

Travail préparatoire à l'évaluation SSI

version 3

Dans ce travail nous allons réaliser la modélisation simplifiée d'une ligne de pressurisation d'un système de propulsion spatiale de type « pressure-fed ». Nous limiterons à un modèle 0D d'une ligne de pressurisation, à savoir, un réservoir de gaz pressurant, une vanne de réglage, un réservoir carburant et une ligne d'échappement vers la chambre de combustion (voir schéma de principe en figure 1).

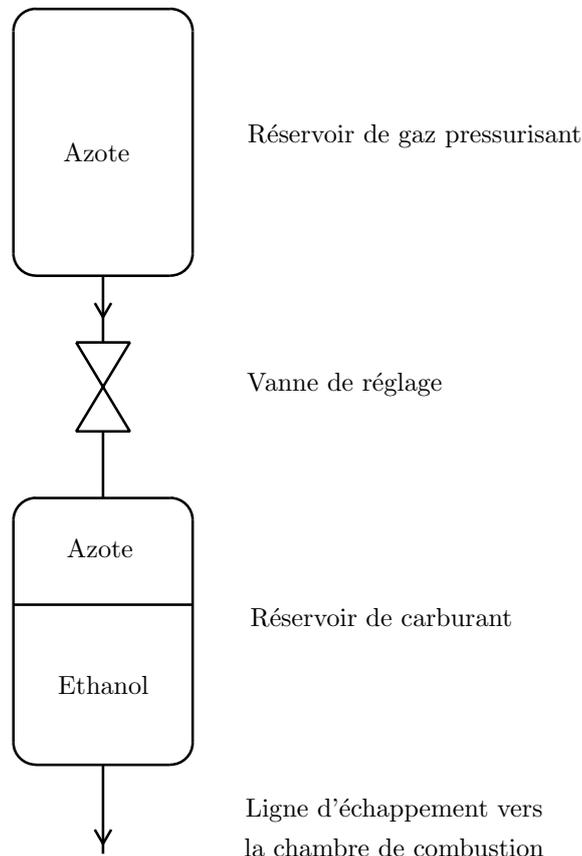


FIGURE 1 – Schéma de principe des éléments du système propulsif

Ce travail s'inspire librement du travail qui est réalisé au sein du projet étudiant inter-écoles PERSEUS, en partenariat avec le CNES. Ce projet a pour objectif la conception complète d'un lanceur de petite capacité ASTREOS et sur lequel, depuis plusieurs années les étudiants de l'INSA travaillent sur le moteur MINERVA. Il est propulsé par un moteur Ethanol/Oxygène liquide. Les deux ergols étant pressurisés par de l'azote stocké dans un réservoir à haute pression.

Hypothèses

Les hypothèses principales de travail seront les suivantes :

- étude 0D,
- liquide considéré incompressible,
- les composants seront supposés parfaitement isolés de l'extérieur et les transferts thermiques seront donc négligés,
- aucun transfert de chaleur, ni de masse à l'interface entre le gaz pressurant et le liquide pressurisé,
- on négligera la différence de pression due à la hauteur de fluide dans le liquide et le gaz,
- on négligera les pertes de charge dans les conduites,
- les évolutions seront considérées quasi-statiques dans tous les composants.

Remarques et recommandations par rapport au travail sur AMESIm

A part la question 3, qui est assez indépendante du reste du sujet, celui-ci peut être réalisé avec l'atelier **Signal, Control** et donc devrait être faisable sur la version étudiante du logiciel.

Faites bien attention à la cohérence des unités et aux signes des signaux.

