

## MODELE DE DIFFUSEUR ADIABATIQUE

Pour étendre le noyau de Thermoptim, on lui ajoute des modules externes écrits dans le langage Java, qui en définissent à la fois les équations et l'interface graphique. Ces éléments complémentaires sont chargés dynamiquement lors du lancement du progiciel, et apparaissent dans ses écrans de manière transparente pour l'utilisateur, comme s'ils en faisaient partie intégrante. La mise en place du mécanisme d'extension de Thermoptim par ajout de classes externes a conduit à introduire deux distinctions sémantiques qui ont leur importance : d'une part celle entre les composants mono et multi-fonctionnels (les premiers ne mettent en jeu qu'au plus une seule forme d'énergie (soit mécanique, soit thermique)), et d'autre part celle qui est liée à une notion nouvelle dans le progiciel, celle de thermocoupleur. Les thermocoupleurs sont destinés à compléter les échangeurs de chaleur classiques en permettant à des composants autres que des transfos "échange" de se connecter à une ou plusieurs transfos "échange" pour représenter un couplage thermique.

En ajoutant des composants externes, on peut continuer à bénéficier de l'ensemble de l'environnement de Thermoptim, à savoir tous les composants disponibles ainsi que l'éditeur de schémas qui permet de décrire très aisément la structure interne du système étudié. Non seulement une telle manière de faire simplifie notablement la démarche de modélisation et facilite ultérieurement l'utilisation et la maintenance du modèle, mais surtout elle sécurise sa construction en automatisant l'établissement des couplages entre les différents éléments qui le composent et en garantissant leur cohérence. Ce point est d'autant plus important que le système étudié comprend un nombre de composants élevé.

Un diffuseur adiabatique est un organe fixe qui a pour fonction de transformer en pression une partie de l'énergie cinétique dont dispose un gaz. La vitesse relative initiale de l'air extérieur permet ainsi d'obtenir une compression dynamique dans le diffuseur d'entrée d'un turboréacteur : l'énergie cinétique de l'air aspiré y est convertie en énergie de pression.

Dans cette note, nous présentons un modèle permettant de représenter un diffuseur adiabatique. Nous commencerons par faire un bref rappel de la thermodynamique du diffuseur, puis nous montrerons l'écran du composant externe, défini dans la classe Diffuser.java.

### THERMODYNAMIQUE DU DIFFUSEUR ADIABATIQUE

Nous supposerons dans ce qui suit que le fluide qui traverse le diffuseur peut au moins localement être considéré comme un gaz parfait, en prenant une valeur bien choisie de sa capacité thermique massique  $c_p$ . Les notations sont celles du livre Systèmes Energétiques.

Le diffuseur étant adiabatique, on peut facilement montrer que la température d'arrêt du fluide est égale à la température d'arrêt isentropique, même en présence d'irrégularités :

$$T_{is} = T_a + \frac{C^2}{2 c_p} \quad (1)$$

En introduisant le nombre de Mach de l'écoulement :

$$Ma = \frac{C}{\sqrt{\gamma r T}} \quad \text{et en remarquant que :} \quad c_p = \frac{\gamma r}{\gamma - 1}$$

$$\text{il vient : } \Delta T = T_{is} - T_a = \frac{C^2}{2 c_p} = \frac{\gamma - 1}{2} Ma^2$$

L'équation (2.6.8) des isentropiques donne la pression d'arrêt isentropique :

$$P T^{\gamma/(\gamma-1)} = Cste \quad \text{ou encore} \quad P_{is} = P_a \left( \frac{T_{is}}{T_a} \right)^{\gamma/(\gamma-1)}$$

on trouve :

$$P_{is} = P_a \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} Ma^2 \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (2)$$

Les deux relations (1) et (2) s'interprètent de la manière suivante : dans tout écoulement isentropique d'un gaz parfait dans un tube à parois fixes, la température et la pression d'arrêt se conservent.

Si l'écoulement reste adiabatique mais n'est plus réversible, la loi qui le représente n'est plus une isentropique, mais une polytropique. Avec les hypothèses habituelles, les relations précédentes se transforment comme indiqué ci-dessous.

