

# MODELISATION ET ANALYSE STRUCTURELLE D'UN ECS PAR APPROCHE BOND GRAPH



26/06/2014

Projet de Fin d'Etudes

**Etudiants :**

Hélène du Chaxel

Robin Mainguy

**Contact Dassault :**

Eric Thomas

**Enseignants tuteurs :**

Jeanne Bulle

Wilfrid Marquis-Favre

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier dans un premier temps, toute l'équipe pédagogique de l'INSA de Lyon et les intervenants professionnels responsables de la formation.

Nous remercions Monsieur Minh Thu Pham, responsable du centre d'ingénierie ISAAC pour son accueil et sa convivialité au sein du laboratoire de recherche.

Nos remerciements s'adressent particulièrement à nos chefs de projets, Jeanne Bulle et Wilfrid Marquis Favre pour leurs conseils et leur aide tout au long de la réalisation de notre projet. Dans le cas où nous avons besoin d'aide ils savent répondre présent pour nous aider à progresser dans notre travail.

Enfin, nous tenons à remercier monsieur Eric Thomas, responsable du projet au sein de Dassault Aviation, pour l'aide extérieure qu'il nous apporte lorsque nous avons besoin de conseils sur le projet qu'il dirige ainsi que pour nous avoir reçus sur le site de Dassault Aviation.

# CONTENU

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>3</b>
<b>I. PRESENTATION DU SUJET .....</b>	<b>4</b>
1. Entreprise .....	4
2. Présentation du PFE .....	5
3. Objectif de l'étude.....	6
<b>II. MISE EN PLACE DU PROJET .....</b>	<b>7</b>
1. Présentation du système ECS.....	7
2. Modèle Dymola .....	8
3. Modélisation Bond Graph .....	9
a. Avantages de la représentation Bond Graph.....	9
b. Généralités .....	9
c. Eléments usuels .....	10
d. Application à notre sujet.....	10
4. Hypothèses simplificatrices.....	11
<b>III. MODELISATION BOND GRAPH SOUS MS1 .....</b>	<b>12</b>
1. Modèle global.....	12
2. Composants.....	13
a. Tuyau.....	13
b. Bleed .....	17
c. Valve.....	18
d. Echangeurs de chaleur .....	26
e. Turbocompresseur .....	28
f. Cabine .....	33
<b>IV. ANALYSE STRUCTURELLE .....</b>	<b>34</b>
1. Principe de l'analyse structurelle .....	34
2. Définition des variables d'entrée et de sortie.....	34
3. Vérification des critères d'inversibilité.....	35
a. Premier critère .....	35
b. Second critère .....	37
c. Troisième critère .....	38
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>41</b>

# INTRODUCTION

Ce présent rapport présente le travail réalisé durant la période de notre projet de fin d'étude. Ce sujet est commandé par l'entreprise Dassault Aviation, et est réalisé à l'INSA dans le centre d'ingénierie ISAAC (Ingénierie des Systèmes automatisés, Analyse et Conception) au sein du laboratoire AMPERE.

Le cursus de formation de l'INSA demande aux élèves de cinquième année d'effectuer un projet de fin d'études au sein d'un laboratoire de l'école. Les projets sont confiés à l'INSA de Lyon par une entreprise extérieure.

Durant cinq mois, l'étudiant est mis en situation réelle, il doit répondre à un besoin de l'entreprise. Face à un problème, il doit faire preuve d'autonomie, d'initiative et de mise en pratique des connaissances acquises durant son cursus scolaire. Bien que le projet se déroule au sein de l'école, il n'en reste pas moins une expérience professionnelle permettant une bonne transition entre l'étude théorique et la pratique au sein d'une entreprise.

Ce présent rapport de mi-parcours s'articulera en quatre parties distinctes :

- Présentation du sujet et objectifs à atteindre
- Mise en place du projet avec la présentation du système et des méthodes de représentation utilisées
- Travail réalisé sur la représentation sur le logiciel MS1
- Etude de l'analyse structurelle.

Le travail est effectué sous la direction d'une personne de l'entreprise qui a confié le sujet et encadré par deux enseignants du département Génie Mécanique et Conception de l'INSA de Lyon.

# I. PRESENTATION DU SUJET

## 1. ENTREPRISE

Le Groupe Dassault Aviation est un constructeur aéronautique français fondé en 1929 par Marcel Dassault. C'est aujourd'hui le dernier groupe d'aviation au monde détenu par la famille de son fondateur et portant son nom.

Cette entreprise multinationale emploie aujourd'hui environ 11 600 personnes dont 9 000 en France. Dassault s'exporte aussi à l'étranger avec une présence dans 83 pays en 2012. Cette exportation est d'ailleurs un de ses atouts majeur car elle représente 75% de son chiffre d'affaire (en 2012).

Ses activités s'organisent autour de différents axes :

- L'aéronautique avec plus de 8 000 avions livrés depuis 1945. Ces appareils sont principalement des avions d'affaires qui représentent 71% de l'activité de l'entreprise. On peut par exemple nommer le Falcon qui est un des appareils phare de Dassault Aviation. Des avions militaires sont également produits : Mirage 2000, Rafale, nEURON...).
- Les activités spatiales (systèmes sols de télémessure, études des véhicules spatiaux et activités pyrotechniques).
- Les services (Dassault Procurement Services, Dassault Falcon Jet et Dassault Falcon Service).
- Les systèmes aéronautiques et de défense (Sogitec Industries).



FIGURE 1 - LOGO DASSAULT AVIATION

Dans l'activité principale d'exportation d'avions d'affaires à réaction haut de gamme, Dassault Aviation occupe une part de marché de 29% en troisième position mondiale derrière Bombardier (Canada) et Gulfstream Aerospace (USA).

Pour chacun de leurs avions, Dassault maîtrise les hautes technologies et les met au service de leurs clients. Elles concourent à leur indépendance et à la gestion de leur temps, de leur espace, de leurs décisions et de leurs actions, partout dans le monde.

Pivot d'une industrie stratégique à haute valeur ajoutée, l'entreprise familiale participe au développement d'un large tissu d'entreprises, de laboratoires et d'établissements d'enseignement de haut niveau. Grâce aux compétences et à l'expérience de leurs équipes, Dassault Aviation développe un savoir-faire unique en Europe, qu'il partage avec de nombreux partenaires français et internationaux.

Quelques chiffres et informations clés :

Création	1929
Groupe	Groupe Dassault
Siège social	Saint Cloud (France)
Direction	Eric Trappier
Effectif Mondial	11 600
Effectif Français	9 000
Chiffre d'affaire (2012)	3,94 milliards d'euros

## 2. PRESENTATION DU PFE

Dassault Aviation, filiale du groupe Dassault, est un acteur majeur de l'industrie aéronautique. Au sein de cette filiale, le département de Recherche, Etudes et Développement possède une expertise en modélisation, simulation et essais permettant de définir la cellule des aéronefs, des systèmes embarqués ainsi que des produits de soutien (qui permettent la mise en œuvre et la maintenance des avions chez les clients). Dans ce cadre, les industriels cherchent de plus en plus à développer et/ou améliorer des méthodologies permettant de détecter les problèmes potentiels lors de la construction de modèles et de la connexion de sous-modèles entre eux, et ce dans les toutes premières étapes de développement d'un modèle.

Actuellement, Dassault Aviation utilise le langage acausal Modelica pour inverser ses modèles. Cela est réalisé après avoir identifié les variables fixées et celles à déterminer, le compilateur se charge de construire le modèle inverse adéquat. Cependant, l'inversion des modèles reste une tâche délicate, et la détermination des ensembles de variables à fixer n'est pas si aisée. La méthodologie développée par le laboratoire AMPERE, basée sur l'utilisation de modèles bond graph inverses et sur l'analyse structurelle physique, semble intéressante pour systématiser l'inversion des modèles.

### 3. OBJECTIF DE L'ETUDE

Lors de cette étude, un cas test nous est proposé : l'ECS (Environmental Control System). Ce système permet d'obtenir la régulation de la température de la cabine d'un avion. L'objectif de ce sujet est divisé en deux :

- Développer un modèle Bond Graph de l'ECS à partir du modèle Modelica fourni par Dassault Aviation
- Réaliser l'analyse structurelle du modèle dans le but de déterminer les paramètres du système (dimensionnement des composants, rendement des échangeurs, etc...) pour des conditions de fonctionnement données (débit massique, masse du système...).

Pour mener à bien les objectifs de ce sujet, différentes étapes ont été définies :

- Appropriation et compréhension de modèle Modelica du système ECS. Bien comprendre le système est primordial pour pouvoir mener à bien le sujet. De plus il faut aussi se familiariser avec un nouveau logiciel inconnu : MODELICA.
- Définir les équations mises en jeu. Une fois le système compris, il faut ensuite le représenter sous forme d'équations liant paramètres connus et paramètres à définir. Les différents composants du système possèdent leurs propres caractéristiques et propres phénomènes mis en jeu. Par conséquent cette étape nécessite une étude spécifique à chaque composant de l'ECS.
- Modélisation de l'ECS en langage Bond Graph. Cette étape se fait à l'aide du logiciel MS1. Ce modèle sera en lien direct avec les équations définies précédemment.
- Analyse structurelle du modèle. On peut ainsi définir les paramètres à modifier/améliorer pour obtenir un meilleur rendement du système.

Ce sujet en étroite collaboration avec Dassault Aviation permettra de nous sensibiliser aux enjeux industriels d'un acteur important de l'industrie aéronautique. Cela sera aussi l'occasion de développer nos compétences sur des problématiques liées à la modélisation et à la simulation en 0D/1D, notamment via le langage Modelica utilisé par de nombreux industriels présents dans le monde de l'aéronautique et de l'automobile.

## II. MISE EN PLACE DU PROJET

### 1. PRESENTATION DU SYSTEME ECS

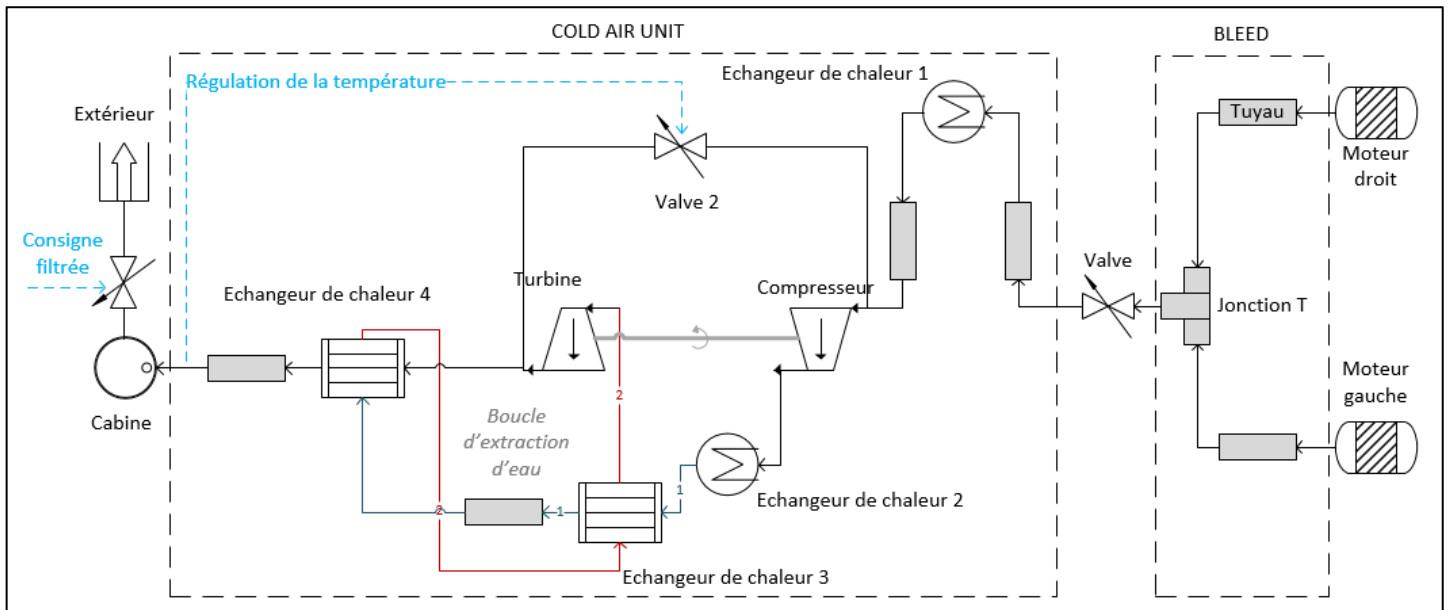


FIGURE 2 - SCHEMA DE PRINCIPE DE L'ECS

Le système ECS d'un appareil civil ou militaire a pour but d'assurer un apport d'air à température, pression et composition viables pour les usagers. L'air est apporté au système par les réacteurs de l'avion et circule ensuite par une succession de composants dont le rôle est de modifier les propriétés de l'air jusqu'à ce qu'il soit respirable par l'homme et à une température confortable.

Le système ECS, dont un schéma de principe est représenté sur la Figure 2, est composé de différents composants :

- Deux moteurs qui apportent l'air sec extérieur dans le système, à température et pression données.
- Un bleed qui mixe les flux issus des deux moteurs pour en ressortir un unique flux combiné.
- Un CAU (Cold Air Unit) qui va réguler le débit massique et l'énergie qui seront ensuite envoyés à la cabine. Ce composant est composé d'autres sous-composants.
- Une cabine, où la température et la pression doivent être conformes aux normes afin que l'environnement soit viable pour les usagers.

Comme énoncé précédemment le CAU est constitué des différents composants suivants :

- Une turbine qui permet de détendre l'air, donc de diminuer la pression ;
- Un compresseur, mécaniquement lié à la turbine qui augmente la pression de l'air ;
- Un premier échangeur qui rafraîchit l'air sortant du bleed ;
- Un deuxième échangeur qui réduit la température de l'air sortant du compresseur ;



- Un troisième échangeur qui peut rafraîchir l'air avant son passage dans le quatrième ainsi que le réchauffer à sa sortie ;
- Un quatrième échangeur qui va permettre d'extraire l'eau contenue dans l'air par condensation (dans le cas où l'air entrant dans l'ECS ne serait pas sec) ;
- Des tuyaux pour le transport du fluide ;
- Une valve de régulation qui adapte l'ouverture en fonction de la température dans la en sortie de CAU
- Une autre valve permettant d'extraire de la pression de la cabine

## 2. MODELE DYMOLA

Le modèle du système ECS fourni par l'entreprise Dassault Aviation est réalisé sur le logiciel Dymola. Ce logiciel est développé par l'entreprise Dassault Systèmes et permet de modéliser et de simuler des systèmes de domaines différents (thermique, mécanique, hydraulique, etc.). Ce logiciel est programmé à l'aide du langage Modelica. Dans le cas de l'ECS, le modèle Dymola met en œuvre les domaines thermique, pneumatique, ainsi que chimique (composition de l'air). Cette modélisation est accessible d'une part sous forme de schéma, regroupant les différents composants sous forme d'icônes et liés entre eux par des liens représentant la circulation de l'air ou la commande ; et d'autre part sous forme d'équations, composant par composant ou de manière plus globale. Les modèles Dymola de l'ECS global ainsi que de l'unité CAU sont en annexe D.

Dymola permet de représenter des systèmes complexes, comme par exemple dans le cas de l'ECS la circulation de l'air humide, considéré comme gaz semi-parfait, à travers de nombreux composants.