Données relatives aux fluides

Le gaz pressurant est de l'azote (N_2), nous considérerons un modèle de gaz parfait pour le représenter avec :

- $C_p = 1039,69 J.kg^{-1}.K^{-1}$
- $C_v = 742,88 J.kg^{-1}.K^{-1}$
- enthalpie de référence à $T_0 = 300K$, $h_0 = 1923,4 J/K$

Le carburant à pressuriser est de l'éthanol, nous considérerons que sa masse volumique est constante et vaut $\rho_{Ethanol} = 792 kg/m^3$

Données relatives aux réservoirs

Le réservoir de carburant a ces caractéristiques :

- volume interne total du réservoir : $V_{C,tot} = 0,1852 m^3$
- proportion initiale du volume occupée par l'éthanol dans le bas du réservoir : 60% (le reste sera considéré occupé par de l'azote aux mêmes pression et température dans la partie haute du réservoir)
- pression initiale dans le réservoir $P_{C,0} = 1 Bar$ à $t_0 = 0s$ (pour l'azote et l'éthanol)
- température initiale dans le réservoir $T_{C,0} = 300K$ à $t_0 = 0s$ (pour l'azote et l'éthanol)

Le réservoir de gaz pressurant a ces caractéristiques :

- volume interne total du réservoir : $V_{P,tot} = 0,05 m^3$
- pression initiale de l'azote $P_{P,0} = 240 Bar$ à $t_0 = 0s$
- température initiale de l'azote $T_{P,0} = 300K$ à $t_0 = 0s$

Ces données sont fournies dans le fichier de paramètres globaux **GlobalParametersReservoirs.gpl**. Vous pouvez les importer dans la fenêtre de paramètres globaux du logiciel AMESIm (**menu contextuel** et commande **load**).

1 Réalisation d'un composant représentant un réservoir

Dans un premier temps nous allons réaliser sous AMESIm un circuit représentant le réservoir dans lequel est pressurisé le carburant. Pour cela, nous n'utiliserons pas de composant de bibliothèque métier, mais des composants de la bibliothèque signal. Nous allons appliquer le premier principe de la thermodynamique au gaz contenu dans le réservoir de pressurisation. Notre système est un système ouvert car du gaz rentre dans le réservoir. De plus il a un volume variable, car au fur et à mesure de l'alimentation en carburant de la chambre de combustion, la proportion en volume de gaz contenu dans le réservoir augmente.

Le moteur de résolution d'AMESIm permettant de résoudre numériquement un système d'équations différentielles ordinaires (O.D.E.) dépendant du temps (t), nous allons donc devoir créer un système permettant de calculer les évolutions temporelles de toutes les variables, à partir des conditions initiales et des données fournies par les autres composants auxquels seront connectés notre volume de gaz. Notre réservoir doit prendre correctement en compte l'entrée de gaz pressurant dans celui-ci. Outre l'hypothèse que le carburant liquide n'échange ni masse, ni chaleur avec le gaz, nous considérerons que la surface libre entre les deux fluides est assimilable à une paroi adiabatique, mobile, plane et horizontale.

Appliquons le premier principe de la thermodynamique au gaz dans le réservoir.

$$\frac{dE_T}{dt} = \dot{Q} + \dot{W} + \dot{E}_{ec}$$

Avec :

- E_T l'énergie totale du système
- \dot{Q} la puissance calorifique nette échangée avec l'extérieur
- \dot{W} la puissance nette transférée par travail avec l'extérieur
- \dot{E}_{ec} la puissance nette transférée par l'écoulement

Nous ferons l'hypothèse que la variation d'énergie potentielle et l'énergie cinétique du système est négligeable, soit :

$$\frac{dE_T}{dt} = \frac{dU}{dt}$$

On rappelle $U = m * u$, avec U , énergie interne du système, u énergie interne massique du gaz et m masse de gaz.

Décomposons le travail en une contribution utile et une contribution relative à la pression du fluide, soit en considérant une seule entrée de fluide dans le réservoir :

$$\dot{W} = \dot{W}^u + \dot{m}_e * P_e * v_e$$

Avec :

- \dot{m}_e débit massique du fluide entrant dans le réservoir (dans ce travail on adoptera la convention classique d'un débit positif pour le fluide qui rentre dans le réservoir, et négatif s'il sort),
- v_e volume spécifique du fluide entrant dans le réservoir (le volume spécifique est l'inverse de la masse volumique $v_e = 1/\rho_e$),
- P_e pression du fluide entrant dans le réservoir.

