



Département Education-Jeunesse du CNES
18, avenue Edouard Belin - 31401 TOULOUSE CEDEX 4
Tél. : () 5 61 27 31 14 / Fax : () 5 61 28 27 67
www.cnes-edu.org/



PLANETE SCIENCES - Secteur Espace
16, place Jacques Brel - 91130 RIS-ORANGIS
Tél. : () 1 69 02 76 10 / Fax : () 1 69 43 21 43
www.planete-sciences.org/espace/

Caractéristiques de l'atmosphère moyenne & Mécanique du vol

Version 3 (Juin 2004)

SOMMAIRE

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | LES MODELES ATMOSPHERIQUES | 3 |
| 2. | TABLE DE L'ATMOSPHERE STANDARD (GOST 4401.64) | 3 |
| 3. | DONNEES GENERALES | 6 |
| 4. | LE MODELE D'ATMOSPHERE PLANETE SCIENCES | 9 |
| 5. | COMPARAISON ET VALIDITE DU MODELE | 11 |
| 6. | VAPEUR D'EAU DANS L'ATMOSPHERE | 11 |
| 7. | DONNEES SUR LA VAPEUR D'EAU | 12 |
| 8. | CARACTERISTIQUES DE L'ATMOSPHERE MOYENNE AU NIVEAU DE LA MER (Z=0) | 12 |
| 9. | VITESSE ASCENSIONNELLE D'UN BALLON | 18 |
| 10. | BILAN DES FORCES APPLIQUEES | 18 |
| 11. | RELATION FONDAMENTALE DE LA DYNAMIQUE | 19 |
| 12. | ALTITUDE D'ECLATEMENT D'UN BALLON | 20 |
| 13. | DESCENTE SOUS PARACHUTE | 21 |

*rédigé par Jean Claude Germain
extrait de la revue 3.2.1. espace n°5 du 1^{er} trimestre 1971*

1. Les modèles atmosphériques

Ce document décrit une table d'atmosphère moyenne ainsi qu'un modèle d'atmosphère simple proposé par Planete Sciences.

2. Table de l'atmosphère standard (GOST 4401.64)

Les données proposées par cette table sont relatives à l'altitude. On a :

- L'accélération de la pesanteur (en m/s^2)
- La température absolue (en degré Kelvin)
L'échelle en degré Kelvin est celle que l'on utilise pour les calculs scientifiques. Le zéro degré Kelvin correspond au zéro absolu c'est à dire la température minimale possible (soit $-273.15^\circ C$). La variation d'un degré Kelvin correspond à la variation d'un degré Celcius.
- Le nombre volumique (en m^{-3})
Le nombre volumique est le nombre de molécule d'air par m^3 .
- La masse volumique de l'air et sa valeur rapportée au sol (en kg/m^3).
- La célérité du son (en m/s)
- Rapport des viscosités cinématique
La viscosité cinématique est peu utilisée dans nos applications. Elle est le quotient de la viscosité absolue par la masse volumique de l'air. La viscosité absolue représente la résistance opposée par l'air pour une vitesse de déformation donnée. Au niveau de la mer la viscosité absolue vaut $1.4607 \cdot 10^{-5} m^2/s$.
- Rapport des conductivités thermiques
La conductivité thermique représente la capacité de l'air à réaliser les échanges thermiques. Au niveau de la mer la conductivité thermique vaut $6.0530 \cdot 10^{-6} kcal/m/s$.
- Rapport des pressions
Pour évaluer les variations des grandeurs physiques liées à l'atmosphère (température, pression,...) en fonction de l'altitude deux méthodes sont envisageables.
 - La première consiste à effectuer une moyenne des paramètres *mesurés* par les radiosondes sur une durée donnée. On obtient alors une **table d'atmosphère moyenne**.
 - La deuxième méthode s'appuie sur un *calcul* du comportement thermodynamique des couches de l'atmosphère. En effet, chaque couche possède un comportement thermodynamique particulier lié à sa composition chimique et aux échanges thermiques globaux de l'atmosphère. Dans ce cas, on parle de **modèle d'atmosphère**. Plus le modèle intègre de paramètres plus il est proche de la réalité. Dans le monde, plusieurs équipes de scientifiques travaillent sur la détermination de ces modèles.

La pression au sol dépend des conditions atmosphériques. Elle peut être déterminée avec un simple baromètre.

- *Lecture de la table*

On souhaite, par exemple, connaître la pression absolue à 11000 m.

La table donne le rapport des pressions suivant : 0,224

Au sol le baromètre indique 1010 mbar.

Ainsi la pression absolue à 11000m vaut : $0.24031 \cdot 1010$ soit 242.7131 mbar.

3. Données générales

Constante universelle des gaz

$R = 8,31436$ joule/degé. mole.

Masse moléculaire de l'air sec

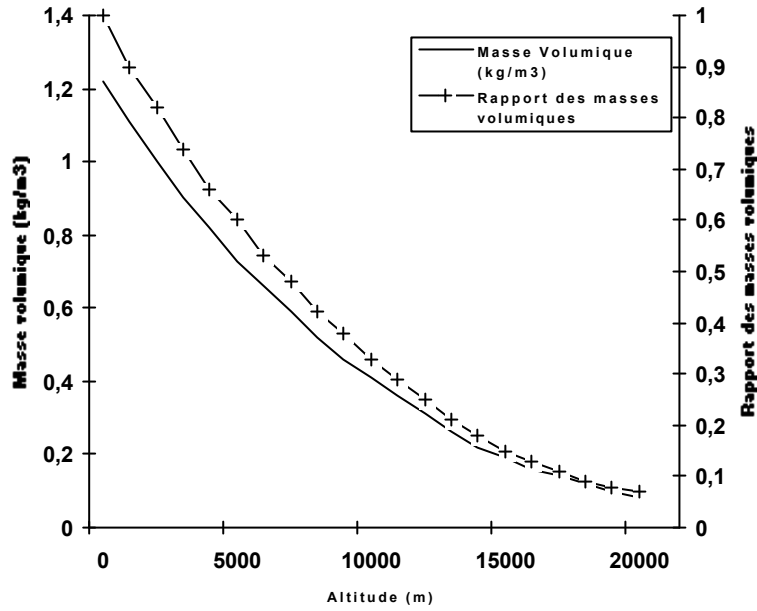
$M_m = 28,966 \cdot 10^{-3}$ kg/mole.

