**Ballon dirigeable souple à masse de gaz constante (hélium) ayant un volume total d'enveloppe constant, équipé de ballonnets Air**

# Altitude de plénitude

*Marcel Délèze, Stephane Rousson*

## 1. Caractéristiques du ballon

Cette caractéristique est fournie par le constructeur :

$p_{su}=$ surpression d'utilisation de l'hélium par rapport à la pression atmosphérique, afin d'assurer une certaine rigidité de l'enveloppe

## 2. Une donnée de gonflage

Donner l'une des valeurs suivantes qui, chacune, caractérise le gonflage :

- $\dfrac{V_{He}}{V_{enveloppe}}$ = rapport des volumes « hélium/total » aux conditions atmosphériques standard
- $\dfrac{V_{ballonnets\ \ standard}}{V_{enveloppe}}$ = rapport des volumes « ballonnets/total » aux conditions atmosphériques standard

## 3. Données du jour du vol

### *3.1 Mesures au sol*

$p_1=$ pression atmosphérique ; il s'agit de la pression non corrigée, c'est-à-dire qui n'est pas ramenée à l'altitude 0 ;

$t_1=$ température de l'air en degrés Celsius ; $T_1=t_1+273.15\,K$ ;

$H_1=$ humidité relative de l'air ;

$z_1=$ altitude du lieu des mesures ; elle peut provenir d'un GPS ou d'une carte topographique, mais pas d'un altimètre basé sur la mesure de la pression.

### *3.2 Estimation de la surchauffe du gaz hélium par le pilote*

Pour l'altitude de plénitude, le pilote doit faire une estimation de la surchauffe qui résulte du rayonnement infrarouge et des échanges convectifs de l’enveloppe avec le vent relatif. Comme cette surchauffe n'est pas connue avec précision, un intervalle est demandé :

$s_{min}, s_{max}$

### *3.3 Incertitude et sécurité à propos de la surchauffe*

Si le but était d'obtenir le résultat le plus proche de l'altitude de plénitude réelle, les calculs seraient réalisés avec la surchauffe moyenne $s_{moyen} = \dfrac{s_{min}+s_{max}}{2}$ . Par contre, si l'unique préoccupation était la sécurité, c'est avec la surchauffe maximale $s_{max}$ que les calculs seraient exécutés.

Dans cette version du calculateur, un compromis entre ces deux approches a été fait. La surchauffe retenue est : $t_s = \dfrac{s_{moyen}+s_{max}}{2} = 0.25*s_{min}+0.75*s_{max}$ .

## 4. Lois physiques

*4.1 Rapport des volumes « hélium/total »*

Si le rapport des volumes « ballonnets/total » est donné, le rapport des volumes « hélium/total » s'en déduit :

$$\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} = 1 - \frac{V_{ballonnets\ standard}}{V_{enveloppe}}$$

*4.2 Le modèle du nivellement barométrique*

Le modèle du nivellement barométrique est décrit dans [www.deleze.name/marcel/sec2/applmaths/pression-altitude/pression-altitude.pdf](www.deleze.name/marcel/sec2/applmaths/pression-altitude/pression-altitude.pdf)

$a$ = gradient de température ;

$M, g, R$ = masse molaire de l'air, accélération gravifique, constante des gaz parfaits.

La pression et la température sont des valeurs moyennes, donc indépendantes des conditions météorologiques du jour, que l'on peut exprimer comme suit :

$p_{nivel}(z) = p_{standard} \cdot \left(1 - \frac{a}{T_{standard}} z\right)^{\frac{M g}{R a}}$ = pression atmosphérique à l'altitude $z$

$T_{nivel}(z) = T_{standard} - a \cdot z$ = température de l'air à l'altitude z

*4.3 Modèle retenu pour l'atmosphère du jour*

La pression et la température sont adaptées aux conditions atmosphériques du jour :

$p(z) = p_1 \cdot \left(1 - \frac{a}{T_{standard}} (z - z_1)\right)^{\frac{M g}{R a}}$ = pression atmosphérique à l'altitude $z$ [*Formule 4.3 a*]

$T(z) = T_1 - a \cdot (z - z_1)$ = température de l'air à l'altitude $z$ [*Formule 4.3 b*]

*4.4 Volume des ballonnets à l'altitude z*

$V_{He}(z, t_s)$ = volume de l'hélium aux conditions atmosphériques standard en fonction de l'altitude $z$ et la surchauffe $t_s$ .