Le premier principe de la thermodynamique peut donc s'écrire :

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q} + \dot{W}^u + \dot{m}_e * P_e * v_e + \dot{m}_e * \left(u_e + \frac{1}{2} * c_e^2 + g * z_e \right)$$

Avec c_e vitesse du fluide à l'entrée.

Si de plus on néglige l'énergie cinétique et potentielle du fluide entrant devant les autres termes, notre relation se simplifie ainsi :

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q} + \dot{W}^u + \dot{m}_e * (P_e * v_e + u_e)$$

Et en introduisant l'enthalpie spécifique ($h_e = u_e + P_e * v_e$) on obtient la relation suivante :

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q} + \dot{W}^u + \dot{m}_e * h_e$$

Nous négligerons les transferts thermiques avec l'extérieur et, considérant que le volume de gaz dans le réservoir, V , évolue dans le temps en fonction du débit de liquide sortant du réservoir $Q_{vL} = \frac{dV}{dt}$, le travail de l'extérieur sur notre système est égal à

$$\dot{W}^u = -P * \frac{dV}{dt}$$

Nous obtenons ainsi cette relation simplifiée que nous allons mettre en œuvre sous AMESim :

$$\frac{dU}{dt} = -P * \frac{dV}{dt} + \dot{m}_e * h_e$$

Travail à réaliser :

1. Si vous ne savez employer les composants **dynamic_transmitter** (SIGTRANS0 ) et **dynamic_receiver** (SIGRECEIO ) , apprenez à les mettre en œuvre dans un fichier que vous avez réalisé par le passé.
2. Réalisez sous AMESim un circuit permettant, à partir des conditions initiales connues fournies, de calculer l'évolution temporelle de la pression dans le réservoir en fonction des propriétés du gaz entrant (débit massique \dot{m} et enthalpie h) ainsi que du débit volumique du carburant chassé du réservoir. La figure 2 présente une architecture permettant cette représentation, on pourra s'en inspirer. Le volume de carburant chassé du réservoir est égal à la variation temporelle du volume de gaz dans le réservoir.
3. En comparant avec le réservoir à volume constant de la bibliothèque **PNEUMATIQUE** se trouvant dans le fichier fourni **PneumaticVolume.ame**, vérifiez que vous obtenez les mêmes résultats de simulation avec les mêmes conditions initiales et les mêmes signaux d'entrées. Notez que cette vérification peut vous permettre d'identifier des erreurs, mais ne peut pas vous assurer de manière certaine que votre circuit est exact, car il n'est pas possible de représenter les variations de volume avec ce composant de bibliothèque.

2 Représentation du réservoir de gaz pressurisant

Nous allons maintenant représenter le réservoir contenant le gaz pressurisant à partir du modèle réalisé dans la partie précédente. Ce réservoir présente deux différences principales, la première étant que son volume est constant, ce qui se traduit juste par une variation de volume nulle. La seconde différence provient du fait que le gaz sort de ce réservoir, vous allez donc devoir modifier le circuit pour en tenir compte.

Le premier principe pour ce réservoir s'énonce donc ainsi :

$$\frac{dU}{dt} = -\dot{m} * h$$

avec

- le débit massique de fluide sortant du réservoir $\dot{m} > 0$;
- l'enthalpie du fluide dans le réservoir h .