Volume de 1 mole d'air sous les conditions normales

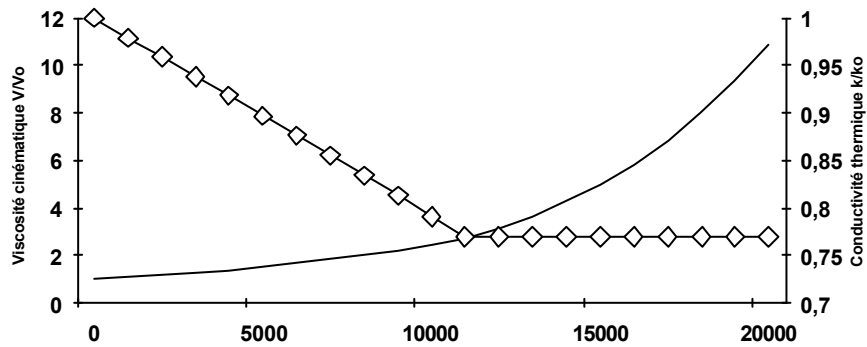
$V_0 = 2,24136 \cdot 10^{-2}$ m³ /mole.

($T_0 = 273,15$ K, $P_0 = 1,01325 \cdot 10^5$ pascals) :

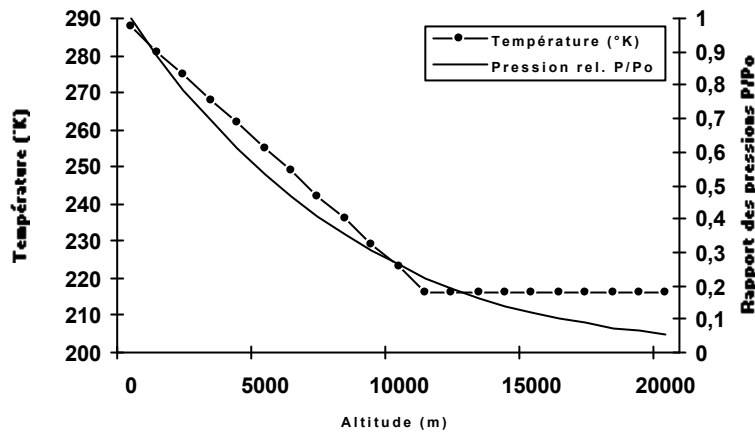
Atmosphère moyenne : Masses volumiques



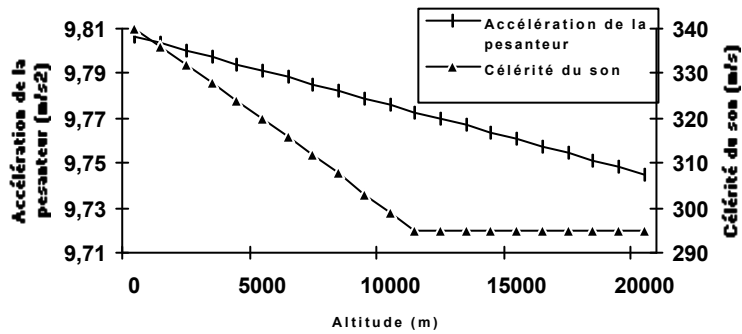
Atmosphère moyenne : Viscosité et conductivité



Atmosphère moyenne : Pression et Température



Atmosphère moyenne : Accélération de la pesanteur et célérité du son



4. Le modèle d'atmosphère PLANETE SCIENCES

Le modèle d'atmosphère développé par l'PLANETE SCIENCES s'appuie sur la thermodynamique des couches de l'atmosphère et présente l'avantage de pouvoir être étendu jusqu'à 40 km d'altitude. Cependant, à l'heure actuelle, il n'est relatif qu'à la pression.

Le modèle troposphérique

Le modèle troposphérique est valable entre 0 et 11 km. Il s'appuie sur le fait qu'il existe peu d'échange de chaleur entre les couches d'air adjacentes. On dit ces échanges adiabatiques.

Les calculs dérivant de cette hypothèse amènent la relation suivante :

$$P = P_0 \left(1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma} \cdot \frac{M \cdot g_0}{R \cdot T_0} \cdot h \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

P : Pression absolue à l'altitude h.

P₀ : Pression absolue au sol.

γ : Rapport des capacités calorifiques à pression et volume constant de l'air.

M : Masse molaire de l'air (28.84 g/mol).

g₀ : Accélération de la pesanteur au niveau du sol (9.81m/s²).

R : Constante des gaz parfait (8.31J/°K/mol)

T₀ : Température au sol (en °K).

h : Altitude (en m)

En prenant T₀=293 °K (20°C)