La quantité d'hélium étant constante, calculons, au moyen de la loi des gaz parfaits, l'évolution du volume de l'hélium entre les conditions atmosphériques standard et le jour du vol à l'altitude $z$ :

$$\frac{(p_{standard} + p_{su}) \cdot V_{He}}{T_{standard}} = \frac{(p(z) + p_{su}) \cdot V_{He}(z, t_s)}{T(z) + t_s} .$$

On en déduit le volume de l'hélium en fonction de l'altitude $z$ et la surchauffe $t_s$ :

$$V_{He}(z, t_s) = \frac{(p_{standard} + p_{su}) \cdot V_{He} \cdot (T(z) + t_s)}{(p(z) + p_{su}) \cdot T_{standard}} \qquad [\textit{Formule 4.4 a}]$$

ainsi que le volume des ballonnets à l'altitude z :

$$V_{ballonnets}(z, t_s) = V_{enveloppe} - V_{He}(z, t_s) \qquad [\textit{Formule 4.4 b}]$$

*4.5 Altitude de plénitude du jour, avant correction d'humidité*

Dans la [*Formule 4.4 b*], l'altitude $z$ doit respecter la condition $V_{ballonnets}(z, t_s) \geq 0$ , ce qui plafonne l'altitude à l'altitude de plénitude $z \leq z_{plén}(t_s)$ .

À l'altitude de plénitude, les ballonnets d'air sont vides et l'hélium occupe tout le volume de l'enveloppe. Ainsi, $z_{plén}(t_s)$ est la solution de l'équation d'inconnue $z$ que l'on obtient en exprimant que l'hélium obéit à la loi des gaz parfaits :

$$\frac{(p_{standard} + p_{su}) \cdot V_{He}}{T_{standard}} = \frac{(p(z) + p_{su}) \cdot V_{enveloppe}}{T(z) + t_s}$$

ou, d'une manière équivalente,

$$\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} \cdot \frac{T(z) + t_s}{T_{standard}} = \frac{p(z) + p_{su}}{p_{standard} + p_{su}} \qquad [\textit{Formule 4.5}]$$

que l'on peut résoudre au moyen d'une méthode numérique itérative, par exemple avec la méthode de Newton ; voir [*Annexes A1-A4*]. On obtient ainsi

$z_{plén,m}$ = altitude de plénitude moyenne du jour, avant correction d'humidité

*4.5 Correction d'humidité*

Voir [*Annexe B2*]. Il en résulte

$z_{plén,h} = alt(z_{plén,m})$ = altitude de plénitude du jour, qui est la réponse finale.

## 5. Calculs et résultats

*5.1 Caractéristiques du gonflage*

À partir du rapport des volumes « hélium/total », on calcule

$\frac{V_{ballonnets\ \ standard}}{V_{enveloppe}} = 1 - \frac{V_{He}}{V_{enveloppe}}$ = rapport des volumes « ballonnets/total » aux conditions atmosphériques standard

*5.2 Valeurs intermédiaires*

Afficher les valeurs intermédiaires calculées.

*5.3 Résultat*

Altitude de plénitude après correction d'humidité : $z_{plén,h}$ .

*5.4 Calcul d'erreur*

L'intervalle d'incertitude de l'altitude de plénitude est calculé comme suit :

$z_{min}=$ solution de l'équation [*Formule 4.5*] pour $t_s = s_{max}$ ;

$z_{max}=$ solution de l'équation [*Formule 4.5*] pour $t_s = s_{min}$ .

Ces deux équations sont résolues par une méthode itérative numérique, voir [*Annexe A3*], puis la correction d'humidité est appliquée, voir [*Annexe B2*].

## 6. Calculateur numérique

Un calculateur en ligne est à disposition :

**[www.deleze.name/marcel/physique/aerostat/helium/altitude-plenitude.html](www.deleze.name/marcel/physique/aerostat/helium/altitude-plenitude.html)**

**A1 Formule explicite d'une valeur de démarrage pour calculer l'altitude moyenne de plénitude**

Hypothèse : les conditions atmosphériques sont standard, la surpression est nulle, la surchauffe est nulle et l'humidité relative est nulle.