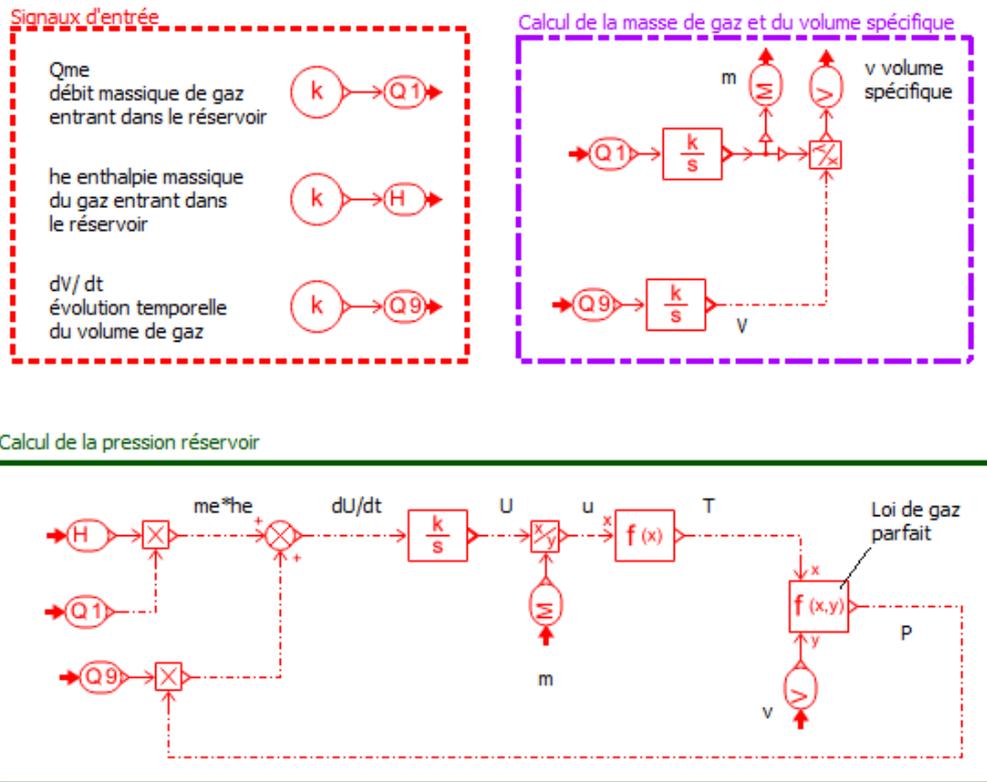


FIGURE 2 – Modélisation AMESim du réservoir de carburant

Travail à réaliser :

- Réalisez le composant qui représente le réservoir de gaz pressurant. Une méthode¹, élégante, mais qui demande un peu de réflexion, permettant de réaliser cela est de partir du circuit fait en première partie et de le modifier de manière à ce qu'il puisse tenir compte d'un débit entrant ($\dot{m}_e \geq 0$) et sortant du réservoir ($\dot{m}_e < 0$) avec un minimum de modifications. Plus précisément, lorsque le fluide va sortir du réservoir, l'enthalpie h_e , sera égale à l'enthalpie du fluide au sein du réservoir. Il faudra donc calculer cette enthalpie et mettre en œuvre un test logique permettant d'utiliser la bonne enthalpie selon le signe du débit. Remarquez que vous pourrez à nouveau utiliser le réservoir de la bibliothèque pneumatique comme outil d'aide à la validation.
- Créez à partir de ce circuit un supercomposant représentant le réservoir de carburant et ayant pour entrées le débit massique et l'enthalpie de l'azote entrant, l'évolution temporelle du volume de gaz à l'intérieur du réservoir et pour sorties les pression, température et enthalpie du gaz dans le réservoir (voir illustration en figure 3). Nommez ce composant **ResCarb**. Vous ferez bien attention à que les paramètres généraux et initiaux du circuit correspondent aux données fournies pour ce réservoir.