On a
$$\frac{P}{P_0} = (1 - 3.32 \cdot 10^{-5} \cdot h)^{\frac{7}{2}}$$

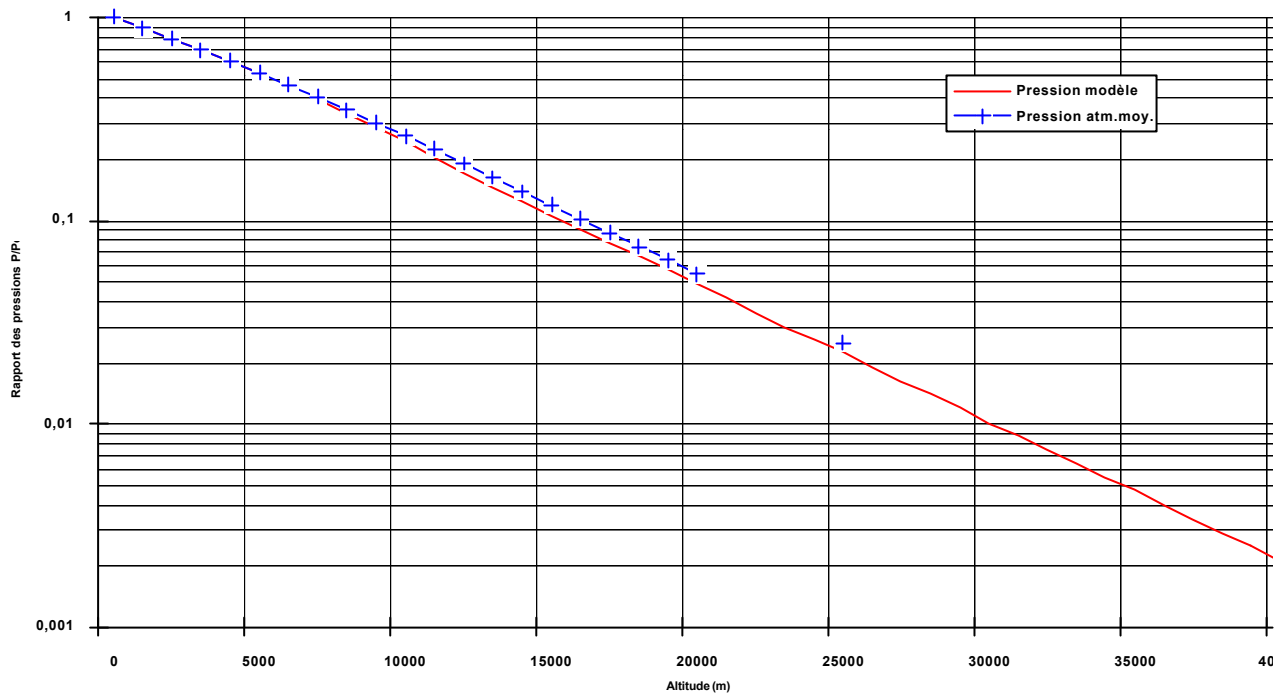
Le modèle stratosphérique

Le modèle stratosphérique est basé sur le caractère isothermique de cette couche. Dans la pratique on constate une légère augmentation de la température pour des altitudes supérieures à 30000m. Toutefois, le modèle reste acceptable jusqu'à 40000m.

On a la relation suivante :

$$P = P_{R_{11000 \text{ m}}} \cdot P_0 \cdot e^{-\frac{M g_0}{R T_{11000 \text{ m}}} \cdot (h - 11000)}$$

Altitude-Pression : comparaison des modèles



| Altitude | Pression (modèle PLANETE SCIENCES) | Pression (Atmo.stand.) |
|----------|------------------------------------|------------------------|
| 0 | 1 | 1 |
| 1000 | 0,888 | 0,887 |
| 2000 | 0,786 | 0,784 |
| 3000 | 0,692 | 0,692 |
| 4000 | 0,607 | 0,608 |
| 5000 | 0,529 | 0,533 |
| 6000 | 0,459 | 0,466 |
| 7000 | 0,396 | 0,405 |
| 8000 | 0,339 | 0,351 |
| 9000 | 0,288 | 0,303 |
| 10000 | 0,243 | 0,261 |
| 11000 | 0,203 | 0,224 |
| 12000 | 0,178 | 0,191 |
| 13000 | 0,158 | 0,163 |
| 14000 | 0,141 | 0,139 |
| 15000 | 0,125 | 0,119 |
| 16000 | 0,111 | 0,102 |
| 17000 | 0,099 | 0,087 |
| 18000 | 0,088 | 0,0746 |
| 19000 | 0,079 | 0,0638 |
| 20000 | 0,070 | 0,0545 |

| Altitude | Pression (modèle PLANETE SCIENCES) | |
|----------|------------------------------------|--|
| 21000 | 0,062 | |
| 22000 | 0,055 | |
| 23000 | 0,049 | |
| 24000 | 0,044 | |
| 25000 | 0,039 | |
| 26000 | 0,035 | |
| 27000 | 0,031 | |
| 28000 | 0,027 | |
| 29000 | 0,024 | |
| 30000 | 0,022 | |
| 31000 | 0,019 | |
| 32000 | 0,017 | |
| 33000 | 0,015 | |
| 34000 | 0,013 | |
| 35000 | 0,012 | |
| 36000 | 0,011 | |
| 37000 | 0,009 | |
| 38000 | 0,008 | |
| 39000 | 0,007 | |
| 40000 | 0,006 | |

P: Pression absolue à l'altitude h.
 P_{R1100m} : Pression relative à 11000m (0.204)
 P_0 : Pression absolue au sol.
 M : Masse molaire de l'air (28.84g/mol)
 g_0 : Accélération de la pesanteur au sol (9.81m/s²)
 R : Constante des gaz parfaits (8.31 J/°K/mol)
 T_{11000m} : Température à 11000m (216 °K)

On a :

$$\frac{P}{P_0} = 0.204 \cdot e^{-1.56 \cdot 10^{-4} \cdot (h - 11000)}$$

5. Comparaison et validité du modèle

Les courbes représentant la pression en fonction de l'altitude montrent que le modèle PLANETE SCIENCES donnent des résultats proches de l'atmosphère standard (GOST) de 0 à 20000 m. Au-delà, les données du modèle PLANETE SCIENCES ont pu être validées grâce à d'autres tables.

6. Vapeur d'eau dans l'atmosphère

L'humidité est un facteur météorologique important. Il est très difficile à évaluer car fortement dépendant des conditions nuageuses locales. Globalement, l'humidité diminue avec l'altitude pour disparaître dans la stratosphère. On la caractérise par le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau " e " à la pression saturante " E ".

Ainsi l'humidité relative est

$$f\% = \frac{e}{E} \cdot 100$$

L'humidité spécifique " s " est la masse de vapeur pour un kg d'air humide.

Elle s'exprime en kg de vapeur par kg d'air humide à la pression P.

$$s = \frac{0,622 e}{P - 0,378 e} \text{ kg/kg}$$

En valeur approchée

$$s = \frac{0,622 e}{P} \text{ kg/kg}$$

Dans la troposphère et la stratosphère, la distribution moyenne de " s " est donnée avec une approximation satisfaisante par les formules :

dans la troposphère $s(z) = S_0 e^{a_0 \cdot z}$ pour $0 < z < z_1$

dans la stratosphère $s(z) = S_1 e^{a_1 (z - z_1)}$ pour $z_1 < z < z_m$

Suivant les saisons et les régions du monde

- s_0 varie entre 1,6 et 17,5 g/kg
- a_0 varie entre 0,42 et 0,84 km⁻¹
- S_1 varie entre 0,002 et 0,05 g/kg

- z_1 varie entre 8 à 15 km = altitude de la tropopause
- a_1 varie entre 0 et $0,31 \text{ km}^{-1}$

7. Données sur la vapeur d'eau

Masse moléculaire de la vapeur d'eau $M = 18,016 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mole}$
 Chaleur de condensation à la température T en °C $L = 597,26 - 0,647 \cdot T \text{ cal/g}$
 La pression de saturation est une donnée essentielle au calcul de l'humidité relative " f ".