### 3. MODELISATION BOND GRAPH

La modélisation Bond Graph consiste à une représentation graphique des transferts de puissance dans un système donné. Elle peut être utilisée dans tous les domaines physiques.

#### A. AVANTAGES DE LA REPRESENTATION BOND GRAPH

La représentation Bond Graph comporte plusieurs avantages que ne peuvent offrir les autres formes de représentations :

- On distingue aisément flux d'informations et flux d'énergie ;
- Une causalité est mise en place. Une fois la représentation mise en place, on pourra distinguer les phénomènes qui ne sont pas physiques ;
- Aucune énergie inexistante ne peut être ajoutée au système

#### B. GENERALITES

La méthode Bond Graph met en évidence deux grands principes :

- Une représentation graphique des échanges de puissances au sein d'un système et le lien entre les variables des différents domaines physiques.
- Une échange de puissance entre deux éléments se fait par un lien représenté par une demie flèche (appelée *bond*) à laquelle est liée une variable d'effort  $e$  et une de flux  $f$ . La puissance est liée au produit  $f \cdot e$ .

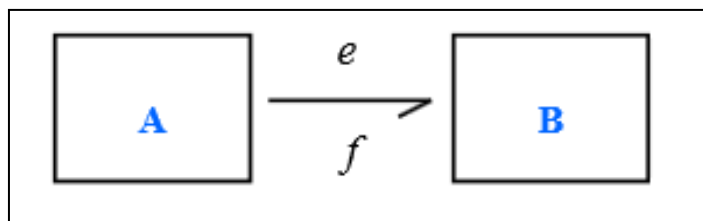


FIGURE 3 - LIEN DE PUISSANCE DANS UN BOND GRAPH

Les nœuds sont des « phénomènes physiques », décrits par des équations : ce terme général peut désigner entre autres des pièces mécaniques, des composants électriques, ou encore des actionneurs hydrauliques.

Un nœud peut aussi représenter une loi physique liée au système et non à un élément particulier :

- Une jonction 1 impose la même valeur de flux aux autres nœuds ;
- Une jonction 0 impose la même valeur d'effort aux autres nœuds.

## C. ELEMENTS USUELS

### Les sources

Les sources peuvent être de deux sortes : source de flux ou d'effort. Cet élément supposé parfait fournit une valeur, constante ou modélisée par un signal, au reste du modèle. Ils apportent de la puissance au système.

### Elément capacitif

Elément représenté par un C, il sert à stocker de l'énergie. Deux types de relations peuvent être mis en place dans cet élément :

$$e = \frac{1}{C} \int_0^t f(x) dx \quad \text{ou} \quad f = C \frac{de}{dt}$$

### Elément dissipatif

Représenté par un R, celui-ci dissipe de l'énergie. Les équations mises en jeu sont les suivantes :

$$e = Rf \quad \text{ou} \quad f = e/R$$

### Elément inertiel

Elément représenté par un I, il permet de représenter une inertie mécanique ou bien une inductance électrique. Les équations mises en jeu sont :

$$f = \frac{1}{I} \int_0^t e(x) dx \quad \text{ou} \quad f = I \frac{df}{dt}$$

## D. APPLICATION A NOTRE SUJET

Lors de ce projet, le modèle Bond Graph est mis en place, testé et analysé sur le logiciel Modelling System One ou **MS1** (version 5.2c). Ce logiciel permet de modéliser, analyser et simuler des systèmes sous forme de Bond Graph, avec possibilité de coder des fonctions et équations en différents langages (ESACAP, Modelica, Matlab, et autres).

Le cas étudié dans le cadre de ce PFE se penche sur les aspects hydraulique et thermique d'un système ECS, le modèle Bond Graph couple donc deux types de puissance, et met donc en œuvre deux couples effort-flux. Néanmoins dans le cas d'études hydrauliques et thermiques, l'utilisation d'un « pseudo-Bond Graph » se révèle plus aisé : les couples mis en œuvre ne sont plus pression-

enthalpie et température-débit volumique mais pression-débit d'enthalpie massique ( $P-q_{mh}$ ) et température-débit massique ( $T-q_m$ ). Le logiciel MS1 permet non seulement de mettre en place un modèle pseudo-Bond Graph mais aussi de mettre en œuvre des multiports R-C-I (alors précédés du préfixe F pour « field ») pour permettre le couplage de deux types de puissance, et est donc adapté dans ce cas d'étude.

## 4. HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

Afin de mettre en place un premier modèle d'ECS sous forme de Bond Graph, les hypothèses simplificatrices suivantes ont été posées :

- Le gaz considéré est de l'air sec et est supposé parfait. Les coefficients  $C_p$  et  $C_v$  sont donc constants et la loi des gaz parfaits s'applique.
- La pression et la température de l'air entrant dans le système par les moteurs sont supposées connues, constantes, et identiques dans les deux moteurs.
- Les rendements volumétriques, mécaniques et isentropiques de la turbine et du compresseur seront supposés constants et connus. Dans un modèle plus complexe, ces rendements varient au cours du temps.
- Tous les tuyaux, permettant de transporter le gaz à travers le système, sont supposés de dimensions connues et égales. Cette hypothèse est basée sur celle utilisée dans Dymola.

### III. MODELISATION BOND GRAPH SOUS MS1

#### 1. MODELE GLOBAL

Pour une plus grande facilité de lecture du système, le modèle ECS est décomposé en sous-systèmes. Il existe donc trois niveaux différents dans le modèle MS1 de l'ECS : le niveau composant, puis CAU et *bleed*, et enfin le niveau global de l'ECS. La Figure 4 présente le modèle global de l'ECS représenté sous MS1.

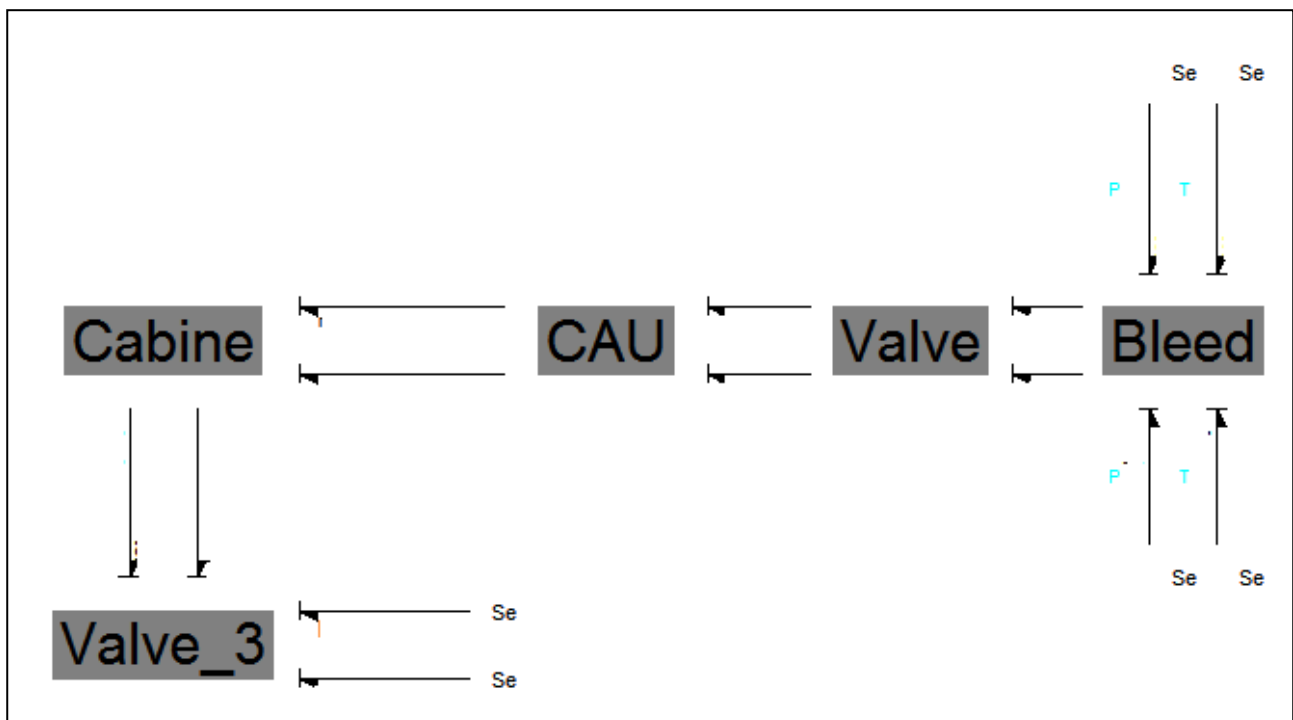


FIGURE 4 - MODELE BOND GRAPH GENERAL DE L'ECS

On y identifie assez facilement les différentes parties de notre système. Les entrées sont représentées par quatre sources d'efforts (deux de températures et deux de pression), qui proviennent des deux générateurs. Les deux sources d'efforts liées à la valve 3 permettent l'extraction de pression de la cabine. Nous l'aborderons plus en détails dans la suite du rapport.

## 2. COMPOSANTS

Ce sous-chapitre présente la mise en équation et la représentation Bond Graph de chaque composant de l'ECS.

### A. TUYAU

Un tuyau est modélisé comme une restriction, entraînant une chute de pression, associée d'un volume. Il existe un échange de chaleur  $dQ$  entre le fluide et les parois du tuyau en raison d'une différence de température.

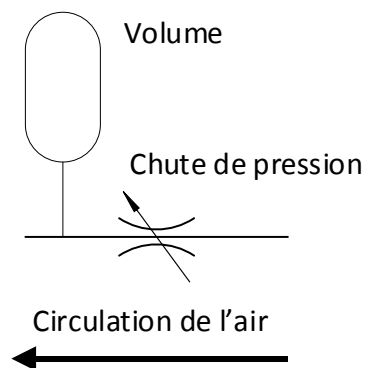


FIGURE 5 - MODÈLE BOND GRAPH GLOBAL DE L' ECS

#### Données :

Chute de pression (élément FR) :

$$|P_2^2 - P_1^2| = 2 \cdot K \cdot qm^\alpha \cdot T_m$$

$$\text{avec } T_m = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

$$\text{unités : } \begin{cases} P_i \text{ en mbar} \\ T_i \text{ en K} \\ qm \text{ en kg/min} \end{cases}$$

Equilibre de masse (élément FC) :

$$\frac{dm}{dt} = qm_1 - qm_2$$

Equilibre de l'énergie interne (élément FC):

$$\frac{dU}{dt} = qmh_1 - qmh_2 + \dot{Q}$$

**Mise en équation :**

Les efforts ( $P$  et  $T$ ) sont les entrées du tuyau, les flux ( $qm$  et  $qm$ ) doivent donc être exprimés en fonction de ces efforts.

$$(Eq.T1) \quad qm_1 = \text{sgn}(P_2^2 - P_1^2) \cdot \exp\left(\frac{1}{\alpha} \cdot \ln\left(\frac{|P_2^2 - P_1^2|}{K(T_1 + T_2)}\right)\right)$$

$$(Eq.T2) \quad qm_i = qm_1$$

Avec l'hypothèse  $C_p$  constant, et en considérant l'air sec comme un gaz parfait :

$$(Eq.T3) \quad qmh_1 = qm_1 C_p T_1$$

$$(Eq.T4) \quad qm_i = qm_1$$

$$(Eq.T5) \quad T_2 = \frac{U}{m \cdot C_v}$$

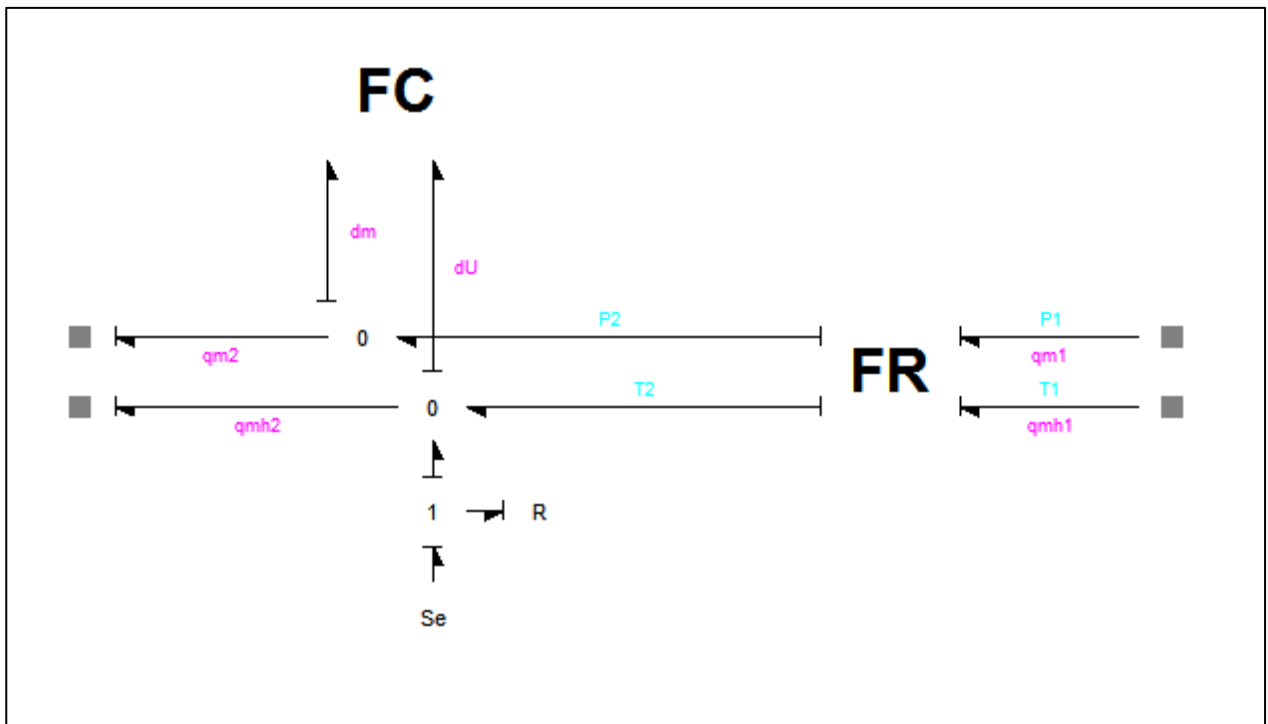
$$(Eq.T6) \quad P_2 = \frac{m \cdot r}{V} \cdot T_2$$

L'échange de chaleur par convection entre le tuyau et l'air est calculé par la formule suivante :

$$(Eq.T7) \quad \dot{Q} = K_{tuy} S_{lat} (T_{ext} - T_2)$$

Les détails des équations sont indiqués en **annexe E.1**

Ces équations permettent d'obtenir le modèle représenté sur la Figure 6.



**FIGURE 6 - MODELE BOND GRAPH D'UN TUYAU**

Les jonctions 0 représentent les équilibres de masse et d'énergie. La source d'effort suivie d'un élément R représente la température des parois du tuyau et permet de mettre en œuvre l'échange de chaleur entre ces parois et l'air qui circule dans le tuyau. Les équations T1 à T4 sont mises en œuvre par l'élément FR et les équations T5 et T6 par l'élément FC.

## Résultats :

Le modèle du tuyau est basé sur des efforts imposés en entrée alors que l'on impose les flux en sorties. Ainsi afin de comparer nos résultats obtenus à ceux de Dymola, nous analyserons donc les flux en entrée et les efforts en sortie. Les courbes rouges représentent les résultats obtenus sous MS1 alors que les vertes sont ceux de Dymola.