Tout d'abord, le premier principe s'écrit encore comme précédemment

$$\Delta h = \frac{C^2}{2}$$

Le gaz étant supposé parfait :  $\Delta h = c_p \Delta T$

L'enthalpie totale se conservant, les températures d'arrêt polytropique et isentropique sont bien égales :

$$T_p = T_a + \frac{C^2}{2 c_p} = T_{is}$$

L'équation des polytropiques donne la pression d'arrêt :

$$P T^{k/(k-1)} = C_{ste} \quad \text{ou encore} \quad P_p = P_a \left( \frac{T_p}{T_a} \right)^{k/(k-1)}$$

on trouve :

$$P_p = P_a \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} Ma^2 \right)^{k/(k-1)} \quad (3)$$

La pression d'arrêt polytropique n'est pas égale à la pression d'arrêt isentropique, les irréversibilités se traduisant par des pertes de charge.

La surpression dynamique due à l'énergie cinétique initiale permettrait de comprimer le gaz jusqu'à la pression  $P_s$  s'il n'y avait pas d'irréversibilité, et conduirait au point S de température  $T_s = T_{is}$  et d'entropie  $s_s = s_A$ . Du fait des irréversibilités, le point de sortie est R, de même température d'arrêt isentropique, mais de pression  $P_r$  inférieure à  $P_s$ . R peut être déterminé si l'on connaît le rendement isentropique  $\eta_s$  du diffuseur, B étant le point correspondant à la compression isentropique de  $P_a$  à  $P_r$  :

$$\eta_s = \frac{h_B - h_A}{h_R - h_A}$$

Le gaz étant supposé parfait,  $h_R - h_A = h_s - h_A = c_p \frac{\gamma-1}{2} Ma^2$

ce qui donne in fine :

$$P_r = P_a \left( 1 + \eta_s \frac{\gamma-1}{2} Ma^2 \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (4)$$

Ces relations permettent de complètement caractériser la transformation : (4) fournit la pression d'arrêt, et donc la pression statique si l'on connaît la vitesse restante (généralement faible et de ce fait négligeable). La température du point B s'en déduit, son entropie étant connue. La donnée du rendement isentropique détermine le point R.

Dans le modèle, on a généralisé les expressions ci-dessus pour tenir compte d'une vitesse de sortie du gaz non nulle.

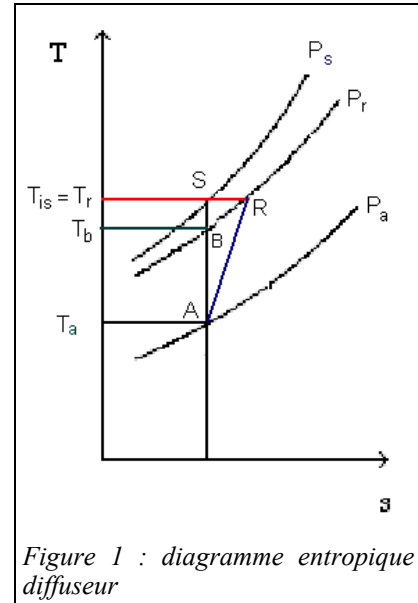


Figure 1 : diagramme entropique diffuseur

### Rapport des pressions de stagnation

Appelons  $\varepsilon_p$  le rapport de la pression d'arrêt réelle à la pression d'arrêt isentropique.  $\varepsilon_p \leq 1$ , appelé rapport des pressions de stagnation, est très communément utilisé pour caractériser les diffuseurs, pour lesquels, autant l'hypothèse d'adiabaticité peut souvent être retenue, autant celle d'un écoulement réversible ne l'est pas.

Si  $\eta_p$  est le rendement polytropique, les équations (2) et (3) fournissent :

$$\varepsilon_p = \left( \frac{P_p}{P_{is}} \right) = \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} \text{Ma}^2 \right)^{(\eta_p - 1) \gamma / (\gamma - 1)} \quad (5)$$

Le rendement isentropique  $\eta_s$  peut aussi s'exprimer en fonction de  $\varepsilon_p$  :

$$\eta_s = \frac{\left( \frac{P_r}{P_a} \right)^{(\gamma - 1) / \gamma} - 1}{\left( \frac{P_r}{P_a} \right)^{(k - 1) / k} - 1}$$

Tous calculs faits, on trouve :

$$\eta_s = \frac{\left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} \text{Ma}^2 \right) \varepsilon_p^{(\gamma - 1) / \gamma} - 1}{\frac{\gamma - 1}{2} \text{Ma}^2} \quad (6)$$

Connaissant  $\varepsilon_p$ , on peut ainsi retrouver le rendement isentropique correspondant et donc la pression d'arrêt.