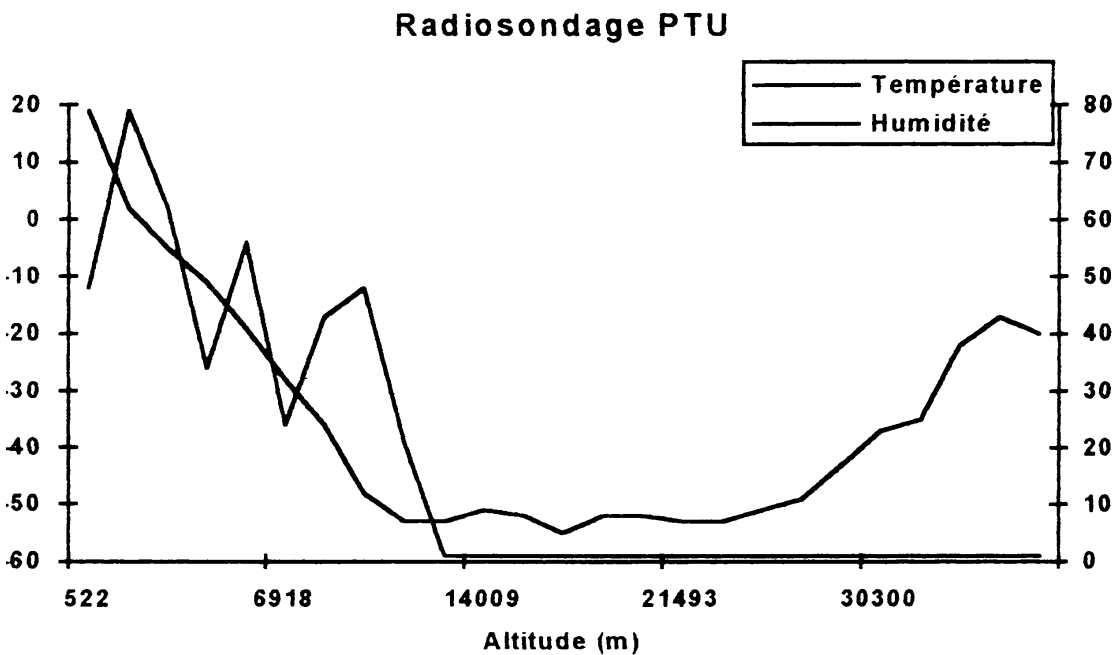
Nous donnons deux tables caractérisant la pression de saturation de la vapeur d'eau au-dessus soit d'une surface plane d'eau soit d'une surface plane de glace, en fonction de la température.

Exemples :

- Au-dessus de l'eau
 à 373 K, $E = 1013,251 \cdot 10^{+2} \text{ pascals}$ (ce qui correspond à la pression atmosphérique normale).
 à 203 K, $E = 0,004919 \cdot 10^{+2} \text{ pascals} = 4,919 \cdot 10^{-1} \text{ pascals}$.
- Au-dessus de la glace, à 220 K,
 $E = 0,027020 \cdot 10^{+2} \text{ pascals} = 2,7020 \text{ pascals}$.

8. Caractéristiques de l'atmosphère moyenne au niveau de la mer (z=0)

Pression $P_0 = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ pascals}$ ou $P_0 = 760 \text{ mm de mercure}$.
 Température $T = 288,150 \text{ K}$ ($t = 15^\circ \text{ C}$).
 Viscosité cinématique $V_0 = 1,4607 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
 Conductivité thermique $k_0 = 6,0530 \cdot 10^{-6} \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \text{ (K)}$.