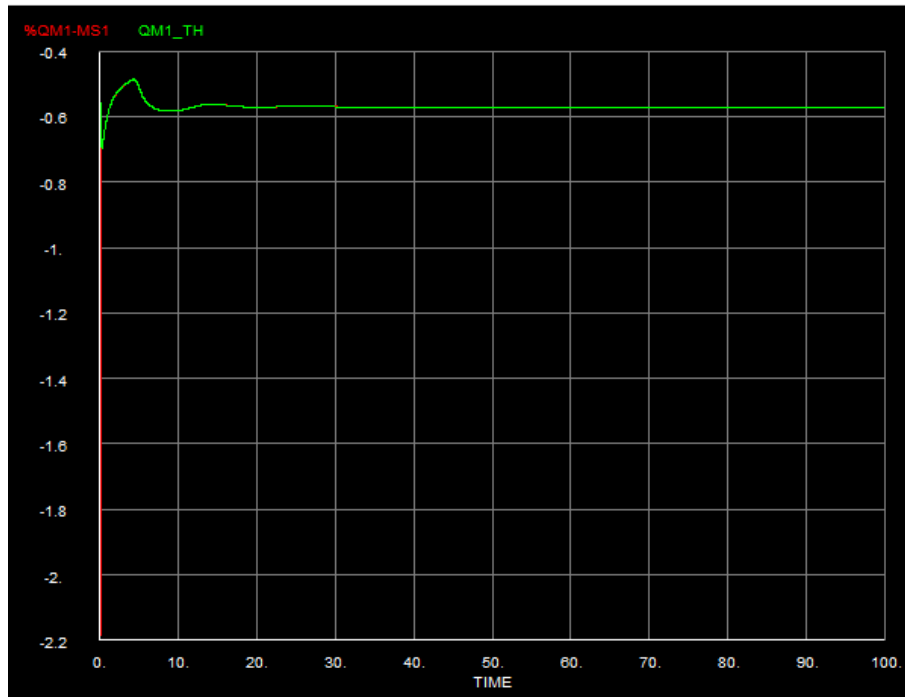


FIGURE 7- DEBIT MASSIQUE EN ENTREE DE TUYAU

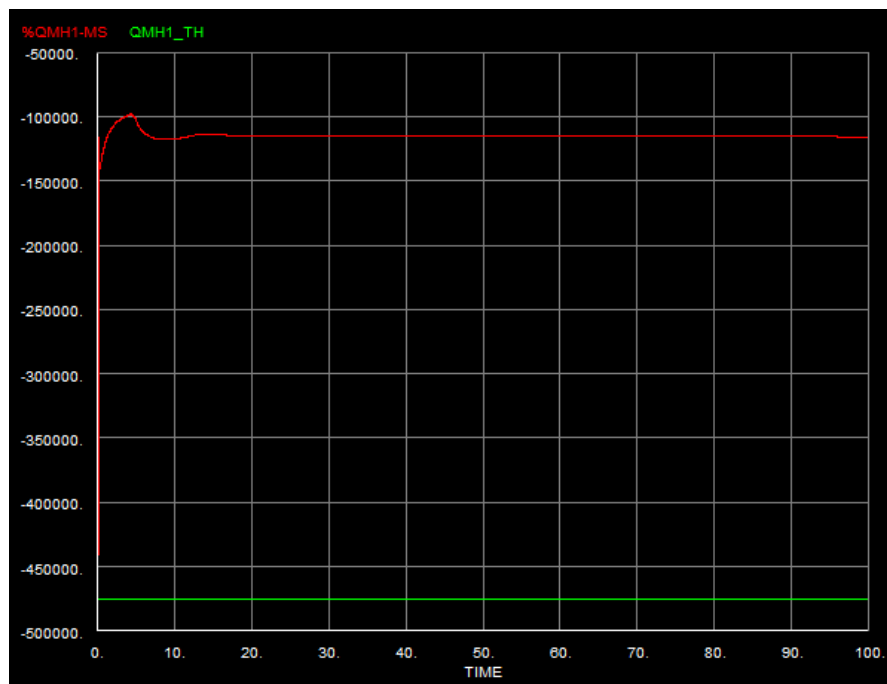


FIGURE 8 - DEBIT D'ENTHALPIE MASSIQUE EN ENTREE DE TUYAU



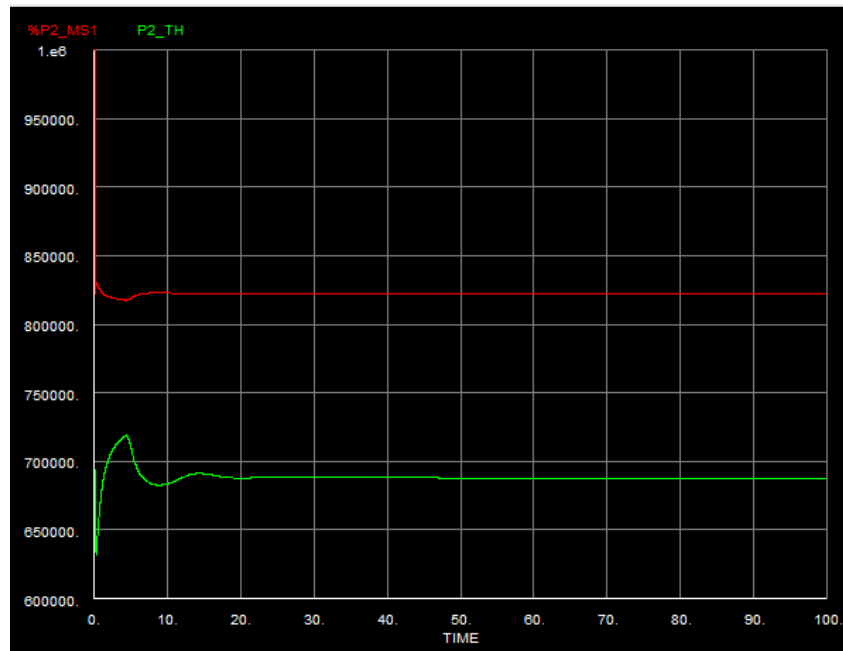


FIGURE 9 - PRESSION EN SORTIE DE TUYAU

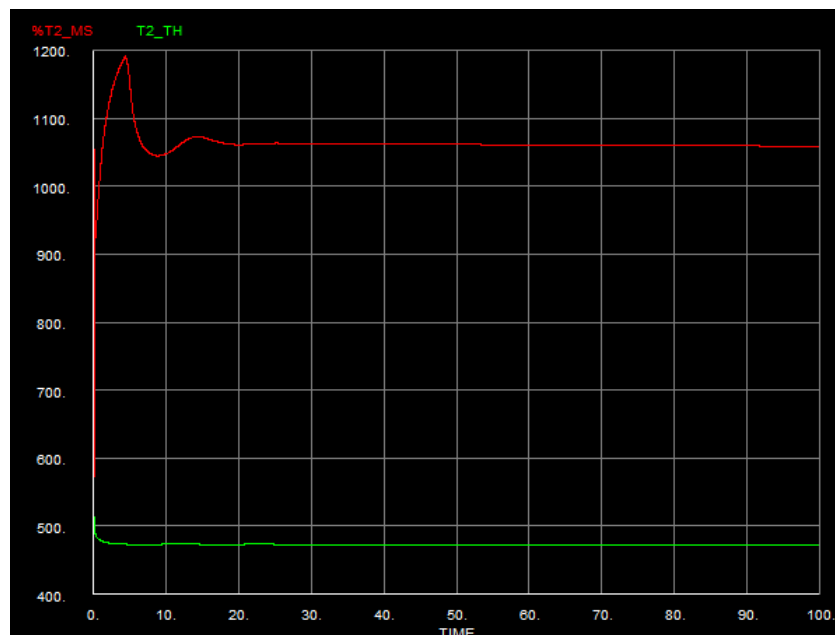


FIGURE 10 - TEMPERATURE EN SORTIE DE TUYAU

On peut aisément identifier les erreurs rencontrées dans notre représentation. Le débit massique d'entrée obtenu est identique au théorique. Ce premier résultat est satisfaisant pour le modèle que nous avons mis en place. Cependant les autres résultats sont moins appréciables. On retrouve dans les trois cas un écart, plus ou moins important, entre les courbes. Toutefois on peut noter que nos courbes, comme celles du modèle théorique, tendent bien vers une stabilisation. Bien que nous n'ayons pas réussi à identifier la cause de ce dysfonctionnement nous supposons que cela est engendré par une erreur de formule dans le calcul du  $q_{mh}$  en entrée. De plus la représentation des échanges thermiques avec l'extérieur, notamment de ses constantes, pourrait aussi être un facteur d'erreurs.

## B. BLEED

Le *bleed* est composé de deux tuyaux suivis d'une jonction en « T » réunissant les deux flux entrant en une unique sortie. Cette représentation réutilise le modèle du tuyau déjà défini précédemment.

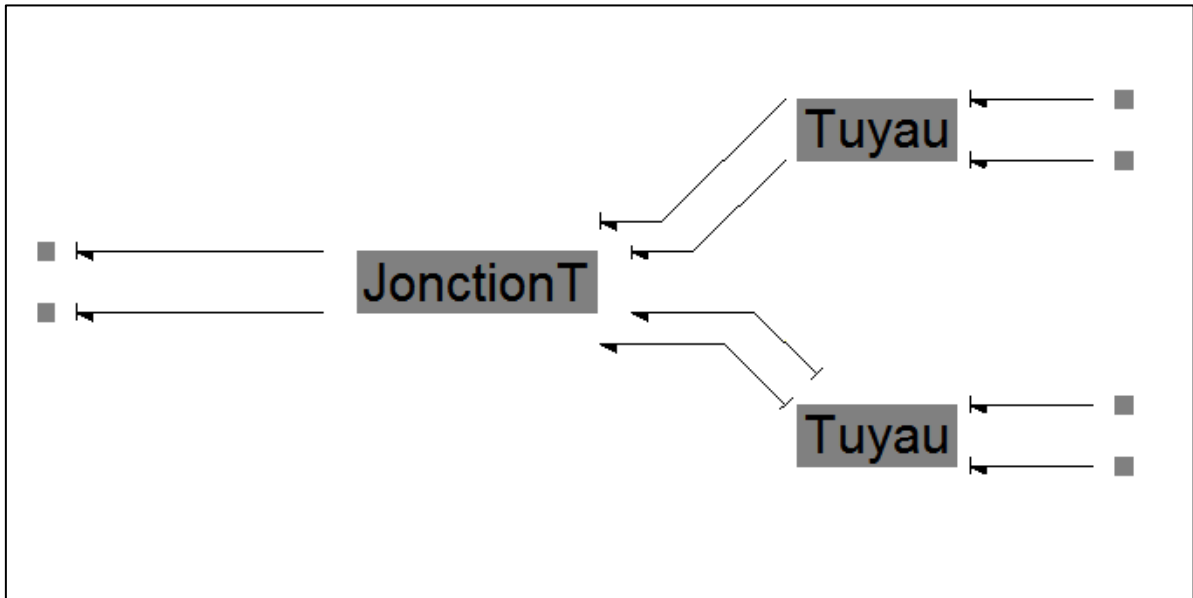


FIGURE 11 - MODÈLE BOND GRAPH DU BLEED

Deux fluides en entrées 11 et 12, à même pression et même température se rejoignent pour former un seul flux en sortie 2.

### Mise en équation :

$$\begin{aligned} qm_2 &= qm_{11} + qm_{12} \\ qmh_2 &= qmh_{11} + qmh_{12} \\ P_2 &= P_{11} = P_{12} \\ T_2 &= T_{11} = T_{12} \end{aligned}$$

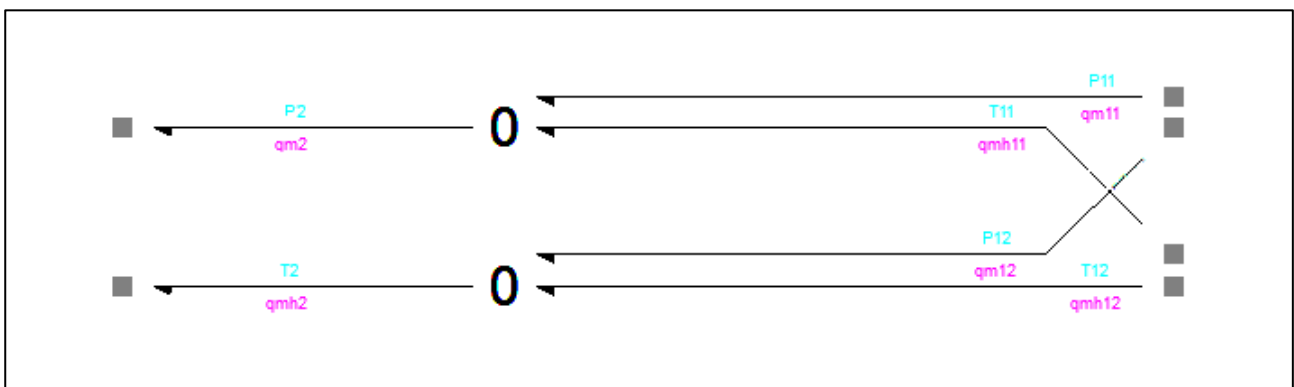


FIGURE 12 - MODELE BOND GRAPH DE LA JONCTION T

Les jonctions 0 permettent de représenter les deux équations d'équilibre.

## C. VALVE

L'élément valve consiste à une perte de charge et dépend d'un paramètre d'ouverture : « opening ». Celle-ci correspond à l'ouverture effective de la valve et est comprise entre 0 (complètement fermée) et 1 (complètement ouverte).

Notre système est composé de trois valves. Les deux premières sont identiques, seul le signal « opening » change. Cependant le troisième est différente des deux premières, les équations mises en jeu ne sont pas les mêmes. Les paramètres de valves sont définis en **annexe E.3**

### Premier type de valve

Les valves correspondantes sont :

- Celle qui lie le Bleed et le CAU
- Celle qui dans le CAU permet de réguler la température en sortie de CAU

#### Données :

$$\begin{aligned} qm &= opening \cdot k_{valve} \cdot dp \\ k_{valve} &= \frac{qm_{nominal}}{dp_{nominal}} \\ dp &= P_1 - P_2 \end{aligned}$$

#### Mise en équation :

$$(Eq.V1) \quad qm_1 = opening \cdot k_{valve} \cdot (P_1 - P_2)$$

$$(Eq.V2) \quad qm_2 = qm_1$$

$$(Eq.V3) \quad qmh_i = qm_i \cdot Cp \cdot T_i, \text{ avec } i = 1, 2$$

Les équations V1 à V3 sont mises en œuvre dans l'élément FC, le signal *opening* dépend des boucles de régulation de pression et/ou de température, selon la valve en question.

Cependant, après une étude approfondie, nous avons rencontré un conflit de causalité dans la valve 1. Il a donc fallu par conséquent adapter nos équations dans l'élément FR pour calculer les flux en entrée mais cette fois ci les efforts en sortie. On réutilise donc les équations **Eq.V1** et **Eq.V2**, mais on change celles des sorties :

$$(Eq.V4) \quad P_2 = P_1 - \frac{qm_1}{opening \cdot k_{valve}}$$

$$(Eq.V5) \quad T_2 = \frac{qmh_2}{qm_2 \cdot Cp}$$

Pour la première ce signal est une simple constante fixée par l'utilisateur et comprise entre 0 et 1. Pour nous rapprocher du modèle fourni, nous avons réutilisé le signal *opening* présent sur le logiciel Dymola et consiste à un échelon passant de 0 à 1.