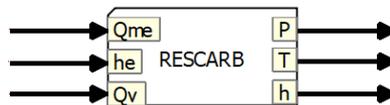


FIGURE 3 – entrées et sorties du supercomposant RESCARB

- Créez à partir de ce même circuit un second supercomposant représentant le réservoir de gaz pressurant et ayant pour entrées le débit massique sortant et pour sorties les pression, température et enthalpie du gaz dans le réservoir. Nommez ce composant **ResPress**. Vous ferez bien attention à que les paramètres généraux et initiaux du circuit correspondent aux données fournies pour ce réservoir.

1. Il n'est pas impératif d'utiliser cette méthode.

3 Modélisation de la ligne d'échappement

Dans cette partie nous allons modéliser de manière très simplifiée la ligne d'échappement entre le réservoir de carburant et la sortie du circuit.

On considèrera que l'alimentation de la ligne de sortie est pilotée par une électrovanne. Lorsque l'électrovanne est fermée le débit d'éthanol est nul et lorsque qu'elle est ouverte, la ligne se comporte comme une perte de charge en suivant cette relation :

$$Q_{v\acute{e}thanol} = \sqrt{\frac{P_{r\acute{e}servoir} - P_{atm}}{k}} = \frac{dV}{dt}$$

Avec :

- $Q_{v\acute{e}thanol}$ débit de carburant sortant du réservoir en m^3/s ,
- $P_{r\acute{e}servoir}$ pression dans le réservoir en Pa ,
- P_{atm} pression atmosphérique en Pa ,
- k constant égale à $k = 1,503.10^{12}$.

Travail à réaliser :

7. Dans un circuit incluant la représentation du réservoir de carburant, ajoutez la représentation de la ligne d'échappement, dans un premier temps sans son électrovanne de commande.
8. Ajoutez les fonctions qui permettent de représenter l'électrovanne. Pour celle-ci, on considèrera qu'elle s'ouvrira dès que la pression dans le réservoir de carburant va dépasser la pression $P_c \geq 29.10^5 Pa$ et qu'elle ne se refermera que si la pression réservoir passe en dessous de la valeur $P_c \leq 26.10^5 Pa$. Les composants utilisés pour modéliser une commande de type tout ou rien (T.O.R.) sont adaptés pour réaliser ce travail.
9. Testez le bon fonctionnement du circuit et vérifiez que le débit massique est un peu supérieur à $\dot{m}_L > 1kg/s$.

4 Modélisation de la vanne d'alimentation gaz

Dans cette partie nous allons créer un modèle pour représenter la vanne qui permet de régler la pression dans le réservoir de carburant au cours de la vidange de celui-ci. Cette vanne qui se trouve entre le réservoir de carburant et le réservoir de pressurisation a une ouverture pilotée, ce qui permet de faire varier le débit de gaz la traversant.

Le gaz circule au sein de celle-ci à haute vitesse et ce sont des lois de dynamique des gaz² qui permettent de décrire son comportement.

Pour un gaz parfait, on peut quantifier le débit circulant dans un orifice par cette équation³ :

$$\dot{m} = A * C_q * C_m * \frac{P_{am}}{\sqrt{T_{am}}}$$

Avec :

- \dot{m} débit massique,
- A section débitante de la vanne en pleine ouverture,
- C_q coefficient de débit de la vanne, c'est un coefficient constant caractéristique de la géométrie interne de la vanne,
- P_{am} pression à l'amont de la vanne,
- P_{av} pression à l'aval de la vanne (utile pour déterminer C_m),
- T_{am} température à l'amont de la vanne,
- C_m le paramètre de débit. Celui-ci dépend des propriétés du gaz ainsi que des pressions amont et aval.

Pour cette étude on prendra, lorsque la vanne est totalement ouverte, $A * C_q = 3.10^{-6}$.

La valeur de C_m dépend du rapport de pression critique P_{cr} , défini ainsi :

$$P_{cr} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

Avec les propriétés du gaz $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ et r constante spécifique.

2. L'enseignement de dynamique des gaz étant délivré en EP4, on vous demande ici d'utiliser les équations proposées sans questionner leurs origines physiques.