Pression de saturation de la vapeur d'eau

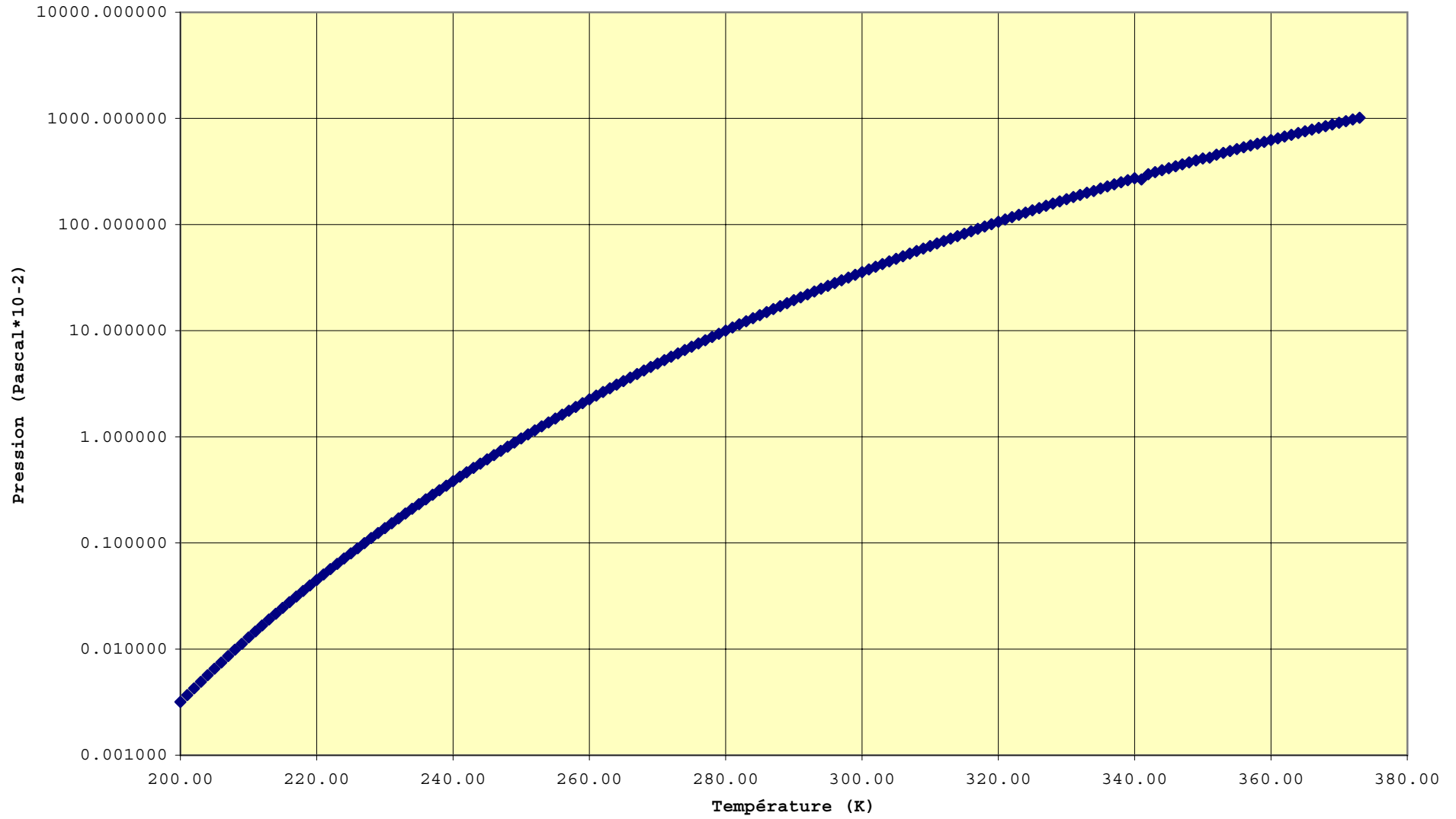
| Température absolue | Pression de saturation de la vapeur d'eau sur un plan d'eau en fonction de la température (en Pascal*10-2) |
|---------------------|--|
| 373.00 | 1013.25 |
| 372.00 | 977.61 |
| 371.00 | 943.22 |
| 370.00 | 909.45 |
| 369.00 | 876.88 |
| 368.00 | 845.28 |
| 367.00 | 814.63 |
| 366.00 | 784.92 |
| 365.00 | 756.11 |
| 364.00 | 728.19 |
| 363.00 | 701.13 |
| 362.00 | 674.92 |
| 361.00 | 649.53 |
| 360.00 | 624.94 |
| 359.00 | 601.13 |
| 358.00 | 578.09 |
| 357.00 | 555.79 |
| 356.00 | 534.22 |
| 355.00 | 513.36 |
| 354.00 | 493.17 |
| 353.00 | 473.66 |
| 352.00 | 454.80 |
| 351.00 | 426.58 |
| 350.00 | 418.98 |
| 349.00 | 401.97 |
| 348.00 | 385.56 |
| 347.00 | 369.71 |
| 346.00 | 354.41 |
| 345.00 | 339.65 |
| 344.00 | 325.41 |
| 343.00 | 311.68 |
| 342.00 | 298.45 |
| 341.00 | 265.69 |
| 340.00 | 273.40 |
| 339.00 | 261.56 |
| 338.00 | 250.15 |
| 337.00 | 239.17 |
| 336.00 | 228.61 |
| 335.00 | 218.44 |
| 334.00 | 206.66 |
| 333.00 | 199.25 |
| 332.00 | 190.21 |
| 331.00 | 181.52 |
| 330.00 | 173.17 |
| 329.00 | 165.16 |
| 328.00 | 157.46 |
| 327.00 | 150.06 |
| 326.00 | 142.97 |
| 325.00 | 136.17 |
| 324.00 | 129.64 |
| 323.00 | 123.39 |
| 322.00 | 117.40 |
| 321.00 | 111.65 |
| 320.00 | 106.15 |
| 319.00 | 100.89 |
| 318.00 | 95.85 |
| 317.00 | 91.03 |
| 316.00 | 86.42 |
| 315.00 | 82.01 |
| 314.00 | 77.80 |
| 313.00 | 73.77 |
| 312.00 | 69.93 |
| 311.00 | 66.26 |
| 310.00 | 62.76 |
| 309.00 | 59.42 |
| 308.00 | 56.23 |
| 307.00 | 53.20 |
| 306.00 | 50.30 |
| 305.00 | 47.55 |
| 304.00 | 44.92 |
| 303.00 | 42.43 |
| 302.00 | 40.05 |
| 301.00 | 37.79 |
| 300.00 | 35.65 |
| 299.00 | 33.61 |
| 298.00 | 31.67 |
| 297.00 | 29.83 |
| 296.00 | 28.06 |
| 295.00 | 26.43 |
| 294.00 | 24.86 |
| 293.00 | 23.37 |
| 292.00 | 21.96 |
| 291.00 | 20.63 |
| 290.00 | 19.37 |
| 289.00 | 18.17 |

Pression de saturation de la vapeur d'eau

| | |
|--------|-------|
| 288.00 | 17.04 |
| 287.00 | 15.98 |
| 286.00 | 14.97 |
| 285.00 | 14.02 |
| 284.00 | 13.12 |
| 283.00 | 12.27 |
| 282.00 | 11.47 |
| 281.00 | 10.72 |
| 280.00 | 10.01 |
| 279.00 | 9.35 |
| 278.00 | 8.72 |
| 277.00 | 8.13 |
| 276.00 | 7.57 |
| 275.00 | 7.05 |
| 274.00 | 6.57 |
| 273.00 | 6.11 |
| 272.00 | 5.68 |
| 271.00 | 5.27 |
| 270.00 | 4.90 |
| 269.00 | 4.54 |
| 268.00 | 4.21 |
| 267.00 | 3.91 |
| 266.00 | 3.62 |
| 265.00 | 3.35 |
| 264.00 | 3.10 |
| 263.00 | 2.86 |
| 262.00 | 2.64 |
| 261.00 | 2.44 |
| 260.00 | 2.25 |
| 259.00 | 2.08 |
| 258.00 | 1.91 |
| 257.00 | 1.76 |
| 256.00 | 1.62 |
| 255.00 | 1.49 |
| 254.00 | 1.37 |
| 253.00 | 1.25 |
| 252.00 | 1.15 |
| 251.00 | 1.05 |
| 250.00 | 0.96 |
| 249.00 | 0.88 |
| 248.00 | 0.81 |
| 247.00 | 0.74 |
| 246.00 | 0.67 |
| 245.00 | 0.61 |
| 244.00 | 0.56 |
| 243.00 | 0.51 |
| 242.00 | 0.46 |
| 241.00 | 0.42 |
| 240.00 | 0.38 |
| 239.00 | 0.35 |
| 238.00 | 0.31 |
| 237.00 | 0.28 |
| 236.00 | 0.26 |
| 235.00 | 0.23 |
| 234.00 | 0.21 |
| 233.00 | 0.19 |
| 232.00 | 0.17 |
| 231.00 | 0.15 |
| 230.00 | 0.14 |
| 229.00 | 0.12 |
| 228.00 | 0.11 |
| 227.00 | 0.10 |
| 226.00 | 0.09 |
| 225.00 | 0.08 |
| 224.00 | 0.07 |
| 223.00 | 0.06 |
| 222.00 | 0.06 |
| 221.00 | 0.05 |
| 220.00 | 0.04 |
| 219.00 | 0.04 |
| 218.00 | 0.04 |
| 217.00 | 0.03 |
| 216.00 | 0.03 |
| 215.00 | 0.02 |
| 214.00 | 0.02 |
| 213.00 | 0.02 |
| 212.00 | 0.02 |
| 211.00 | 0.01 |
| 210.00 | 0.01 |
| 209.00 | 0.01 |
| 208.00 | 0.01 |
| 207.00 | 0.01 |
| 206.00 | 0.01 |
| 205.00 | 0.01 |
| 204.00 | 0.01 |
| 203.00 | 0.00 |
| 202.00 | 0.00 |
| 201.00 | 0.00 |
| 200.00 | 0.00 |

