras du sol.

Ainsi profilé, la puissance nécessaire pour maintenir ce camion à vitesse stabilisée sur route horizontale a été 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 surtout, de la masse du véhicule.

Ainsi un camion de 40 tonnes avec une surface latérale de 60 m² se révèlera quatre fois moins sensible au vent latéral qu'une camionnette de 1 800 kilogrammes avec une surface latérale de 12 m². Mais attention : 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 balance et s'exprime grâce à un coefficient appelé Cz.

Exprimer la résistance de l'air…

Cette résistance s'exprime grâce à la relation :

$$R = A . V^2$$

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(3) s'exprime en *kilogramme par mètre* (symbole $\mathbf{kg.m^{-1}}$), et la vitesse **V** du véhicule s'exprime en *mètre par seconde* (symbole $\mathbf{m.s^{-1}}$). La cohérence des unités se vérifie ainsi :

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

Stabiliser la vitesse...

Cette résistance s'oppose au mouvement. Cela signifie que, pour stabiliser la vitesse d'un véhicule sur une route horizontale et si on néglige la résistance au roulement(4), le conducteur doit solliciter une force de traction **F** de même intensité que la résistance de l'air, mais de sens contraire :

$$F = A . V^2$$

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 :

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

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 :

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

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 :

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

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**

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 :

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

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

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

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

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

Ou encore :

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

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

$130^2 = 30^2 + 40^2 + 49^2 + 57^2 + 63^2 + 69^2 = 16\ 900$ (5).

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, deux paramètres qui permettent de calculer précisément la masse volumique de l'air ambiant (valeur moyenne : 1,2 $kg.m^{-3}$). L'altitude est l'autre facteur qui influence la densité de l'atmosphère : ceci est dû au fait que les masses d'air s'empilent à la surface de la Terre à cause de la force de gravitation, un peu comme des assiettes sur une étagère. Les basses couches de l'atmosphère supportent donc le poids des couches supérieures, d'où les variations de pression et de température observées en altitude.*

(2) *''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.*

(3) *Cette grandeur vaut entre 0,7 et 1,3 $kg.m^{-1}$ pour une voiture, entre 5 et 12 $kg.m^{-1}$ pour un camion.*

(4) *La résistance au roulement est proportionnelle à la vitesse, elle ne sollicite qu'environ 20 % de l'énergie nécessaire pour stabiliser la vitesse d'un véhicule terrestre à 90 $km.h^{-1}$ sur une route horizontale. Cette proportion diminue au fur et à mesure que la vitesse s'élève, la résistance de l'air étant proportionnelle au carré de la vitesse.*

(5) *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

*** * ***

QUELQUES 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 :

camion maxi-code : 2,6 m x 3,9 m = 10 m^2

autocar : 2,5 m x 3,2 m = 8 m^2

voiture : 1,8 m x 1,4 m = 2,5 m^2

motocyclette : 1 m x 1,5 m = 1,5 m^2

Coefficient de traînée :

$$Cx = 2 F / (S . M . V^2)$$

Cx : coefficient de traînée, grandeur sans dimension ;
F : force exercée par le flux d'air, exprimée en **N**
S : surface frontale, exprimée en $\mathbf{m^2}$
M : masse volumique de l'air, exprimée en $\mathbf{kg.m^{-3}}$ (M = 1,2) ;
V : vitesse air, exprimée en $\mathbf{m.s^{-1}}$
cohérence des unités :
$\mathbf{Cx} = kg^{+1}.m^{+1}.s^{-2} . (m^2)^{-1} . (kg^{+1}.m^{-3})^{-1} . (m^{+1}.s^{-1})^{-2}$
$\mathbf{Cx} = kg^{+1}.m^{+1}.s^{-2} . m^{-2} . kg^{-1}.m^{+3} . m^{-2}.s^{+2}$ = grandeur sans dimension.

<u>Exemple</u> : calculons le Cx à partir des données suivantes : vent artificiel de vitesse 20 $m.s^{-1}$ exerçant une force de 240 N sur une carrosserie de surface frontale 2,5 m^2 :

$$Cx = 2 \times 240 / 2,5 / 1,2 / 20^2 = 0,40$$

Résistance de l'air :

$$R = ½ S . Cx . M . V^2$$

R : résistance de l'air, exprimée en **N**
S : surface frontale, exprimée en $\mathbf{m^2}$
Cx : coefficient de traînée, grandeur sans dimension ;
M : masse volumique de l'air, exprimée en $\mathbf{kg.m^{-3}}$ (M = 1,2) ;
V : vitesse, exprimée en $\mathbf{m.s^{-1}}$
cohérence des unités : $\mathbf{R} = m^2 . kg.m^{-3} . (m^{+1}.s^{-1})^2 = \mathbf{kg.m.s^{-2}}$

Exemple : calculons la résistance de l'air à la vitesse de 30 $m.s^{-1}$, la voiture présentant une surface frontale de 2,5 m^2 et un Cx de 0,40 :

$$R = ½ \times 2,5 \times 0,40 \times 1,2 \times 30^2 = 540 \text{ N}$$

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 2,5 m^2 et de Cx 0,40 :

$$SCx = 2,5 \times 0,40 = 1 \text{ m}^2$$

Constante aérodynamique :

$$A = S \, . \, Cx \, . \, M$$

A : constante aérodynamique, exprimée en **$kg.m^{-1}$**
S : surface frontale, exprimée en **m^2**
Cx : coefficient de traînée, grandeur sans dimension ;
M : masse volumique de l'air, exprimée en **$kg.m^{-3}$** (M = 1,2) ;
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 m^2 et un Cx de 0,9 :

$$A = 10 \times 0,9 \times 1,2 = 10,8 \text{ kg.m}^{-1}$$

Masse volumique de l'air :

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

M : masse volumique de l'air, exprimée en **$kg.m^{-3}$**
M_0 : masse volumique de l'air au niveau de la mer à 273 K (M_0 = 1,293 **$kg.m^{-3}$**)
A : pression atmosphérique au lieu considéré, exprimée en **hPa**
A_0 : pression atmosphérique au niveau de la mer à 273 K (A_0 = 1 013 **hPa**)
T_0 : température de la glace fondante (T_0 = 273 **K**)
T : température de l'air au lieu considéré, exprimée en **K**
cohérence des unités :
M = $kg.m^{-3}$. hPa . hPa^{-1} . K . K^{-1} = **$kg.m^{-3}$**

Exemple : calculons la masse volumique de l'air lorsque la pression atmosphérique est égale à 1 000 hectopascals sous une température de 20 degrés Celsius (293 K) :

$$M = 1{,}293 \times (1\,000 / 1\,013) \times (273 / 293) = 1{,}19 \text{ kg.m}^{-3}$$

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

*** * ***