Pour la deuxième valve ce signal *opening* est plus complexe. Un détecteur vient mesurer la température en sortie de CAU. On réutilise ce signal mesuré dans une boucle de régulation composé de deux saturations et d'un intégrateur. Les saturations permettent de vérifier si la valeur envoyée est bien comprise dans un intervalle fixé par deux valeurs  $U_{min}$  et  $U_{max}$ . Le signal en sortie de cette boucle de régulation sera donc l'*opening* de la deuxième valve.

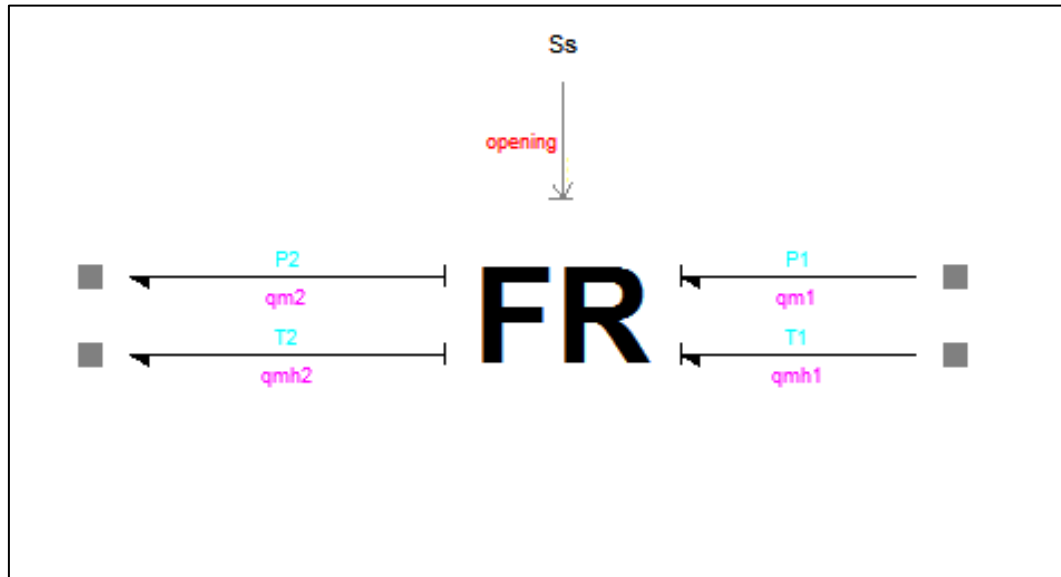


FIGURE 13 - MODELE BOND GRAPH DE LA VALVE

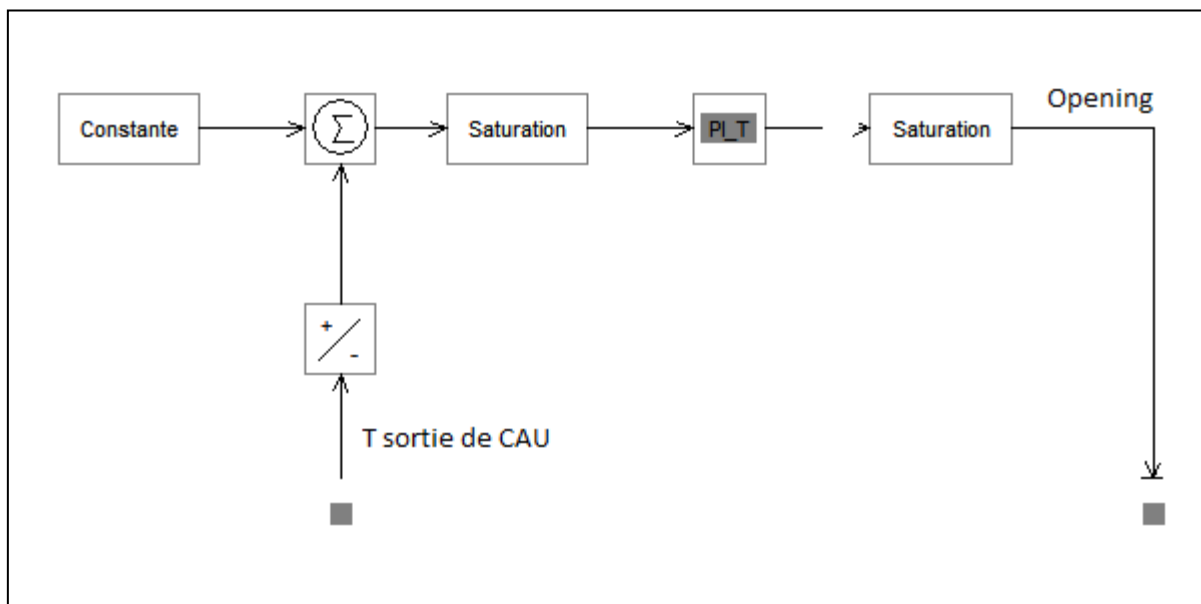


FIGURE 14 - REGULATION DE LA VALVE 2

## Résultats :

Si l'on compare les résultats obtenus sous MS1, à ceux de Dymola, on constate que notre représentation se rapproche très fortement du modèle initial. Ce composant étant constitué uniquement d'un élément FR, nous cherchons à calculer les flux à ses bornes.

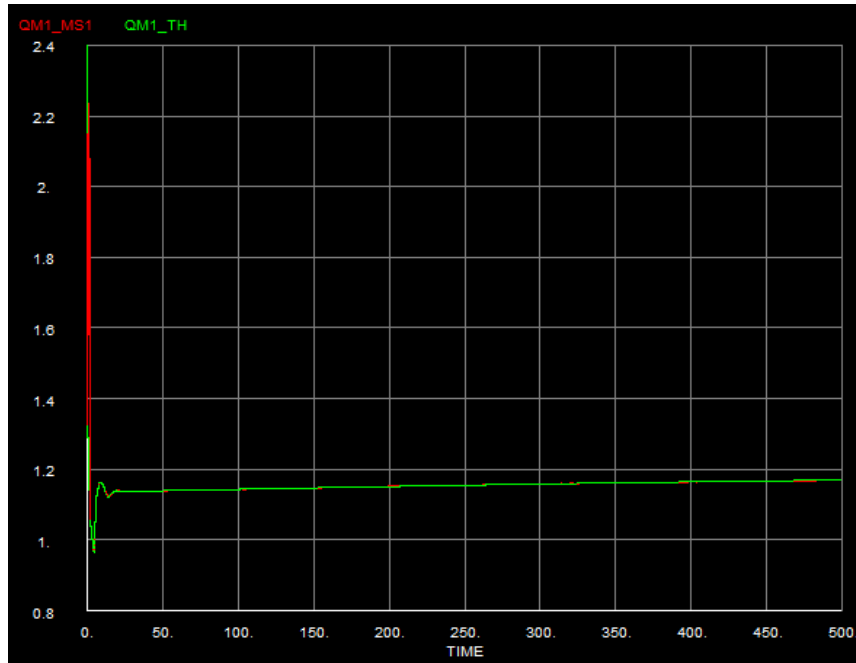


FIGURE 15 - DEBIT MASSIQUE EN ENTREE DE VALVE DE TYPE 1

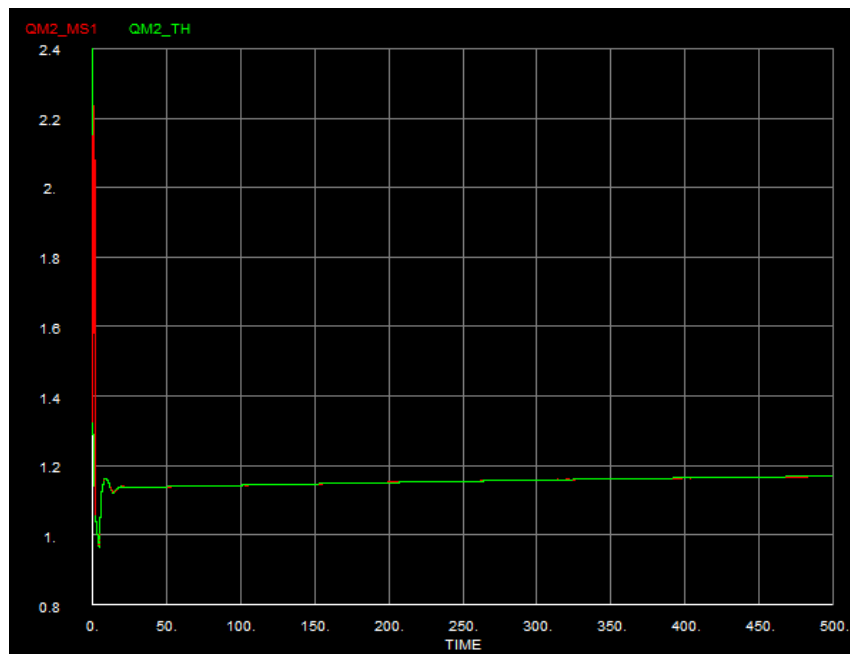


FIGURE 16 - DEBIT MASSIQUE EN SORTIE DE VALVE DE TYPE 1

On voit que les courbes rouges (MS1) sont quasiment confondues avec les vertes (Dymola). On peut donc noter que la représentation Bond graph est très réaliste pour ce composant.

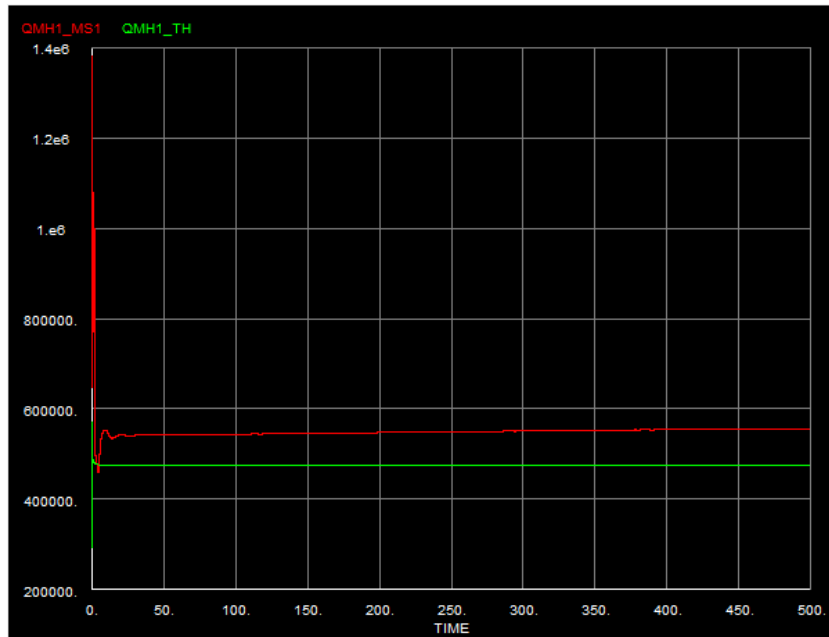


FIGURE 17 - DEBIT D'ENTHALPIE MASSIQUE EN ENTREE DE VALVE DE TYPE 1

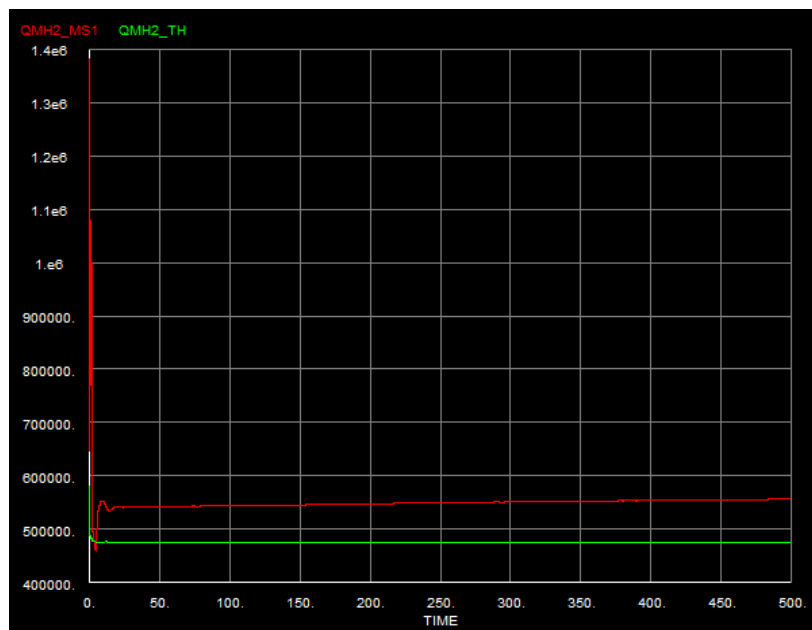


FIGURE 18 - DEBIT D'ENTHALPIE MASSIQUE EN SORTIE DE VALVE DE TYPE 1

Bien que l'on remarque une légère différence en ce qui concerne les débits d'enthalpie massique, on reste néanmoins très proche des valeurs de Dymola. Les formes de courbes sont les mêmes ainsi que l'ordre de grandeur. Ce léger écart peut être dû aux hypothèses simplificatrices mises en place en début d'étude.

## Deuxième type de valve

Ce type de valve correspond à celle qui va servir à extraire de l'air (pour diminuer la pression) en sortie de cabine. Celle-ci est contrôlée par un signal rampe qui sera soumis à une saturation et à un filtre. En sortie de valve se trouve des conditions de pressions et de températures extérieures connues :  $P_{ext}$  et  $T_{ext}$

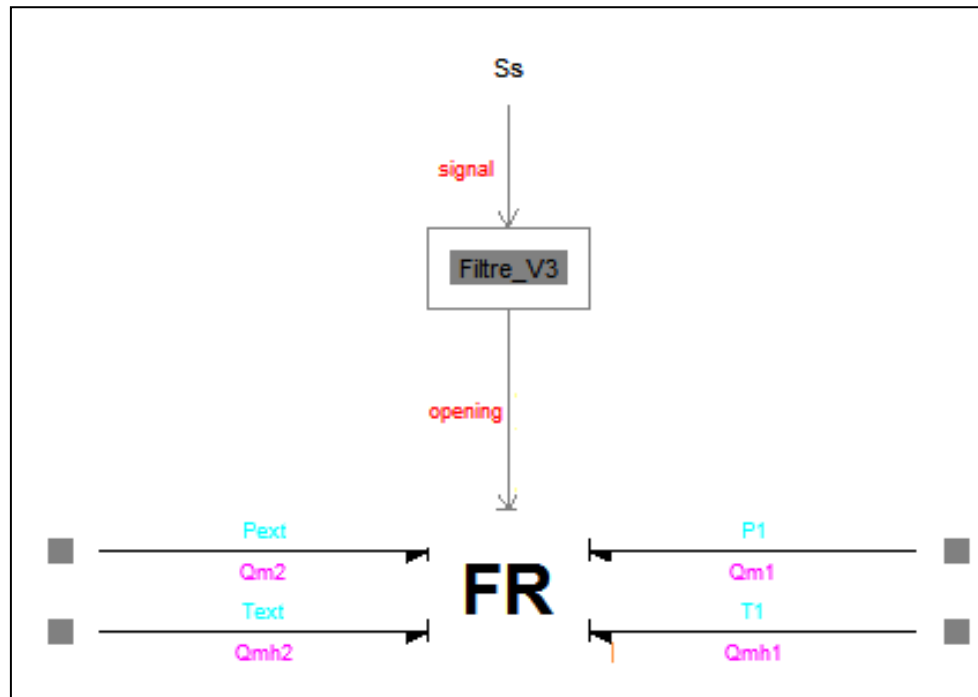


FIGURE 19 - MODELE BOND GRAPH DE LA VALVE 3

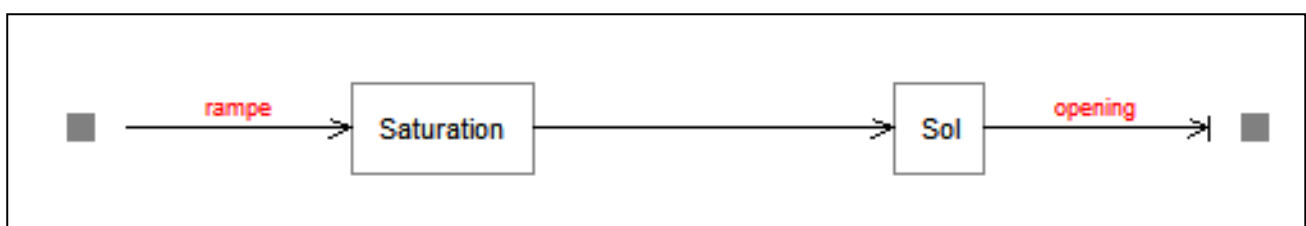


FIGURE 20 - FILTRE POUR LA VALVE 3

Cette valve est aussi représentée par un élément FR. Seules les équations changent.