Pression de saturation de la vapeur d'eau

Pression de saturation de la vapeur d'eau sur un plan d'eau en fonction de la température

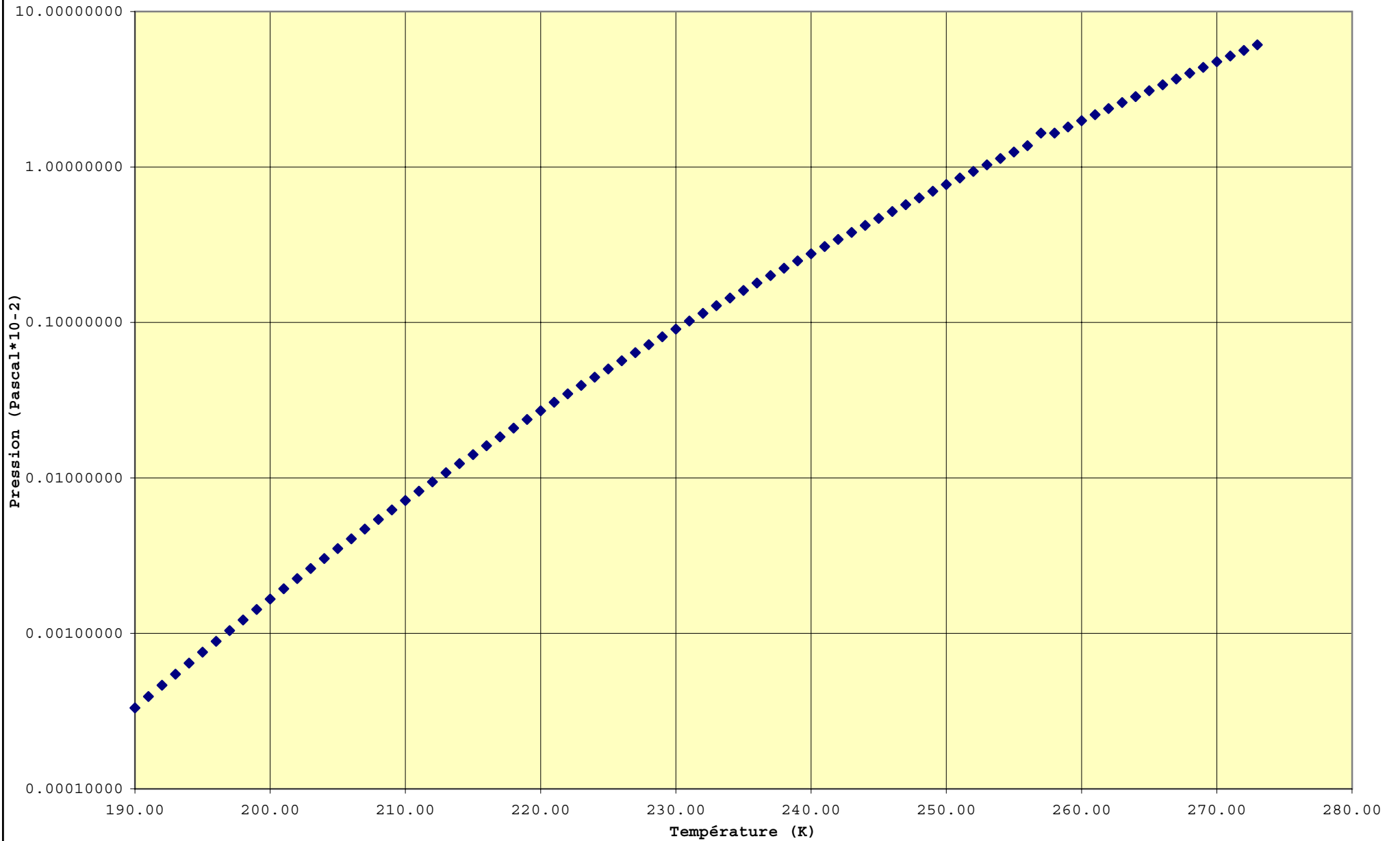


Pression de saturation glace

| Température absolue | Pression de saturation de la vapeur d'eau sur un plan de glace en fonction de la température (en Pascal*10 ⁻²) |
|---------------------|--|
| 273.0000 | 6.1064 |
| 272.0000 | 5.6219 |
| 271.0000 | 5.1727 |
| 270.0000 | 4.7564 |
| 269.0000 | 4.3709 |
| 268.0000 | 4.0141 |
| 267.0000 | 3.6840 |
| 266.0000 | 3.3789 |
| 265.0000 | 3.0970 |
| 264.0000 | 2.8368 |
| 263.0000 | 2.5966 |
| 262.0000 | 2.3752 |
| 261.0000 | 2.1712 |
| 260.0000 | 1.9833 |
| 259.0000 | 1.8104 |
| 258.0000 | 1.6514 |
| 257.0000 | 1.6514 |
| 256.0000 | 1.3711 |
| 255.0000 | 1.2479 |
| 254.0000 | 1.1350 |
| 253.0000 | 1.0315 |
| 252.0000 | 0.9368 |
| 251.0000 | 0.8500 |
| 250.0000 | 0.7706 |
| 249.0000 | 0.6983 |
| 248.0000 | 0.6322 |
| 247.0000 | 0.5719 |
| 246.0000 | 0.5169 |
| 245.0000 | 0.4668 |
| 244.0000 | 0.4212 |
| 243.0000 | 0.3797 |
| 242.0000 | 0.3420 |
| 241.0000 | 0.3078 |
| 240.0000 | 0.2768 |
| 239.0000 | 0.2487 |
| 238.0000 | 0.2232 |
| 237.0000 | 0.2002 |
| 236.0000 | 0.1794 |
| 235.0000 | 0.1606 |
| 234.0000 | 0.1436 |
| 233.0000 | 0.1283 |
| 232.0000 | 0.1145 |
| 231.0000 | 0.1021 |
| 230.0000 | 0.0907 |
| 229.0000 | 0.0809 |
| 228.0000 | 0.0720 |
| 227.0000 | 0.0639 |
| 226.0000 | 0.0567 |
| 225.0000 | 0.0502 |
| 224.0000 | 0.0445 |
| 223.0000 | 0.0393 |
| 222.0000 | 0.0347 |
| 221.0000 | 0.0307 |
| 220.0000 | 0.0270 |
| 219.0000 | 0.0238 |
| 218.0000 | 0.0209 |
| 217.0000 | 0.0184 |
| 216.0000 | 0.0161 |
| 215.0000 | 0.0141 |
| 214.0000 | 0.0124 |
| 213.0000 | 0.0108 |
| 212.0000 | 0.0094 |
| 211.0000 | 0.0082 |
| 210.0000 | 0.0072 |
| 209.0000 | 0.0062 |
| 208.0000 | 0.0054 |
| 207.0000 | 0.0047 |
| 206.0000 | 0.0041 |
| 205.0000 | 0.0035 |
| 204.0000 | 0.0030 |
| 203.0000 | 0.0026 |
| 202.0000 | 0.0023 |
| 201.0000 | 0.0019 |
| 200.0000 | 0.0017 |
| 199.0000 | 0.0014 |
| 198.0000 | 0.0012 |
| 197.0000 | 0.0010 |
| 196.0000 | 0.0009 |
| 195.0000 | 0.0008 |
| 194.0000 | 0.0006 |
| 193.0000 | 0.0005 |
| 192.0000 | 0.0005 |
| 191.0000 | 0.0004 |
| 190.0000 | 0.0003 |

Pression de saturation glace

Pression de saturation de la vapeur d'eau sur un plan de glace en fonction de la température



Mécanique du vol

Documentation technique

VERSION 1 (Octobre 95)
par Nicolas VERDIER

9. Vitesse ascensionnelle d'un ballon

