

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

Calculateur de gonflage

Marcel Délèze, Stéphane Rousson

Étape 1 : Valeur cible

Le constructeur ou le propriétaire du ballon donne le rapport des volumes « hélium/total » aux conditions atmosphériques standard :

$$\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}}$$

comme valeur à atteindre par le gonflage.

Étape 2 : Avant le gonflage : mesure de l'hélium résiduel

Si le ballon est initialement vide, le rapport des volumes « (hélium résiduel)/total » est nul :

$$\frac{V_{He\ résid}}{V_{enveloppe}} = 0 .$$

Si le ballon doit être regonflé, il faut connaître la quantité d'hélium qui se trouve dans le ballon avant le gonflage, caractérisée par le rapport des volumes « (hélium résiduel)/total », aux conditions atmosphériques standard,

$$\frac{V_{He\ résid}}{V_{enveloppe}} .$$

Étape 3 : Objectif du gonflage

Le volume de l'hélium manquant, aux conditions atmosphériques standard, est

$$V_{He\ remplissage} = V_{enveloppe} \cdot \left(\frac{V_{He}}{V_{enveloppe}} - \frac{V_{He\ résid}}{V_{enveloppe}} \right) .$$

Ce volume représente une certaine quantité d'hélium, que l'on peut transformer en nombre de moles :

$$n_{remplissage} = \frac{(p_{standard} + p_{su}) \cdot V_{He\ remplissage}}{R \cdot T_{standard}} \quad [Relation\ 3]$$

où p_{su} désigne la surpression d'utilisation de l'hélium destinée à donner une certaine rigidité à l'enveloppe et $R = 8.3144621\ J\ mol^{-1}\ K^{-1}$ est la constante des gaz parfaits.

L'objectif du gonflage est d'introduire précisément cette quantité d'hélium dans le ballon.

Étape 4 : Réalisation du remplissage

L'hélium à l'état gazeux est tiré d'un réservoir pressurisé, de volume constant $V_{réserv}$. La pression initiale $p_{réserv\ début}$ peut être lue sur le manomètre du réservoir.

En vue de déterminer la pression $p_{réserv\ fin}$ à laquelle le remplissage doit s'arrêter, calculons

- le nombre de moles d'hélium initialement présent dans le réservoir :

$$n_{réserv\ début} = \frac{p_{réserv\ début} \cdot V_{réserv}}{R \cdot T_{réserv\ début}}$$

- le nombre de moles d'hélium souhaité dans le réservoir en fin de remplissage :

$$n_{réserv\ fin} = n_{réserv\ début} - n_{remplissage}$$

- la pression finale ciblée dans le réservoir :

$$p_{\text{réserv fin}} = \frac{n_{\text{réserv fin}} \cdot R \cdot T_{\text{réserv fin}}}{V_{\text{réserv}}}$$

En enchaînant les formules, il vient successivement

$$p_{\text{réserv fin}} = \frac{(n_{\text{réserv début}} - n_{\text{remplissage}}) \cdot R \cdot T_{\text{réserv fin}}}{V_{\text{réserv}}}$$

$$p_{\text{réserv fin}} = \frac{n_{\text{réserv début}} \cdot R \cdot T_{\text{réserv fin}}}{V_{\text{réserv}}} - \frac{n_{\text{remplissage}} \cdot R \cdot T_{\text{réserv fin}}}{V_{\text{réserv}}}$$

$$p_{\text{réserv fin}} = \frac{n_{\text{réserv début}} \cdot R \cdot T_{\text{réserv début}}}{V_{\text{réserv}}} \cdot \frac{T_{\text{réserv fin}}}{T_{\text{réserv début}}} - \frac{n_{\text{remplissage}} \cdot R \cdot T_{\text{réserv fin}}}{V_{\text{réserv}}}$$

$$p_{\text{réserv fin}} = p_{\text{réserv début}} \cdot \frac{T_{\text{réserv fin}}}{T_{\text{réserv début}}} - \frac{n_{\text{remplissage}} \cdot R \cdot T_{\text{réserv fin}}}{V_{\text{réserv}}}$$

Afin que la pression de fin de gonflage soit correctement calculée, la température du réservoir pressurisé doit être actualisée et, avant la fin du gonflage, l'actualisation doit être particulièrement surveillée :

$$p_{\text{réserv fin act}} = p_{\text{réserv début}} \cdot \frac{T_{\text{réserv act}}}{T_{\text{réserv début}}} - \frac{n_{\text{remplissage}} \cdot R \cdot T_{\text{réserv act}}}{V_{\text{réserv}}} \quad [\text{Relation 4}]$$

Étape 5 : Caractéristiques du gonflage

5.1 Caractéristiques principales actualisées

Dans le but de piloter l'opération de gonflage, calculons l'évolution du rapport $\frac{V_{\text{He act}}}{V_{\text{enveloppe}}}$ en fonction de la pression actualisée du réservoir pressurisé $p_{\text{réserv act}}$. Pour ce faire, calculons successivement

- le nombre de moles déjà transférées du réservoir au ballon : à partir de la [Relation 4],

$$\frac{n_{\text{gonfl act}} \cdot R \cdot T_{\text{réserv act}}}{V_{\text{réserv}}} = p_{\text{réserv début}} \cdot \frac{T_{\text{réserv act}}}{T_{\text{réserv début}}} - p_{\text{réserv act}}$$

$$n_{\text{act gonfl}} = \frac{V_{\text{réserv}}}{R \cdot T_{\text{réserv act}}} \cdot \left(p_{\text{réserv début}} \cdot \frac{T_{\text{réserv act}}}{T_{\text{réserv début}}} - p_{\text{réserv act}} \right) \quad [\text{Relation 5}]$$

- le nombre de moles d'hélium dans le ballon :

$$n_{\text{He act}} = n_{\text{résid}} + n_{\text{gonfl act}}$$

- le volume de l'hélium contenu dans le ballon aux conditions atmosphériques standard

$$V_{\text{He act}} = \frac{n_{\text{He act}} \cdot R \cdot T_{\text{standard}}}{p_{\text{standard}} + p_{\text{su}}}$$

- puis enfin le rapport des volumes « (hélium actualisé)/total » aux conditions atmosphériques standard :

$$\frac{V_{\text{He act}}}{V_{\text{enveloppe}}}$$

5.2 Autres caractéristiques du gonflage

À partir des valeurs précédentes,

- $M_{\text{He}} = m_{\text{He}} \cdot n_{\text{He}}$ = masse de l'hélium, où la masse molaire de l'hélium vaut

$$m_{\text{He}} = 0.004002602 \text{ kg mol}^{-1}$$

- $V_{\text{ballonnets standard}} = V_{\text{enveloppe}} - V_{\text{He}}$ = volume des ballonnets aux conditions atmosphériques standard

- $\frac{V_{\text{ballonnets standard}}}{V_{\text{enveloppe}}}$ = rapport des volumes « ballonnets/total » aux conditions atmosphériques standard
- $\frac{V_{\text{ballonnets standard}}}{V_{\text{max ballonnets}}}$ = taux de remplissage des ballonnets aux conditions atmosphériques standard.

Un calculateur de gonflage est à disposition :

www.deleze.name/marcel/physique/aerostat/helium/gonflage.html