**Données :**

En s'appuyant sur le modèle Dymola nous avons pu trouver les équations intervenant dans cette troisième valve :

$$p = \text{MAX}(P_1, P_2)$$

$$x = \frac{dp}{p}$$

$$Fxt = Fxt_{full} * opening$$

Avec  $Fxt_{full}$  une constante connue liée à la valve.

$$xs = \text{signe}(x) * Fxt \text{ si } |x| > Fxt$$

$$\text{ou } xs = x \text{ dans le cas contraire}$$

$$Y = 1 - \frac{|xs|}{3Fxt}$$

enfin nous avons la relation suivante :

$$qm = opening * Av * Y * \sqrt{\rho} * \sqrt{p * xs}$$

Avec  $p$  la masse volumique et  $Av$  le coefficient de débit de la valve.

**Mise en équation :**

On obtient donc les équations suivantes sur les flux intervenant dans l'élément FR :

$$qm_1 = opening * Av * Y * \sqrt{\rho} * \sqrt{p * xs} = qm_2$$

$$qmh_1 = qm_1 * Cp * T_1$$

$$qmh_2 = qm_2 * Cp * T_2$$

**Résultats :**

De la même façon que pour le premier type de valve, on peut analyser les résultats sur cet autre composant.



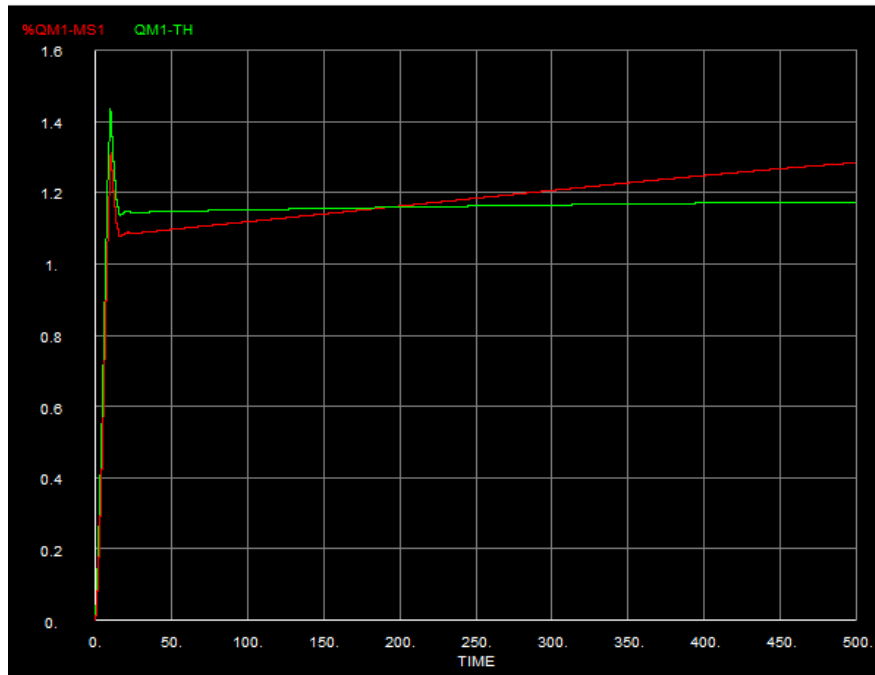


FIGURE 21 - DEBIT MASSIQUE EN ENTREE DE VALVE DE TYPE 2

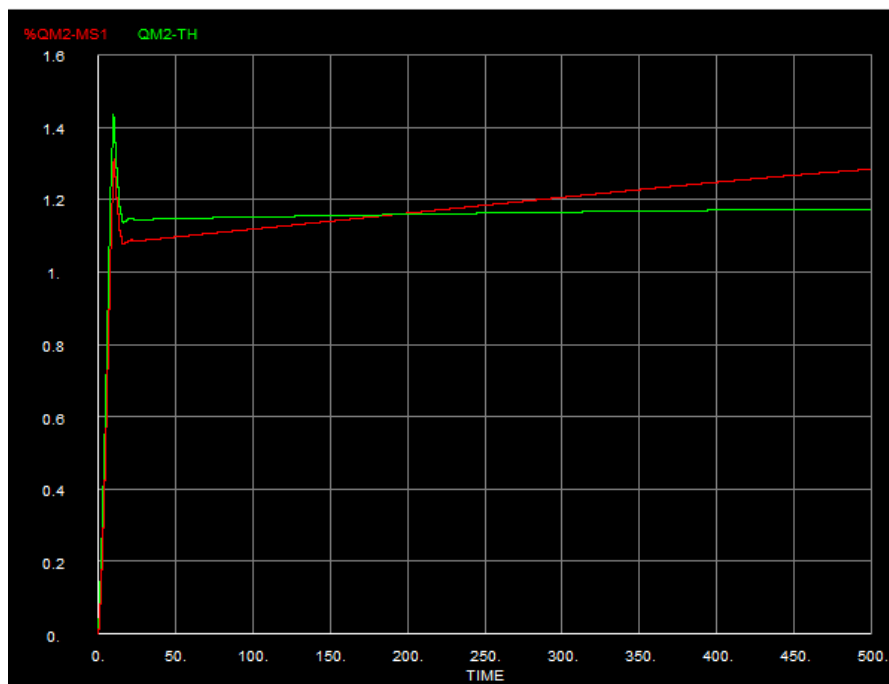


FIGURE 22 - DEBIT MASSIQUE EN SORTIE DE VALVE DE TYPE 2

En ce qui concerne les débits massiques, nous avons réussi à mettre en place une représentation qui se rapproche très fortement de celle fournie dans le modèle initial. On remarque que les ordres de grandeurs sont corrects, seule la forme de la courbe varie légèrement. Sur l'intervalle mis en place, la théorique se stabilise alors que notre courbe croît légèrement. Cependant lorsque l'on simule sur un temps plus long, notre courbe tend vers une stabilisation.

Les courbes de débit d'enthalpie massique, quant à elles, se rapprochent moins du résultat désiré.

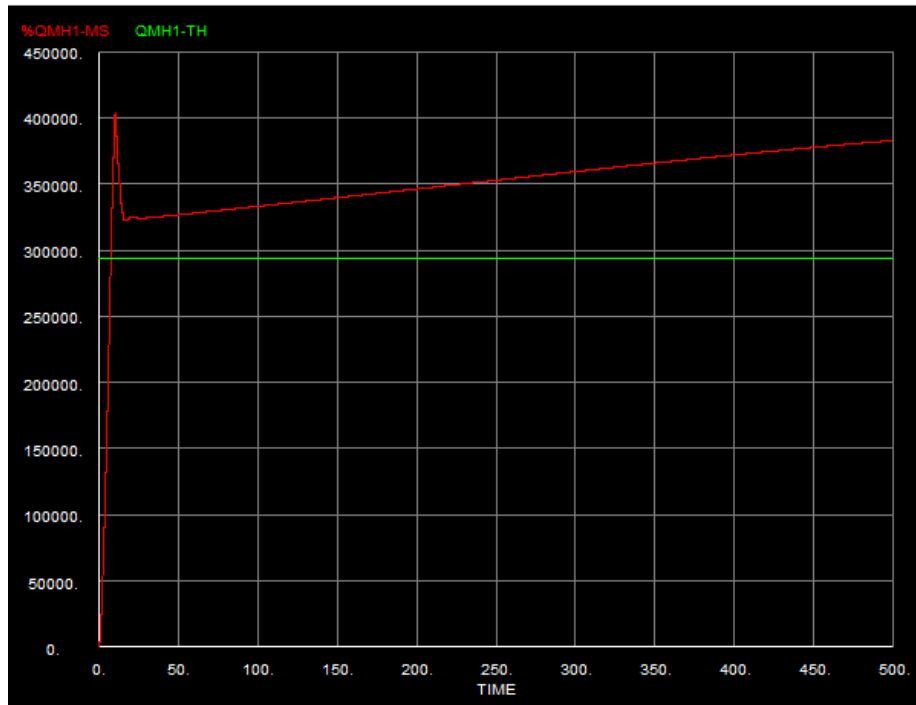


FIGURE 23 - DEBIT D'ENTHALPIE MASSIQUE EN ENTREE DE VALVE DE TYPE 2



FIGURE 24 - DEBIT D'ENTHALPIE MASSIQUE EN SORTIE DE VALVE DE TYPE 2

Nous retrouvons encore une fois cette tendance à croître au lieu de se stabiliser. Cet écart est probablement causé par une erreur dans la représentation mise en place. Les relations mises en jeu dans cette valve, ainsi que le système de filtre mis en place, peuvent être la cause de cette variation.

## D. ECHANGEURS DE CHALEUR

### Premiers échangeurs : fluide de refroidissement externe au circuit principal

Les deux premiers échangeurs sont modélisés de la même façon. Le fluide de refroidissement est de l'air sec provenant d'un circuit externe. L'échangeur est modélisé comme deux tuyaux en série, avec entre eux un échange de chaleur. Le tuyau supérieur est le circuit principal, le tuyau inférieur correspond au circuit de refroidissement, les pressions et températures en entrée et sortie de circuit de refroidissement sont connus (source : modèle Dymola). Comme pour les tuyaux on met en place une perte de charge (élément FR), un volume (élément FC). La jonction 1 associée d'une dissipation (R) modélise l'échange de chaleur.

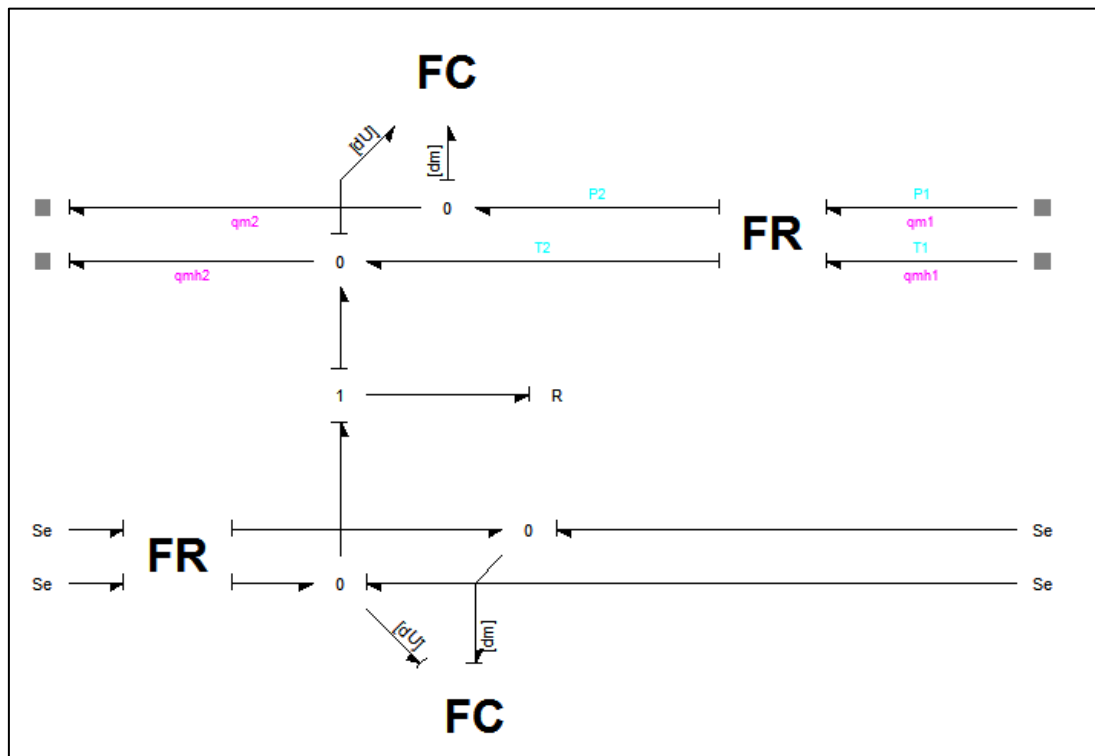


FIGURE 25 - MODELE BOND GRAPH DU PREMIER TYPE D'ECHANGEUR

On retrouve bien dans chacun des tuyaux les équations T1 à T6 calculées au chapitre III.2.A. Les différents paramètres servants aux calculs de l'échangeur sont décrits en **annexe E.4**

La chaleur échangée est calculée par l'équation E1.

$$(Eq. E1) \quad \dot{Q} = K_{éch} S_{éch} (T_{circuit\ ext} - T_{circuit\ principal})$$

## Deuxième type d'échangeurs : fluide de refroidissement issu du circuit principal

Les deux derniers échangeurs, formant le circuit d'extraction d'eau, sont modélisés de la même façon. Le fluide de refroidissement est de l'air sec provenant du circuit lui-même. En effet, l'air du circuit passe dans l'échangeur RHX ou « re-heater », puis dans le dernier échangeur CDHX ou « condenser », revient dans le RHX puis passe par la turbine avant de retraverser le condenseur. Ces deux échangeurs sont donc chacun modélisés comme précédemment, mais les efforts du circuit de refroidissement ne sont plus des constantes, ils sont issus du circuit.