La connaissance de la vitesse ascensionnelle d'un ballon permet d'évaluer la trajectoire de celui-ci. Pour déterminer cette vitesse, il est nécessaire d'effectuer le bilan des forces appliquées au ballon et résoudre la relation fondamentale de la dynamique.

10. Bilan des forces appliquées

Si un ballon est capable de s'élever dans les airs c'est qu'il existe une force qui s'oppose à son poids. Cette force est connue sous le nom de poussée d'Archimède. La poussée d'Archimède est égale au poids du volume d'air déplacé c'est à dire le volume de l'espace qu'occupe l'ensemble de la chaîne de vol. Dans le cas d'un ballon c'est l'enveloppe qui contribue essentiellement à cette poussée. Si V est le volume du ballon, la poussée d'Archimède vaut :

$$P_a = \rho \cdot V \cdot g_0$$

avec ρ : Masse volumique de l'air
 V : Volume de l'enveloppe
 g_0 : Accélération de la pesanteur au sol

Pour que le ballon puisse s'élever il faut nécessairement $P_a > P$ où $P = M \cdot g_0$ (M est la masse de la chaîne de vol).

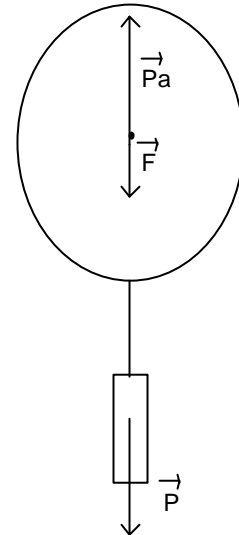
La condition de vol s'écrit donc :

$$\rho \cdot V > M$$

Cependant, au cours du vol une autre force apparaît. Il s'agit de la force de frottement qu'engendre l'air ambiant. Cette force F qui s'oppose au mouvement s'exprime par :

$$F = \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot \rho \cdot S \cdot v^2$$

avec C_x : Coefficient de traînée
 ρ : Masse volumique de l'air
 S : Maître couple du ballon
 V : Vitesse ascensionnelle du ballon



Le coefficient de traînée est le paramètre le plus difficile à déterminer car il dépend de la nature et de la forme de l'enveloppe. Nous le considérons généralement égal à 1. Le maître couple est la surface que présente le ballon dans le sens du mouvement. Le maître couple se déduit du volume du ballon.

Dans la pratique il existe d'autres forces (vent...) appliquées au ballon qui modifient son comportement. Cependant dans notre modèle simplifié on distinguera uniquement :

P : Poids de l'ensemble de la chaîne de vol

P_a : Poussée d'Archimède

F : Frottement du ballon dans l'air

11. Relation fondamentale de la dynamique

Pour déterminer la vitesse ascensionnelle du ballon on lui applique la relation fondamentale de la dynamique.

$$\vec{F} + \vec{P}_a + \vec{P} = M \vec{a}$$

d'où
$$-\frac{1}{2} \cdot \mathbf{r} \cdot C_x \cdot S \cdot v^2 \cdot \vec{k} + \mathbf{r} \cdot V \cdot g_0 \cdot \vec{k} - M \cdot g_0 \cdot \vec{k} = M \cdot a \cdot \vec{k}$$

Or, l'accélération a est, en fait, la variation de la vitesse v au cours du temps.