Le but de cette approximation est de disposer d'une valeur de démarrage pour amorcer les méthodes itératives numériques.

Si $p_{su}=0$ et $t_s=0$ , la [*Formule 4.5*] se laisse simplifier

$$\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} \cdot \frac{T(z)}{T_{standard}} = \frac{p(z)}{p_{standard}}$$

$$\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} \cdot \frac{T_{standard} - a \cdot z}{T_{standard}} = \frac{p_{standard} \cdot (1 - \frac{a}{T_{standard}} \cdot z)^{\frac{M \cdot g}{R \cdot a}}}{p_{standard}}$$

$$\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} \cdot (1 - \frac{a}{T_{standard}} \cdot z) = (1 - \frac{a}{T_{standard}} \cdot z)^{\frac{M \cdot g}{R \cdot a}}$$

$$\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} = (1 - \frac{a}{T_{standard}} \cdot z)^{-1 + \frac{M \cdot g}{R \cdot a}}$$

$$\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} = (1 - \frac{a}{T_{standard}} \cdot z)^{\frac{M \cdot g - R \cdot a}{R \cdot a}}$$

On peut en tirer une formule explicite pour $z$

$$(\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}})^{\frac{R \cdot a}{M \cdot g - R \cdot a}} = 1 - \frac{a}{T_{standard}} \cdot z$$

$$\frac{a}{T_{standard}} \cdot z = 1 - (\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}})^{\frac{R \cdot a}{M \cdot g - R \cdot a}}$$

$$z = \frac{T_{standard}}{a} \cdot [1 - (\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}})^{\frac{R \cdot a}{M \cdot g - R \cdot a}}] \qquad \textit{[Formule explicite A1.1]}$$

Numériquement,

$a = 0.0065\, K/m ; T_0 = 288.15\, K ; p_0 = 101325\, Pa ; M = 0.0289644\, kg\, mol^{-1}$

$g = 9.80665\, m s^{-2} ; R = 8.3144621\, J\, mol^{-1} K^{-1} ;$

$zexplicite(x) = 44330.8 \cdot (1 - x^{0.234974})$ en mètres

$z = zexplicite(\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}})$ [*Formule explicite A1.2*]

| $\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}}$ | Altitude de plénitude de démarrage |
|---|---|
| 0.7 | 3'564 m |
| 0.72 | 3'293 m |
| 0.74 | 3'028 m |
| 0.76 | 2'768 m |
| 0.78 | 2'514 m |
| 0.8 | 2'265 m |

**A2 Méthode itérative numérique pour l'altitude moyenne de plénitude**

Le but est de fournir une caractéristique du ballon indépendante des conditions météorologiques.

Pour ce faire, on tient compte de la surpression d'utilisation $p_{su}$ , on se place dans des conditions standard $p_1 = p_{standard}$ , $T_1 = T_{standard}$ , et on néglige la surchauffe et l'humidité relative : $t_s = 0$ et $H_1 = 0$ . L'équation [*Formule 4.5*] s'écrit alors :

$$\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} \cdot \frac{T_{standard} - a \cdot z}{T_{standard}} = \frac{p_{standard} \cdot \left(1 - \frac{a}{T_{standard}} z\right)^{\frac{M \cdot g}{R \cdot a}} + p_{su}}{p_{standard} + p_{su}} \qquad \text{[Formule A2]}$$

La méthode utilisée est celle de Newton (référence : Wikipedia, rubrique Méthode de Newton).
La valeur de démarrage est fournie par la [*Formule explicite A1.2*].
La réponse est systématiquement vérifiée : un message d'erreur apparaît si la valeur absolue de la différence entre les deux membres de l'équation [*Formule A2*] dépasse $10^{-9}$ .