### CONCEPTION DU COMPOSANT EXTERNE

#### Généralités

Deux modes de calcul sont possibles : déterminer la pression de sortie connaissant la vitesse de sortie, ou bien déterminer la vitesse de sortie connaissant la pression de sortie.

Les paramètres du modèle sont les suivants :

- la vitesse d'entrée du gaz (m/s)
- le rendement isentropique de la transformation
- soit la vitesse de sortie du gaz (m/s), soit la pression du gaz à la sortie du diffuseur, selon l'option de calcul choisie

Les données d'entrée du modèle sont les suivantes (fournies par le composant amont) :

- la température du gaz à l'entrée du diffuseur  $T_a$  (°C ou K)
- la pression du gaz à l'entrée du diffuseur  $P_a$  (bar)
- le débit  $\dot{m}$  du gaz (kg/s)

Les sorties sont :

- soit la pression du gaz à la sortie du diffuseur, soit la vitesse de sortie du gaz (m/s), selon l'option de calcul choisie
- la température du gaz à la sortie du diffuseur

#### Interface graphique

Une interface graphique possible pour le composant s'en déduit (figure 2). Elle permet de construire le tiers inférieur droit de l'écran (en anglais sur la figure), le reste étant défini de manière standard dans Thermoptim.

Les données d'entrée sont fournies par la transfo amont du système dans lequel le composant est inséré : débit du gaz et état du point amont..

transfo diffuseur type externe

type énergie autre  débit imposé

point amont 0  m  $\Delta H$  11 875,45

T (°C) -41,15

P (bar) 0,307

h (kJ/kg) -66,13

titre 1

point aval 1

T (°C) -9,97

P (bar) 0,467

h (kJ/kg) -34,88

titre 1

diffuser

inlet velocity (m/s) 250.00

isentropic efficiency 0.9500

Mach number 0.819

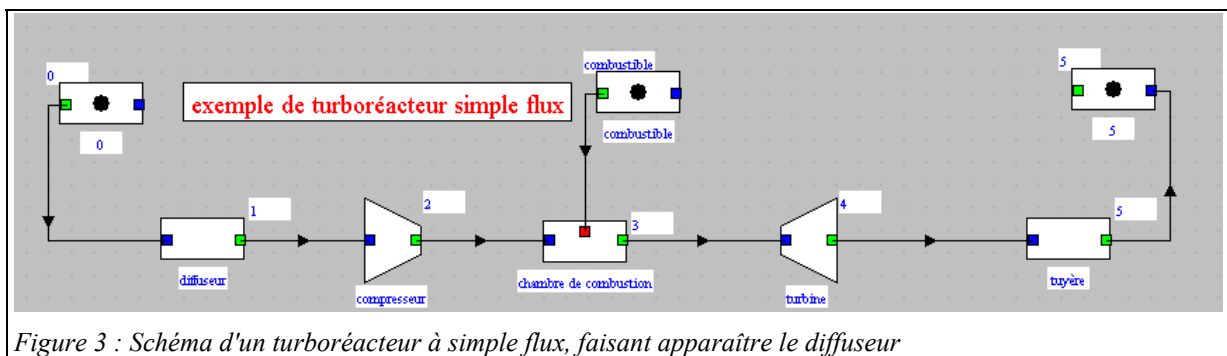
outlet pressure (bar) 0.46700

outlet velocity (m/s) 0

Calculate outlet pressure

Calculate outlet velocity

Figure 2 : Interface graphique du composant externe



### Enchaînement des calculs

L'enchaînement des calculs est le suivant :

- 1) mise à jour du composant avant calcul par chargement des valeurs de la transfo et du point amont
- 2) lecture des paramètres sur l'écran du composant externe
- 3) calcul de la pression ou de la vitesse de sortie et de l'état du point aval
- 4) mise à jour de l'écran du composant externe

Les problèmes rencontrés en pratique à chacune de ces étapes étant tout à fait analogues à ceux présentés dans la documentation, notamment celle relative à la classe SolarCollector.java, on s'y référera pour de plus amples explications.