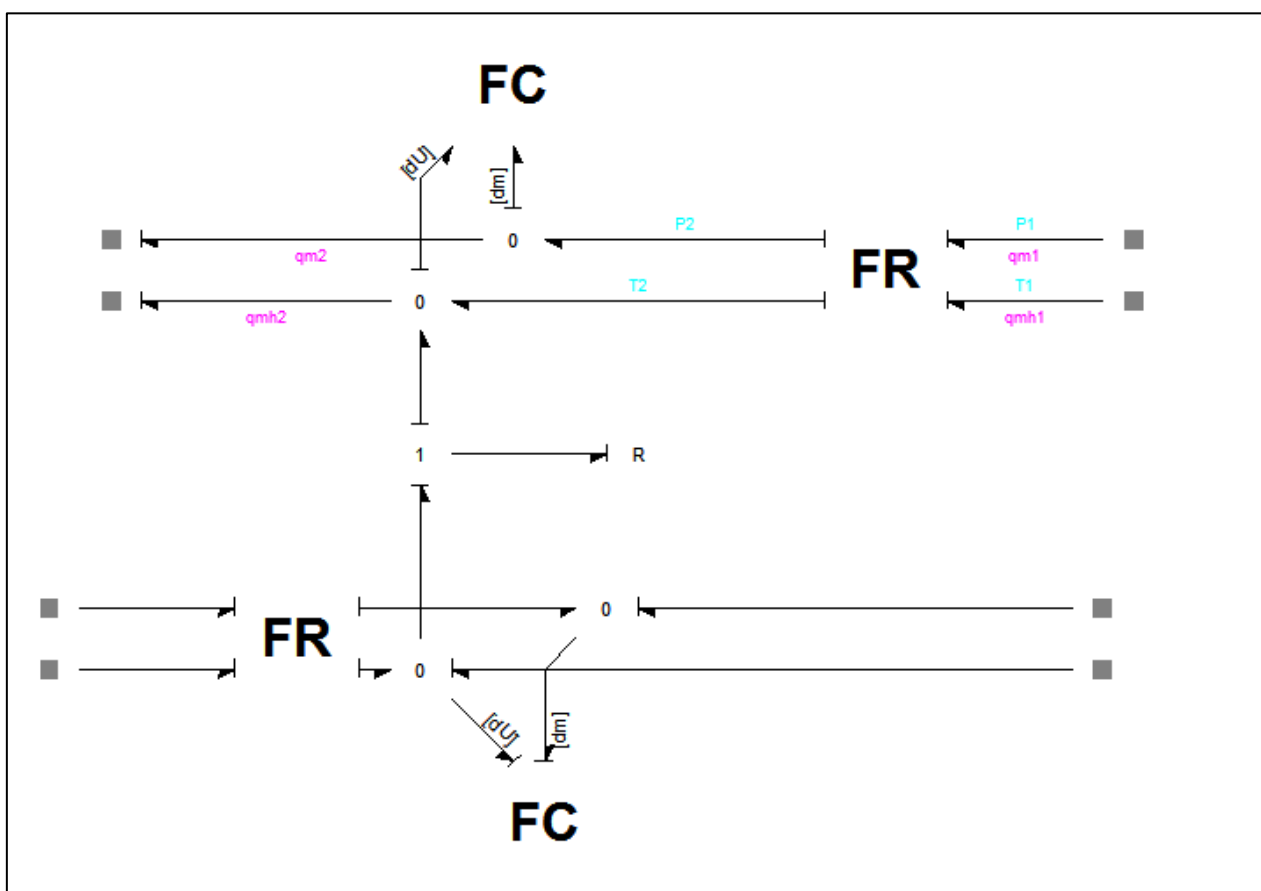


FIGURE 26 - MODELE BOND GRAPH DU DEUXIEME TYPE D'ECHANGEURS

### Résultats :

Les échangeurs (des deux types) étant représentés sous forme de combinaison de tuyaux nous retrouvons le même type d'erreurs que celles obtenues en III.2.A.

## E. TURBOCOMPRESSEUR

Dans la solution qui nous est proposée, un compresseur est lié à une turbine par l'intermédiaire d'un arbre mécanique. La **Figure 27** ainsi que l'**annexe E.5** permettent d'identifier les différents paramètres du turbocompresseur ainsi que les constantes utilisées.

### Le compresseur :

Il est représenté comme une chute de pression (FR) à laquelle vient s'ajouter l'inertie engendrée par l'arbre lié en rotation à la turbine.

#### Données :

Equilibre de masse :

$$\frac{dm}{dt} = qm_1 - qm_2$$

Equilibre de l'énergie interne :

$$\frac{dU}{dt} = qmh_1 + qmh_2 + C \cdot \omega$$

$$qm h_2 + qm h_1 = -qm_1 \cdot \Delta h$$

$$\text{avec : } \Delta h = \frac{1}{\eta_{is}} * C_p * T_1 * \frac{P_2^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{P_1}$$

$$\text{et : } \gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

Débits massiques :

$$qm = qm_2 = f(\omega, P_1, T_1, P_2)$$

Hypothèse sur les rendements :

On considère que les rendements volumétrique, mécanique et isentropique sont constants et connus. Bien que dans la réalité cette hypothèse n'est pas vraie, dans un travail d'observation comme celui que nous réalisons nous pouvons émettre cette hypothèse.

#### Mise en équation :

Nous calculons d'abord les différents flux intervenant dans le FR (1 entrée du FR et à sa sortie) :

$$qm_1 = C_q * A * \frac{E_1}{\sqrt{T_1}} * C_m * \frac{P_1}{P_1} = qm_i$$

Avec  $C_q$  = paramètre de débit,  $A$  = section de passage et  $C_m$  = coefficient de débit

$$\text{On calcule : } qm h_1 = qm_1 * C_p T_1$$

$$\text{et } qm h_i = qm h_1 + \Delta h$$

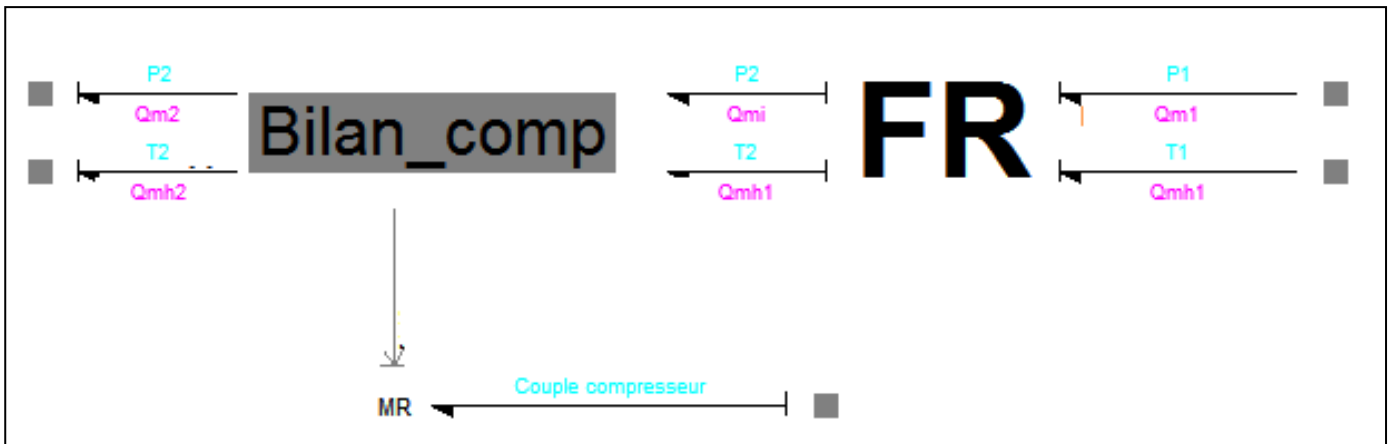


FIGURE 27 - MODELE BOND GRAPH DU COMPRESSEUR

Pour la suite, nous nous sommes rendu compte que le modèle Dymola nous imposait les relations suivantes :

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dm}{dt} = 0$$

Par conséquent nous n'avons pas à ajouter de volume (élément FC). Une simple représentation à l'aide de jonction 1 et 0 nous permettait de calculer les températures et pression de sortie :

$$T_2 = \frac{qmh_2}{qm_2 * Cp}$$

$$\text{et : } P_2 = \frac{m * r * T_2}{V}$$

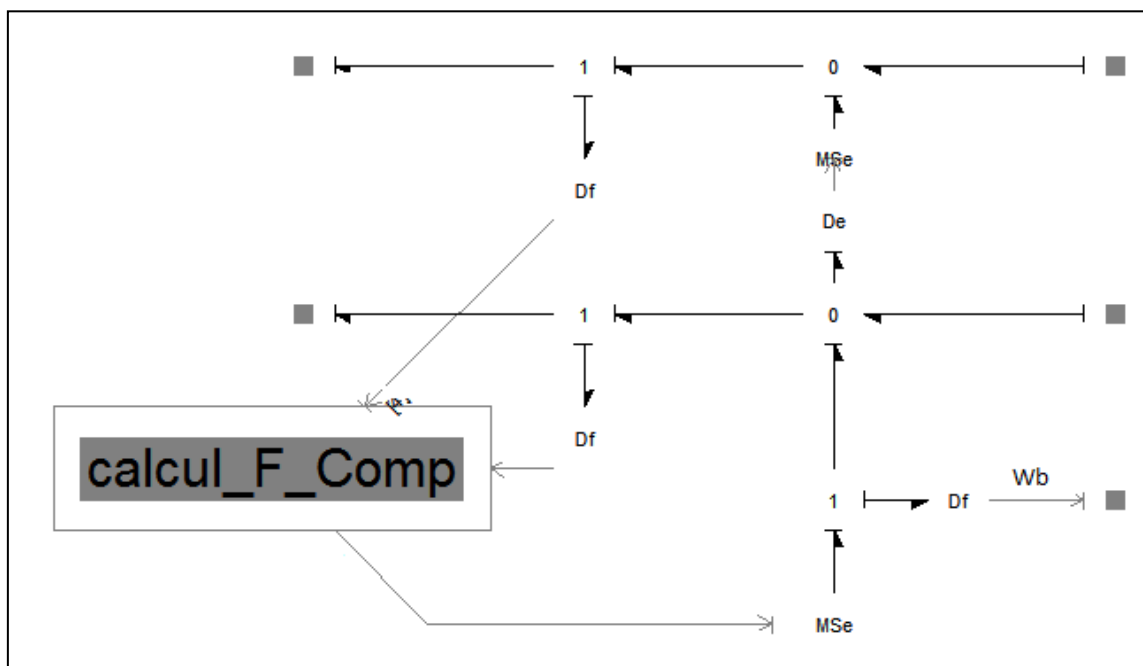


FIGURE 28 - MODELE BOND GRAPH DU BILAN COMPRESSEUR

## La turbine :

La turbine a été représentée de la même façon que le compresseur en prenant en compte les changements de paramètres propres aux composants (volume, coefficient...). Cependant il y avait quand même des modifications à apporter sur les équations de l'élément FR.

### Données :

Une formule du identifiée dans le code Dymola nous permet de calculer la surface de passage du fluide en fonction de la surface spécifique de la turbine et des composantes des vecteurs des vitesses caractéristiques de la turbine.

$$St = St0 * \left( 1 - Ut1 * \exp \left( Vt1 * \left( \frac{P_i}{P_1} - 1 \right) \right) Ut2 * \exp \left( Vt2 * \left( \frac{P_i}{P_1} - 1 \right) \right) \right) * 0.0404$$

St0, Ut1, Ut2, Vt1 et Vt2 sont des caractéristiques propres à la machine utilisée. Voir l'annexe E.5.

### Mise en équation :

On calcule donc les différents flux aux bornes de l'élément FC :

$$qm_1 = St * \frac{P_1}{\sqrt{T_1}} = qm_i$$

$$\text{On calcul } qmh_1 = qm_1 * C_p T_1$$

$$\text{et } qmh_i = qmh_1 + \Delta h$$

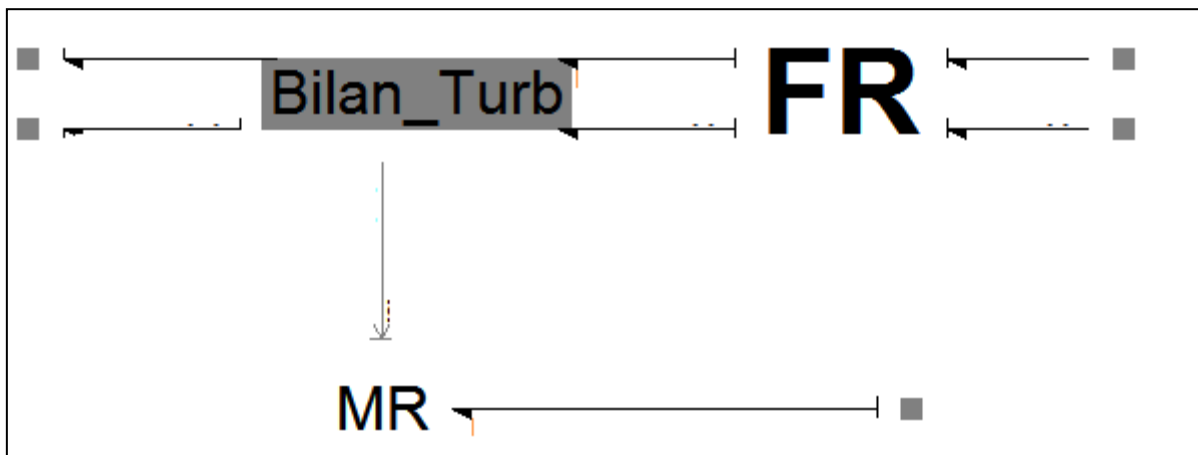


FIGURE 29 - MODELE BOND GRAPH DE LA TURBINE

## Liaison mécanique entre turbine et compresseur :

Turbine et compresseur sont liés mécaniquement par l'intermédiaire d'un arbre. Celui-ci possède une inertie connue  $J$ . La liaison entre ces deux éléments est donc réalisée par un élément  $I$ .

### Données :

Formule sur l'inertie avec  $w$  la vitesse de rotation :

$$a = \frac{dw}{dt}$$

$$\text{et } Ja = \sum \text{Couples}$$

### Mise en équation :

On obtient la relation suivante :

$$J * \frac{dw}{dt} = C_{turbine} + C_{compresseur}$$

Il faut donc extraire les couples respectifs du compresseur et de la turbine. Pour cela on utilise le fait que  $dU/dt=0$ .

$$\frac{dU}{dt} = Hb + Wb = 0$$

$$\text{avec } Hb = qm_1h_1 + qm_2h_2$$

$$\text{et } Wb = C * \eta_{mec} * \omega$$

$$\text{on obtient donc } C = \frac{Wb}{\eta_{mec} * \omega}$$

Cette dernière formule est la même pour le compresseur et la turbine. Seuls les paramètres propres aux composants changent.

A l'aide de détecteurs et d'éléments MR on peut donc faire ressortir les couples (de la turbine ou du compresseur).