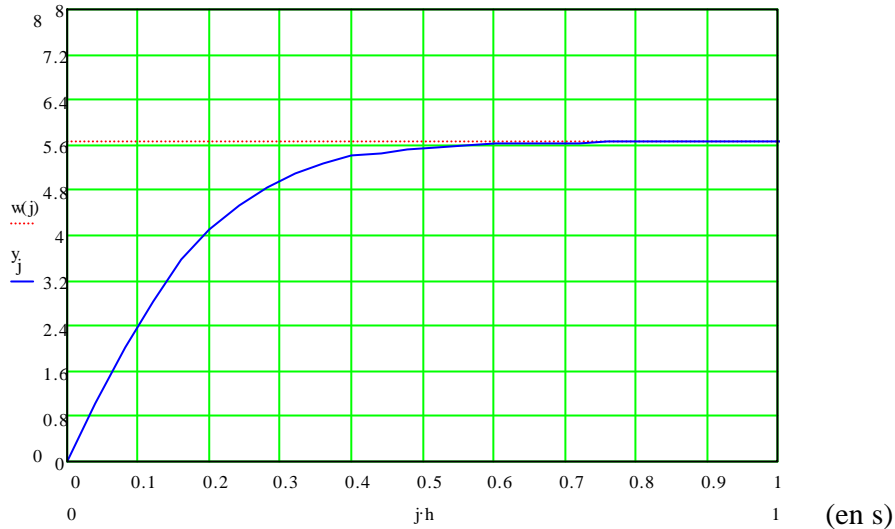
Ainsi,
$$a = \frac{dv}{dt}$$

On obtient finalement l'équation différentielle suivante :

$$-\frac{1}{2} \frac{\mathbf{r} \cdot C_x \cdot S}{M} v^2 + \left(\frac{\mathbf{r} \cdot V}{M} - 1 \right) \cdot g_0 = \frac{dv}{dt}$$

Pour résoudre cette équation il est bon d'énoncer les conditions initiales. Dans le cas d'un lâcher de ballon on a $V(t=0)=0$.

La résolution analytique d'une telle équation n'est pas aisée et il est nécessaire d'utiliser une méthode de résolution numérique. La méthode de Runge-Kutta à l'ordre 4 donne le résultat suivant :



$$p = 1.22 \text{ kg/m}^3 \quad C_x = 1 \quad S = 4 \text{ m}^2 \quad V = 9 \text{ m}^3 \quad M = 3 \text{ kg} \quad g_0 = 9.81 \text{ m/s}^2$$

Ce graphe montre l'évolution de la vitesse en fonction du temps. On remarque que, très rapidement, celle-ci tend vers une vitesse limite constante d'environ 5.6m/s. On peut déduire de ce résultat qu'un ballon "réagit" très vite à son environnement et que toute perturbation atmosphérique se répercutera sur la vitesse ascensionnelle de celui-ci.

Il en résulte que le temps que met le ballon pour atteindre l'équilibre est faible devant celui d'évolution des paramètres physiques. On peut donc considérer à tout instant qu'il y a équilibre. Cette hypothèse permet de simplifier la relation fondamentale de la dynamique puisque, à l'équilibre, la variation de la vitesse du ballon en fonction du temps est nulle.

On a : $a = 0$

d'où l'expression de la vitesse limite

$$V_l = \sqrt{\frac{2 \cdot (r \cdot V - M)}{C_x \cdot S \cdot r}}$$

12. Altitude d'éclatement d'un ballon

Pour déterminer l'altitude d'éclatement d'un ballon on se réfère à la documentation des fabricants.

| Type de ballon | 100 | 200 | 300 | 600 | 1200 | 2000 |
|------------------------------------|-----|------|------|------|------|------|
| Poids moyen (g) | 100 | 200 | 300 | 600 | 1200 | 2000 |
| Force ascensionnelle libre (g) | 500 | 1150 | 1350 | 1100 | 2000 | 2000 |
| Volume au lâcher (m ³) | 0.9 | 1.6 | 1.8 | 3.0 | 4.2 | 5.7 |
| Diamètre à l'éclatement (m) | 2.4 | 3.6 | 4.5 | 6.4 | 9.7 | 13.7 |
| Altitude (km) | 16 | 19 | 23 | 28 | 30 | 40 |

La force ascensionnelle libre est la poussée équivalente d'un ballon possédant une charge utile de 1kg.

Les altitudes mentionnées sont donc relatives à une charge utile de 1 kg. Il est intéressant de déterminer la valeur de la tare c'est à dire la masse qu'il faut suspendre au ballon pour annuler sa force ascensionnelle.

On a **Tare= Fasc. libre+ 1kg**

Si le poids de la chaîne de vol est inférieur à la tare, le ballon atteindra, en théorie, l'altitude indiquée puisque l'éclatement de celui-ci n'est relatif qu'à son volume. Néanmoins la vitesse ascensionnelle verra sa valeur diminuer avec l'augmentation de la charge utile.

Cependant, si la masse du ballon excède la tare, le décollage n'est possible qu'en gonflant davantage le ballon. Le ballon éclatera, à une altitude plus faible.

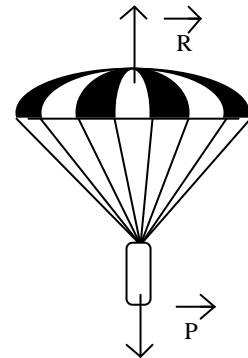
13. *Descente sous parachute*

Lorsque la chaîne de vol descend sous parachute une force de frottement R similaire à la force F du §1.1 s'oppose au déplacement. Compte tenu des résultats obtenus au §1.1 la vitesse de descente peut s'exprimer en considérant l'équilibre des forces R et P.

On a
$$v = \sqrt{\frac{2M' \cdot g_0}{S \cdot C_x \cdot r}}$$

On remarque que la vitesse v dépend de la masse volumique de l'air. Or, en utilisant la table d'atmosphère standard on obtient les vitesses de chute suivante.

Pour :
 S=1.2m²
 Cx=1
 M'=2.5kg (masse de la chaîne sans ballon)



| | | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|------|------|----|
| Altitude | 20000 | 16000 | 12000 | 8000 | 4000 | 0 |
| Vitesse | 77.5 | 57.5 | 41.3 | 31.7 | 25.5 | 21 |