| | $p_{su} = 100\,Pa$ | $p_{su} = 270\,Pa$ | $p_{su} = 440\,Pa$ | $p_{su} = 610\,Pa$ |
|---|---|---|---|---|
| $\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} = 0.7$ | 3'570 m | 3'579 m | 3'587 m | 3'596 m |
| $\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} = 0.71$ | 3'433 m | 3'442 m | 3'450 m | 3'459 m |
| $\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} = 0.72$ | 3'298 m | 3'306 m | 3'315 m | 3'323 m |
| $\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} = 0.73$ | 3'165 m | 3'173 m | 3'180 m | 3'188 m |
| $\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} = 0.74$ | 3'033 m | 3'040 m | 3'048 m | 3'055 m |
| $\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} = 0.75$ | 2'902 m | 2'909 m | 2'916 m | 2'923 m |
| $\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} = 0.76$ | 2'773 m | 2'779 m | 2'786 m | 2'793 m |
| $\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} = 0.77$ | 2'645 m | 2'651 m | 2'657 m | 2'664 m |
| $\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} = 0.78$ | 2'518 m | 2'524 m | 2'530 m | 2'536 m |
| $\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} = 0.79$ | 2'392 m | 2'398 m | 2'403 m | 2'409 m |
| $\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} = 0.8$ | 2'268 m | 2'273 m | 2'278 m | 2'284 m |

**A3 Formule explicite d'une valeur de démarrage pour les conditions atmosphériques du jour**

Hypothèse : les conditions atmosphériques sont celles du jour, la surpression est nulle, la surchauffe est nulle et l'humidité relative est nulle.
Le but de cette approximation est de disposer d'une valeur de démarrage pour amorcer les méthodes itératives numériques.
La température dans le modèle de l'atmosphère du jour

$$T(z) = T_1 - a \cdot (z - z_1) \quad \text{= température de l'air à l'altitude } z \qquad \text{[Formule 4.3 b]}$$

est remplacée par l'approximation

$$T(z) = T_1 - \frac{T_1}{T_{standard}} \cdot a \cdot (z - z_1) = T_1 \cdot \left(1 - \frac{a}{T_{standard}} \cdot (z - z_1)\right) \qquad [\textit{Formule A3.1}]$$

Si, de plus, $p_{su}=0$ et $t_s=0$ , la [*Formule 4.5*] se laisse simplifier

$$\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} \cdot \frac{T_1 \cdot \left(1 - \frac{a}{T_{standard}} \cdot (z - z_1)\right)}{T_{standard}} = \frac{p_1 \cdot \left(1 - \frac{a}{T_{standard}}(z - z_1)\right)^{\frac{Mg}{Ra}}}{p_{standard}}$$

$$\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} \cdot \frac{T_1}{T_{standard}} \cdot \left(1 - \frac{a}{T_{standard}} \cdot (z - z_1)\right) = \frac{p_1}{p_{standard}} \cdot \left(1 - \frac{a}{T_{standard}} \cdot (z - z_1)\right)^{\frac{M \cdot g}{R \cdot a}}$$

$$\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} \cdot \frac{T_1}{T_{standard}} = \frac{p_1}{p_{standard}} \cdot \left(1 - \frac{a}{T_{standard}} \cdot (z - z_1)\right)^{-1 + \frac{M \cdot g}{R \cdot a}}$$

$$\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} \cdot \frac{T_1}{T_{standard}} = \frac{p_1}{p_{standard}} \cdot \left(1 - \frac{a}{T_{standard}} \cdot (z - z_1)\right)^{\frac{M \cdot g - R \cdot a}{R \cdot a}}$$

$$\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} \cdot \frac{T_1 \cdot p_{standard}}{T_{standard} \cdot p_1} = \left(1 - \frac{a}{T_{standard}} \cdot (z - z_1)\right)^{\frac{M \cdot g - R \cdot a}{R \cdot a}}$$

On peut en tirer une formule explicite pour $z$

$$\left(\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} \cdot \frac{T_1 \cdot p_{standard}}{T_{standard} \cdot p_1}\right)^{\frac{R \cdot a}{M \cdot g - R \cdot a}} = 1 - \frac{a}{T_{standard}} \cdot (z - z_1)$$

$$\frac{a}{T_{standard}} \cdot (z - z_1) = 1 - \left(\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} \cdot \frac{T_1 \cdot p_{standard}}{T_{standard} \cdot p_1}\right)^{\frac{R \cdot a}{M \cdot g - R \cdot a}}$$

$$z - z_1 = \frac{T_{standard}}{a} \cdot \left(1 - \left(\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} \cdot \frac{T_1 \cdot p_{standard}}{T_{standard} \cdot p_1}\right)^{\frac{R \cdot a}{M \cdot g - R \cdot a}}\right)$$

$$z = z_1 + \frac{T_{standard}}{a} \cdot \left(1 - \left(\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} \cdot \frac{T_1 \cdot p_{standard}}{T_{standard} \cdot p_1}\right)^{\frac{R \cdot a}{M \cdot g - R \cdot a}}\right) \qquad [\textit{Formule explicite A3.2}]$$