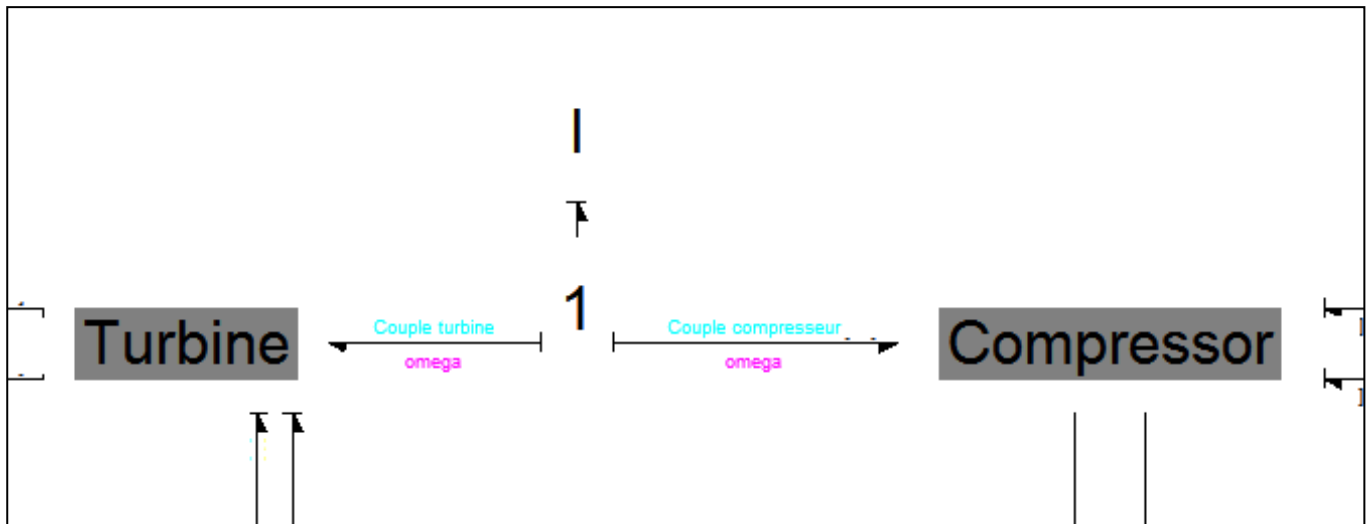


FIGURE 30 - LIAISON COMPRESSEUR TURBINE

### Résultats :

Pour une raison que nous n'avons pas réussi à identifier, le logiciel MS1 refuse de calculer nos représentations de turbine et compresseur. L'étape d'assemblage (vérification des incohérences de représentation) se déroule bien, cependant on ne peut aller plus loin dans la phase de simulation et de comparaison avec le modèle Dymola, le calcul étant impossible.

## F. CABINE

La cabine est modélisée comme un volume (élément FC) auquel sera liée en sortie la valve trois. La valve est en sortie de CAU. Des détecteurs sont ajoutés afin de pouvoir visualiser la pression et la température dans la cabine.

### Mise en équation :

Il faudra définir les conditions initiales sur l'énergie et la masse :  $U_0$  et  $m_0$ . Celles-ci sont définies dans l'annexe E.6, ainsi que les constantes indispensables aux calculs.

(Eq.Cab1)  $T = \frac{U}{m * C_p}$

(Eq.Cab2)  $P = \frac{m * r}{V} * T$

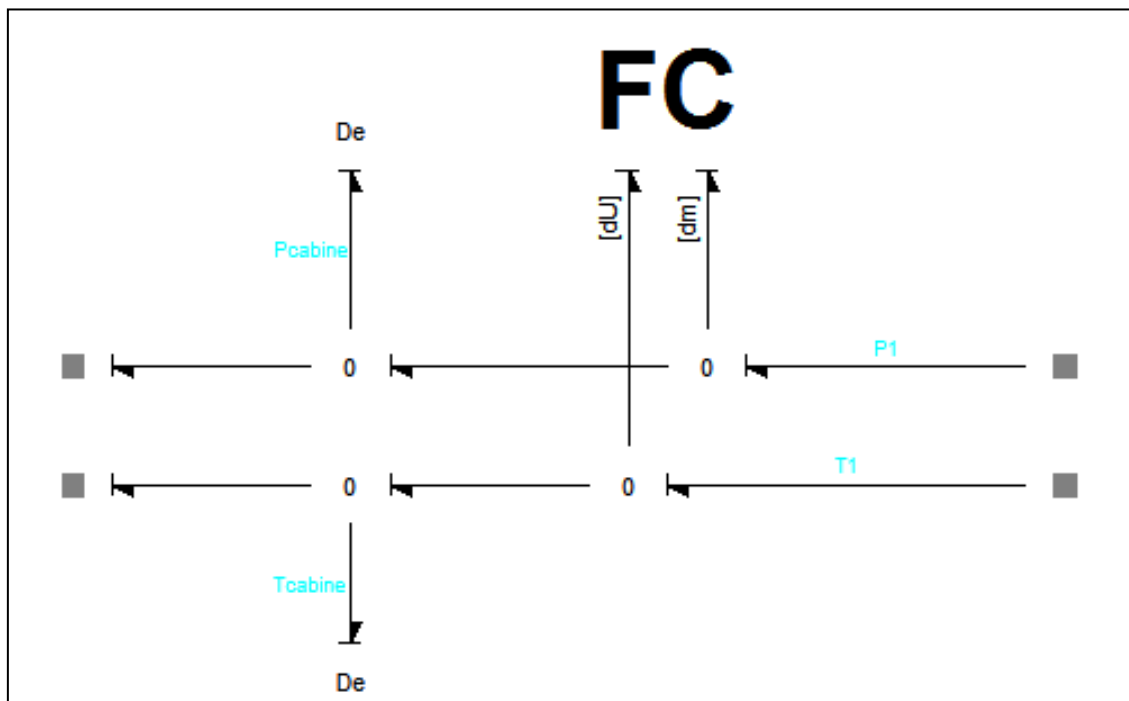


FIGURE 31 - MODELE BOND GRAPH DE LA CABINE

## IV. ANALYSE STRUCTURELLE

### 1. PRINCIPE DE L'ANALYSE STRUCTURELLE

Afin de dimensionner les composants d'un système, il peut être possible d'effectuer une inversion de modèle Bond Graph, c'est-à-dire inverser les entrées et sorties « naturelles » du système afin de déterminer l'entrée de commande à imposer au système pour obtenir les sorties spécifiées. Cependant, tous les modèles Bond Graph ne sont pas inversibles. L'objectif de l'analyse structurelle est de vérifier trois critères portant sur l'architecture, puis sur les phénomènes et enfin sur les paramètres du modèle.

Les trois critères à vérifier peuvent être énoncés de la façon suivante [B5] :

Critère 1. Si la représentation bond graph acausale considérée ne possède pas d'ensemble de lignes de puissance E/S disjointes, alors le modèle n'est pas inversible.

Critère 2. Si la représentation bond graph causale considérée ne possède pas d'ensemble de chemins causaux E/S disjoints, alors le modèle n'est pas inversible.

Critère 3. Si, quel que soit l'ensemble de lignes de puissance E/S disjointes choisi et quelles que soient les affectations causales retenues pour la représentation bond graph bicausale, une structure de jonction non résoluble apparaît, le modèle n'est alors pas inversible.

Chaque critère doit être rempli avant de pouvoir vérifier le suivant, si les trois critères sont vérifiés alors le modèle est inversible et l'étude peut se poursuivre.

### 2. DEFINITION DES VARIABLES D'ENTREE ET DE SORTIE

Dans le cas de l'ECS, l'objectif du système est d'obtenir dans la cabine un air à pression et température données pour assurer le confort des passagers et du personnel de bord. Les sorties considérées sont donc ces valeurs. Afin d'assurer cela, deux des trois valves dans le système sont soumises à des signaux de commande issus de boucles de régulation.

Dans l'étude de ce système, les valeurs d'entrée et sortie du système à considérer sont donc les suivantes :

- En entrée : deux signaux de commande, opening\_2, opening\_3 ;
- En sortie : la pression et la température de l'air admis dans la cabine.

Il existe donc deux couples d'entrées/sorties dans ce modèle.

Remarque : Les entrées étant des signaux, ils ne sont pas portés directement par des liens de puissance. Ces signaux sont dans les deux cas imposés à un élément FR en causalité telle que les flux  $y$  sont calculés à partir des efforts et du signal. Les quatre flux issus de ces éléments portent

donc le signal d'entrée. On peut donc considérer comme entrée le débit massique ou le débit d'enthalpie massique issue de ces FR.

### 3. VERIFICATION DES CRITERES D'INVERSIBILITE

#### A. PREMIER CRITERE

On rappelle que le premier critère est le suivant : « Si la représentation bond graph acausale considérée ne possède pas d'ensemble de lignes de puissance E/S disjointes, alors le modèle n'est pas inversible. »

Les lignes de puissance peuvent être définies de la manière suivante ([B5]) :

« Sur un modèle bond graph acausal, une ligne de puissance entre deux éléments est une série de liens bond graph et d'éléments multiports connectant ces deux éléments. Cette ligne matérialise sur la représentation bond graph l'acheminement de l'énergie entre deux points du système. Mathématiquement, elle est constituée d'une série de puissances mises en relation par les lois du modèle et dans laquelle une même puissance ne peut apparaître qu'une seule fois. »

Le logiciel MS1 dispose d'un outil de calcul des différentes lignes de puissance existant dans le modèle pour des vecteurs d'entrée et de sortie donnés, cependant ce dispositif n'est pas toujours fiable et il est préférable de vérifier ces résultats. De plus, pour un système complexe contenant un grand nombre de variables et de liens, il arrive que le logiciel n'arrive pas du tout à calculer, et c'est le cas sur le modèle de l'ECS. Les liens de puissance sont donc cherchés *à la main*.

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente un couple de liens de puissance entrée/sortie disjointes, seule la partie du modèle concernée est représentée. Il existe d'autres couples de liens de puissance disjointes, certains sont indiqués en annexe G.

Le premier critère d'inversion est donc vérifié.

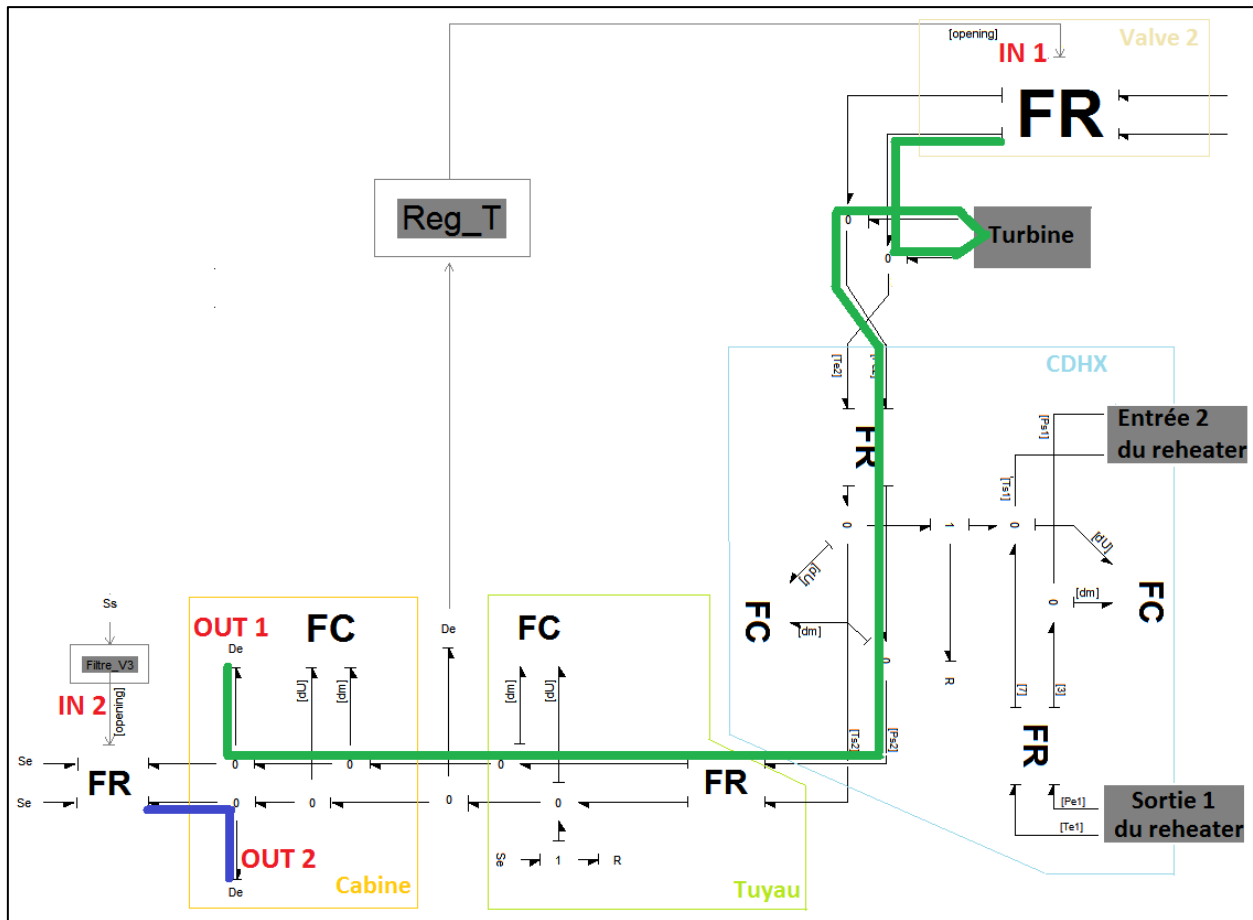


FIGURE 32 - PREMIER COUPLE DE LIGNES DE PUISSANCE DISJOINTES

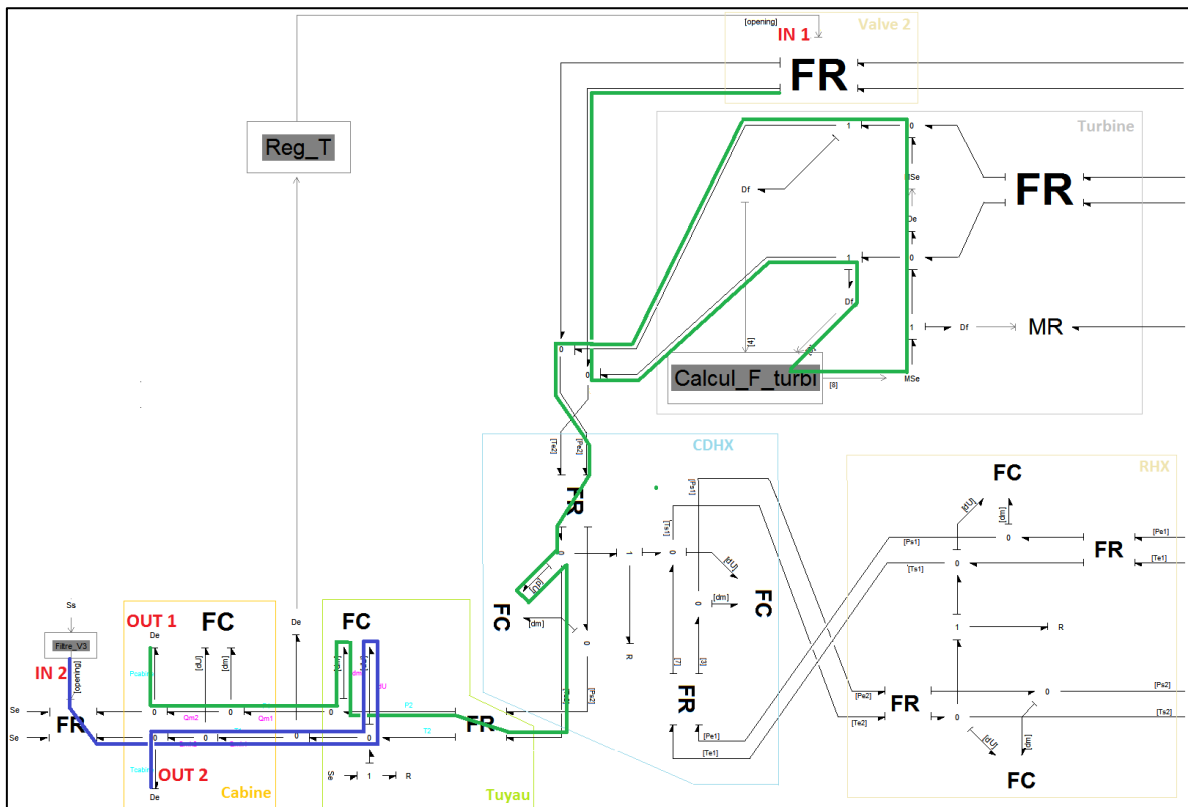


FIGURE 33 - COUPLE DE CHEMINS CAUSAUX DISJOINTS

## B. SECOND CRITERE

On rappelle que le second critère est le suivant : « Si la représentation bond graph causale considérée ne possède pas d'ensemble de chemins causaux E/S disjoints, alors le modèle n'est pas inversible. »

Les chemins causaux peuvent être définis de la manière suivante ([B5]) :

« Sur un modèle bond graph causal, un chemin causal est une suite ordonnée de variables (d'effort et/ou de flux) mises en relation les unes aux autres par les équations du modèle. L'ordonnement de cette suite est conforme à la causalité du modèle. »

Le logiciel MS1 permet de calculer les chemins causaux du système de manière robuste. Cependant, pour les modèles plus complexes mettant en jeu un grand nombre de variables et de liens comme ce modèle de l'ECS, le logiciel ne parvient pas à calculer. Ici encore, il faut donc réaliser l'analyse *à la main*. Pour cette recherche, il faut parvenir à trouver un ensemble de chemins causaux permettant de relier toutes les entrées et toutes les sorties et n'ayant aucune variable en commun. De plus, il est important de rechercher des chemins causaux d'ordre et de longueur minimale.