3. Pour plus d'informations sur les équations mise en œuvre pour la vanne gaz à écoulement compressible, on pourra entre autre consulter l'aide en ligne d'AMESim relative au composant **pn2rcqfix**.

$$\text{si } \frac{P_{av}}{P_{am}} > P_{cr} \text{ (écoulement subsonique) alors } C_m = \sqrt{\frac{2\gamma}{r * (\gamma - 1)}} * \sqrt{\left(\frac{P_{av}}{P_{am}}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_{av}}{P_{am}}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}}$$

$$\text{si } \frac{P_{av}}{P_{am}} \leq P_{cr} \text{ (écoulement sonique) alors } C_m = \sqrt{\frac{2\gamma}{r * (\gamma + 1)}} * \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$$

La détente du fluide au passage de la vanne sera réalisée sans transfert d'énergie avec l'extérieur. On fera l'hypothèse qu'elle est isenthalpe.

Travail à réaliser :

10. Créez le circuit permettant de représenter cette vanne et ayant pour entrées :

- la pression amont P_{am} (pression du réservoir de gaz pressurisant),
- la température amont T_{am} (température du réservoir de gaz pressurisant),
- la pression aval P_{av} (pression du réservoir de carburant).

Et pour sortie :

- le débit massique circulant dans la vanne

Note : l'entrée x pour le signal de commande de la vanne sera créée dans la question suivante.

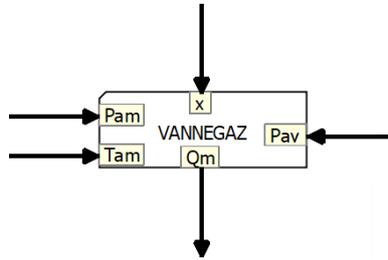


FIGURE 4 – entrées et sorties du supercomposant représentant la vanne

11. ajoutez un signal de commande x permettant de traduire le pilotage de la vanne. La commande sera telle que :
 - si $x = 1$ alors la vanne sera débitante
 - si $x = 0$ alors la vanne sera fermée
12. créez le supercomposant représentant la vanne à partir de votre circuit avec quatre entrées (P_{am} , T_{am} , P_{av} et x) et une sortie (\dot{m}).

5 Assemblage du circuit complet et exploitation

Nous allons maintenant assembler tous les circuits réalisés précédemment afin d'obtenir une représentation complète de la ligne de pressurisation, puis nous allons l'exploiter.

Travail à réaliser :

13. Réalisez un circuit représentant la ligne de pressurisation complète avec le réservoir de gaz pressurisant, la vanne gaz, le réservoir de carburant et la ligne d'échappement.
14. Simulez pour tester que tout fonctionne correctement. On fera attention à vérifier si les valeurs calculées semblent correctes (ordres de grandeur, signes).
15. Ajoutez une commande T.O.R. qui gère l'ouverture de la vanne gaz à partir de la pression dans le réservoir de carburant. La commande sera telle que tant que la pression dans le réservoir de carburant est inférieure à $P_c < 30.10^5 Pa$ la vanne sera ouverte. Dépassé ce seuil de pression, elle se fermera et ne se rouvrira que si la pression dans le réservoir de carburant passe en dessous de la valeur $P_c < 28.10^5 Pa$.
16. Modifiez la commande de manière à représenter une phase d'initialisation d'essai sur les 10 premières secondes de la simulation au cours desquelles la vanne gaz est totalement fermée. Vérifiez que le système est bien stationnaire au cours de cette période.
17. Déterminez le volume minimum du réservoir de gaz pressurisant nécessaire pour alimenter la chambre de combustion avec une masse totale de $85kg$ d'éthanol avec un débit supérieur à $\dot{m}_L \geq 1kg/s$. On acceptera une tolérance de $2,5dm^3$ pour ce résultat.