Pour le calcul numérique, avec la fonction définie dans l'annexe A1,

$$z = z_1 + zexplicite\left(\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} \cdot \frac{T_1 \cdot p_{standard}}{T_{standard} \cdot p_1}\right) \quad \text{en mètres} \qquad [\textit{Formule explicite A3.3}]$$

## A4 Méthode itérative numérique pour l'altitude de plénitude moyenne du jour, avant correction d'humidité

Résolution numérique de l'équation [*Formule 4.5*] .
La méthode utilisée est celle de Newton.
La valeur de démarrage est donnée par la *[Formule explicite A3.3]*
Réponse : $z_{plén,m}$ = altitude de plénitude moyenne du jour, avant correction d'humidité.
La réponse est systématiquement vérifiée : un message d'erreur apparaît si la valeur absolue de la différence entre les deux membres de l'équation [*Formule 4.5*] dépasse $10^{-9}$ .

## B1 Table numérique de la pression de saturation de la vapeur d'eau en fonction de la température

| Température en degrés Celsius $t$ | Pression de saturation de la vapeur d'eau en hPa $p_{sat}(t)$ | Température en degrés Celsius $t$ | Pression de saturation de la vapeur d'eau en hPa $p_{sat}(t)$ |
|---|---|---|---|
| -60 | 0.001 | 24 | 29.83 |
| -40 | 0.13 | 25 | 31.67 |
| -20 | 1.03 | 26 | 33.6 |
| -18 | 1.5 | 27 | 35.64 |
| -15 | 1.9 | 28 | 37.8 |
| -12 | 2.4 | 29 | 40.05 |
| -10 | 2.6 | 30 | 42.43 |
| -9 | 3 | 31 | 44.92 |
| -7 | 3.7 | 32 | 47.55 |
| -4 | 4.6 | 33 | 50.3 |
| -1 | 5.6 | 34 | 53.19 |
| 0 | 6.11 | 35 | 56.23 |
| 2 | 7.06 | 36 | 59.41 |
| 4 | 8.13 | 37 | 62.75 |
| 6 | 9.35 | 38 | 66.25 |
| 8 | 10.73 | 39 | 69.92 |
| 10 | 12.28 | 40 | 73.75 |
| 11 | 13.12 | 41 | 77.78 |
| 12 | 14.02 | 42 | 81.99 |
| 13 | 14.97 | 43 | 86.39 |
| 14 | 15.98 | 44 | 91.01 |
| 15 | 17.05 | 45 | 95.83 |
| 16 | 18.18 | 46 | 100.86 |
| 17 | 19.37 | 47 | 106.12 |
| 18 | 20.63 | 48 | 111.60 |
| 19 | 21.97 | 49 | 117.35 |
| 20 | 23.38 | 50 | 123.34 |
| 21 | 24.87 | | |
| 22 | 26.43 | | |
| 23 | 28.09 | | |

## B2 Correction d'humidité

*B2.1 Donnée*

$H_1$ = humidité relative du jour, mesurée au sol.

*B2.2 Pression de saturation de la vapeur d'eau*

A partir de la « Table numérique de la pression de saturation de la vapeur d'eau en fonction de la température » (voir annexe B1), on construit par interpolation une fonction $p_{sat}(t)$ qui est définie pour toutes les températures $t \leq 50°C$ .

*B2.3 Point de rosée*

Au sol, la pression de la vapeur d'eau est égale à $H_1 \cdot p_{sat}(t_1)$ .