Définitions ([B2] et [B5]):

- Dans un Bond Graph en causalité intégrale préférentielle comportant des éléments C et I en causalité intégrale et dérivée, la longueur généralisée d'un chemin causal est définie par :

$$lg = [\text{nombre}(I \text{ et } C \text{ en intégrale traversés}) - \text{nombre}(I \text{ et } C \text{ en dérivée traversés}) + 1 \text{ si le point d'arrivée est un } I \text{ ou un } C \text{ en intégrale}]$$

- L'ordre d'un système est le nombre d'éléments C ou I traversés en causalité intégrale.

Il existe de nombreux chemins causaux possibles entre les différentes entrée et sortie. Cependant, avec comme contrainte d'obtenir un ordre et une longueur aussi petits que possible, cela limite les possibilités. On recherche tous les chemins causaux entre l'entrée « IN 2 » (opening de la troisième valve) et les sorties (pression et température de cabine) et les chemins causaux issus de « IN 1 » (opening de la deuxième valve) passant par le moins d'éléments FC possible.

L'ordre minimal des chemins causaux trouvés en partant du signal IN1 (respectivement IN2) est de deux (respectivement un). Parmi ces chemins, on trouve différents couples disjoints permettant de rejoindre les deux entrées et deux sorties. La Figure 33 présente l'un de ces couples, correspondant aux couples de lignes de puissance de la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** D'autres couples sont indiqués en annexe G.

Le second critère est donc vérifié.

## C. TROISIEME CRITERE

On rappelle que le troisième critère est le suivant : « Si, quel que soit l'ensemble de lignes de puissance E/S disjointes choisi et quelles que soient les affectations causales retenues pour la représentation bond graph bicausale, une structure de jonction non résoluble apparaît, le modèle n'est alors pas inversible. »

La démarche est la suivante : on choisit l'un des ensembles de lignes de puissance disjointes et un couple de chemins causaux E/S disjoints, puis l'on remplace les détecteurs d'efforts par des double-sources et en théorie les sources par des double-détecteurs. Comme ici les entrées sont des signaux, on remplace la source de ce signal (issu d'une boucle de régulation) par un détecteur simple de source. On propage ensuite la bicausalité le long des lignes de puissance choisies et enfin sur tout le Bond Graph en respectant les règles de causalité habituelles ([B5] et [B8]). Une fois le modèle bicausal obtenu, il faut vérifier qu'il n'existe pas de structure non résoluble. Soit d'après [B5] :

*« En pratique, il suffira généralement de détecter la présence de boucle causale (chemin causal se refermant sur lui même), de vérifier que cette boucle ne soit pas algébrique (pas d'intégration le long de cette boucle) et si c'est le cas, que son gain ne soit pas alors unitaire. Cependant, ce critère ne fournit encore qu'une condition nécessaire car il faut ensuite vérifier que les lois constitutives des éléments touchés par l'inversion (éléments traversés par la bicausalité ou dont la causalité change par rapport à la représentation causale) soient effectivement inversibles. »*

Pour le couple de lignes de puissance choisi (Figure 32) et les chemins causaux disjoints associés (Figure 33), le modèle bicausal obtenu est représenté sur la Figure 35. **Erreur ! Source du renvoi introuvable..** Seule la partie du modèle affectée par la bicausalité (en rouge) est représentée, les causalités sur le reste du modèle restent inchangées. Il est à noter que d'après ces causalités, il apparaît nécessaire de modifier dans la turbine un détecteur de flux en double détecteur et une source d'effort modulée en double source modulée (corrections en vert sur la Figure 35).

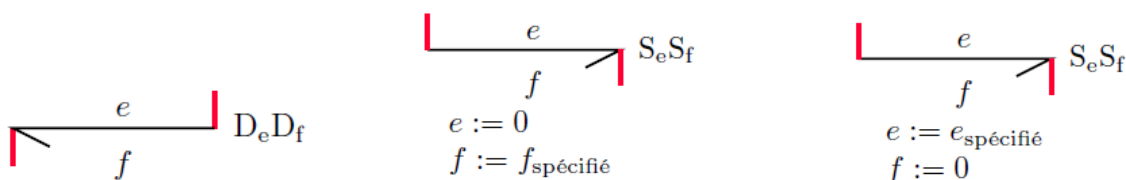
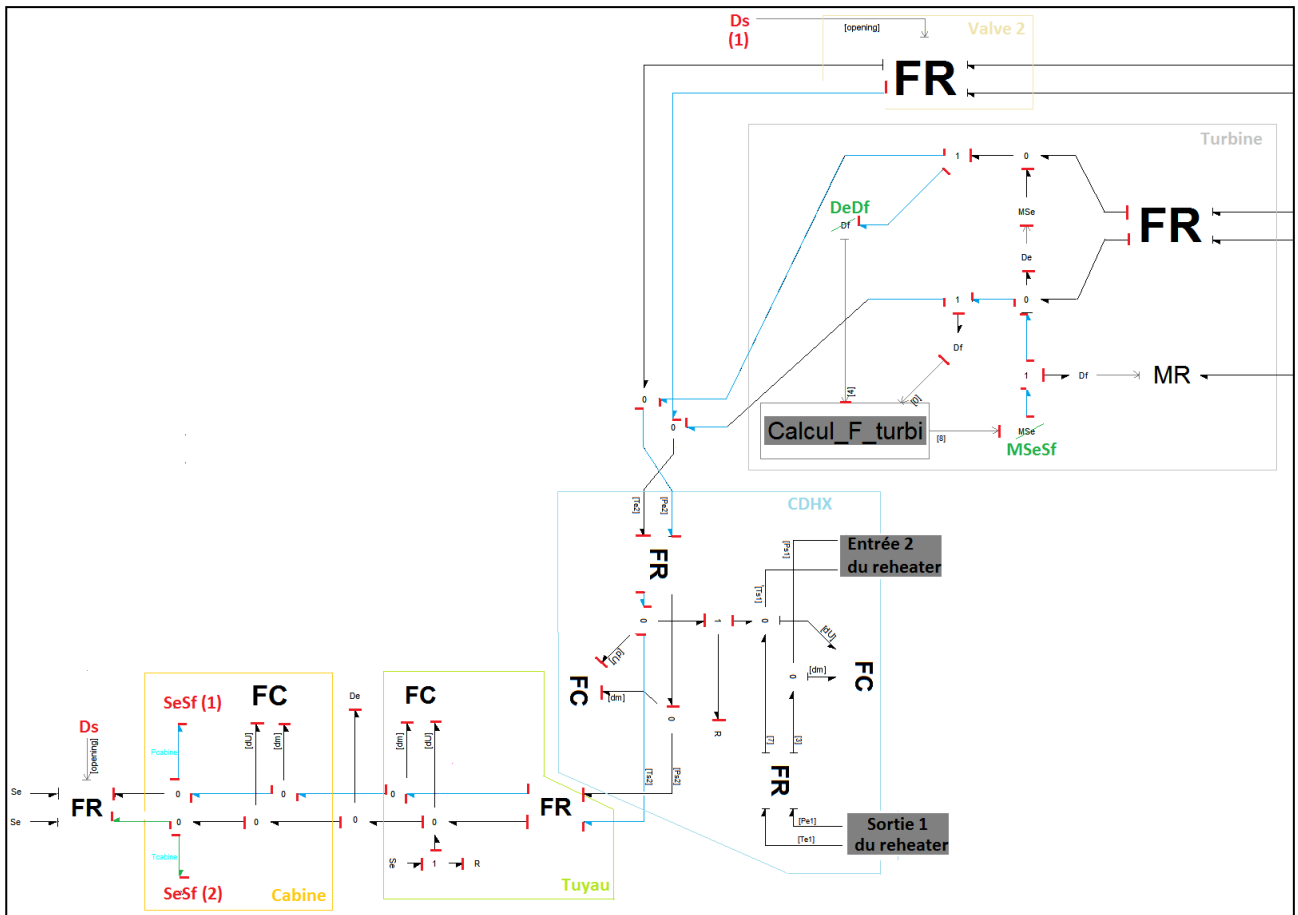


FIGURE 34 - BICAUSALITE DES DOUBLE-DETECTEURS ET DOUBLE-SOURCES ([B5])



**FIGURE 35 - AFFECTATION DE LA BICAUSALITE SUIVANT LE COUPLE DE LIGNES DE PUISSANCE CHOISI ET LES CHEMINS CAUSAUX ASSOCIES (FIGURE 32 ET FIGURE 33)**

On recherche sur ce modèle l'existence de boucles causales non résolubles. On rappelle qu'une boucle causale est un chemin causal fermé entre deux éléments de type R, C ou I, sans liens parcourus en suivant la même variable plus d'une fois [B2]. On part donc d'une variable de puissance en sortie d'élément FR et on suit un chemin causal jusqu'à revenir sur cette même variable. Pour vérifier la solubilité de la boucle, on met ensuite en équation la variable choisie en fonction des autres variables de puissance et on vérifie que l'équation obtenue est résoluble.



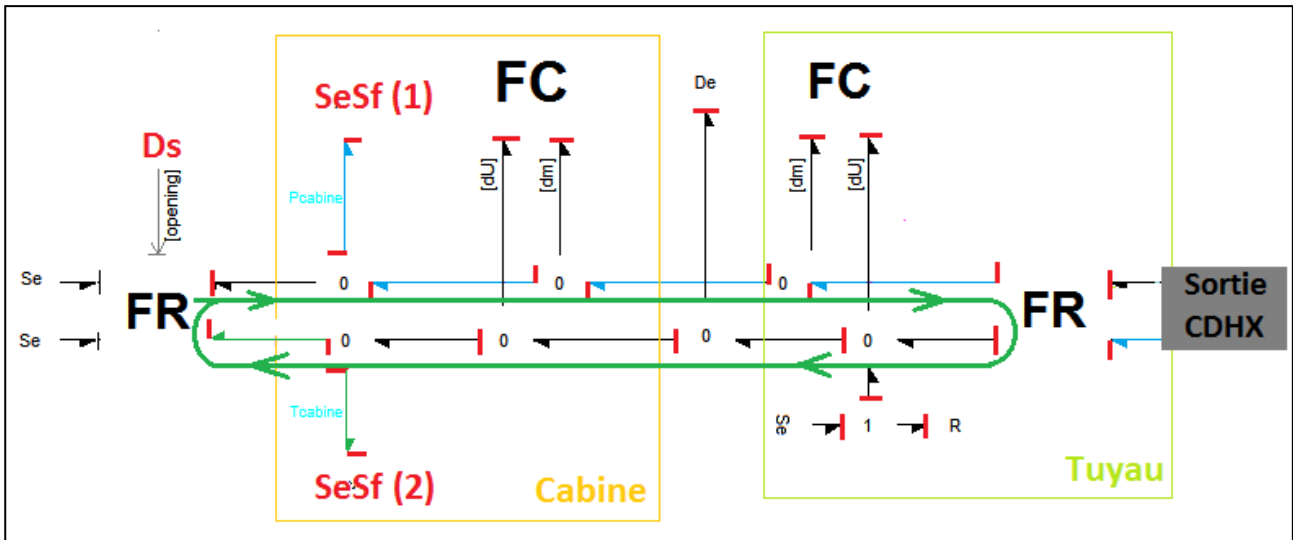


FIGURE 36 - BOUCLE CAUSALE ETUDIEE (VERT)

Dans un premier temps, on choisit comme variable le débit massique en entrée de valve 3. On obtient donc l'équation suivante :

$$qm_{1v3} = \frac{\frac{1}{CpT_2} \left( qmh_{se} + \frac{dU_{ca}}{dt} + \frac{dU_{tuy}}{dt} - qm_{se} \right) - \frac{dm_{tuy}}{dt} - \frac{dm_{ca}}{dt} - qm_{sesf}}{1 - \frac{T_{1v3}}{T_{2tuy}}}$$

Or la température d'entrée  $T_{1v3}$  de la valve 3 est égale à celle de sortie  $T_{2tuy}$  du tuyau. Par conséquent le dénominateur de cette expression est nul, cette équation n'est pas résoluble. Pour le couple de lignes de puissance disjointes choisi et les chemins causaux associés on trouve donc au moins une boucle causale non résoluble. Ce choix n'est donc pas adapté pour une inversion de modèle. Il nous aurait fallu vérifier les autres couples, cependant par manque de temps nous n'avons pas pu explorer ces autres possibilités.

## CONCLUSION

Le projet MODRIO dans lequel s'inscrit notre sujet a pour objectif d'étendre les environnements de modélisation et de simulation de systèmes complexes. Le but principal de cette étude est d'accroître la sécurité et la performance des systèmes. De nombreux industriels et laboratoires travaillent ensemble dans le but de profiter au mieux de tous les avantages que ce projet peut apporter.

Travailler au sein d'un projet auquel participent de grandes entreprises nous a d'autant plus motivé connaissant les enjeux qui y sont liés. En adaptant le système, représenté sur MODELICA, sur le logiciel MS1, nous avons essayé de proposer à notre industriel une inversion de modèle bien plus simple à mettre en place. Tout l'enjeu de notre projet a été de simplifier la méthode utilisée à l'heure actuelle par Dassault Aviation et ses entreprises partenaires.

Par la suite notre modèle pourrait servir d'appui dans la modélisation de nombreux autres systèmes complexes utilisés dans l'industrie actuelle. Par conséquent nous avons prêté une attention toute particulière à répondre au mieux à l'objectif qui nous a été fixé. Travailler dans un domaine tel que l'aéronautique nous pousse à être rigoureux dans nos résultats. En effet dans ce type d'activité, comme dans de nombreux autres, le risque autorisé est presque nul.

Bien qu'en cette fin de projet nous ne soyons pas parvenus à fournir des représentations exactes des composants, nous avons néanmoins réussi à mettre en place un modèle permettant une analyse structurelle. Nous mettons un point d'honneur à aborder cette dernière partie du sujet qui nous semblait intéressante à aborder. La complexité du système et des logiciels utilisés a ralenti notre progression tout au long du sujet. Cependant, l'aide de nos professeurs encadrant nous a permis d'avancer plus vite dans la réalisation de nos tâches et plus particulièrement sur les points complexes auxquels nous nous trouvions parfois confrontés.