Le point de rosée $t_{rose}$ est la température pour laquelle cette pression de vapeur est saturante, c'est-à-dire qui vérifie l'équation

$$p_{sat}(t_{rose}) = H_1 \cdot p_{sat}(t_1) \qquad [\textit{Formule B2.3}]$$

*B2.4 Altitude de la base des cumulus éventuels*

Considérons le cas où, à la suite d'un réchauffement de la surface terrestre, des nuages se formeraient au cours de la journée. En adoptant cette évolution la plus défavorable, on prend une mesure de sécurité. La formule de *Stull*, dans laquelle les altitudes sont en mètres et les températures en degrés Celsius (ou en kelvins), donne l'altitude de la base des cumulus :

$$z_{cumulus} = z_1 + 125 * (t_1 - t_{rose}) \qquad [\textit{Formule B2.4}]$$

*B2.5 Humidité relative à l'altitude z*

L'humidité relative à l'altitude *z* est calculée comme suit :

- si $z \geq z_{cumulus}$ alors $H(z) = H_{cumulus} = 100\ \%$ ;
- sinon, $H(z)$ est calculé par interpolation linéaire

$$H(z) = H_1 + (z - z_1) * (H_{cumulus} - H_1) / (z_{cumulus} - z_1) \qquad [\textit{Formules B2.5}]$$

*B2.6 Température virtuelle*

La méthode de correction consiste à remplacer la température $T(z)$ par la température virtuelle $T_v(z)$ qui est la température qu'aurait l'air sec de même masse volumique et de même pression que l'air humide. Référence : Wikipedia, rubrique « Température virtuelle » :

$$T_v(z) = \frac{T(z)}{1 - 0.378 \cdot \dfrac{p_{eau}}{p(z)}} \quad .$$

$p_{eau}(z)$ désigne la pression partielle de la vapeur d'eau

$$p_{eau}(z) = H(z) \cdot p_{sat}(T(z)) \qquad [\textit{Formule B2.6 a}]$$

Pour $z = z_{plén,m}$ , calculons

$$c_{humid} = 1 - 0.378 \cdot \frac{p_{eau}(z_{plén,m})}{p(z_{plén,m})} \qquad [\textit{Formule B2.6 b}]$$

et la température virtuelle

$$T_v(z_{plén,m}) = \frac{T(z_{plén,m})}{c_{humid}} \quad .$$

La différence de températures $\frac{T(z_{plén,m})}{c_{humid}} - T(z_{plén,m})$ ne sera que partiellement répercutée : le calcul de l'altitude de plénitude $z_{plén,m}$ se réfère à un étant moyen de l'atmosphère, ce qui inclut une part d'humidité, tandis que la température virtuelle apporte une correction par rapport à de l'air sec. C'est pourquoi nous ne prenons en compte que la moitié de la correction de température :

$$\delta T = 0.5 \cdot T(z_{plén,m}) \cdot \left(\frac{1}{c_{humid}} - 1\right) \qquad [\textit{Formule B2.6 c}]$$

*B2.7 Correction d'altitude*

T étant une fonction affine de *z*, la correction d'altitude correspondante est

$$\delta z = -\frac{\delta T}{a} \qquad [\textit{Formule B2.7 a}]$$

Cette correction s'applique à l'altitude de plénitude. Usuellement, la correction de température est positive, et la correction d'altitude est négative. La correction d'altitude est répartie uniformément sur la hauteur. L'altitude *z* corrigée est :

$$alt(z) = z + \delta z \cdot \frac{z - z_1}{z_{plén,m} - z_1} \qquad [\textit{Formule B2.7 b}]$$

*B2.8 Affichage des résultats*

La correction s'applique à l'altitude de plénitude, à la pression et à la température :

$z_{plén,h} = alt(z_{plén,m})$ = altitude de plénitude après correction d'humidité

$p(alt(z))$ = pression à l'altitude *z* après correction d'humidité

$T(alt(z))$ = température à l'altitude *z* après correction d'humidité

Par contre, la masse volumique de l'air, la force d'Archimède et la force ascensionnelle tiennent compte de l'humidité dès le début des calculs et ne doivent pas être corrigés :

$\rho_{air}(z, H)$ = masse volumique de l'air à l'altitude *z*, en tenant compte de l'humidité *H*,

etc.

### Lien vers la page mère

Calculateurs pour ballons dirigeables à hélium