

**EDF R&D**

SIMULATION ET TRAITEMENT DE L'INFORMATION POUR L'EXPLOITATION DES SYSTEMES DE PRODUCTION

FONCTIONNEMENT ET CONDUITE

6 quai Watier - 78401 CHATOU CEDEX, +33 (1) 30 87 79 46

9 janvier 2013

Projet MODRIO - Rapport de Master Recherche intitulé "Modélisation et analyse structurelle du modèle SRI d'une centrale nucléaire"

Li WANG

INSA Lyon - Laboratoire Ampère

Audrey JARDIN

H-P1C-2012-02601-FR**1.0**

Le projet européen MODRIO (Model Driven Physical Systems Operation) a pour objectif d'étendre les environnements de modélisation et de simulation, de la conception à l'exploitation des systèmes physiques. Basés sur des standards logiciels ouverts (langage Modelica, standard d'interopérabilité FMI, ...), les développements entrepris permettront d'offrir à terme des outils utilisables tout au long du cycle de vie des systèmes étudiés et d'améliorer de ce fait leur sûreté, leur disponibilité ainsi que leurs performances économiques et environnementales.

EDF R&D pilote le projet (chef de projet : Daniel BOUSKELA) et participe, entre autres, au niveau du Work Package 6 sur les services d'aide à la modélisation et à la simulation. L'un des objectifs de ce Work Package est notamment d'aider à la mise au point et à l'utilisation de modèles en améliorant le diagnostic des outils utilisés pour les simuler. L'idée principale repose sur une analyse des modèles non plus seulement mathématique mais aussi physique grâce à l'application de techniques issues du langage bond graph. En effet, la difficulté actuelle réside dans l'interprétation de diagnostics qui sont posés après simplification symbolique des équations et qui n'ont souvent plus grand rapport avec le problème physique initial sitôt que le modèle est de dimension industrielle.

En préparation du démarrage du projet, Li WANG (INSA Lyon) a réalisé un stage de Master Recherche d'une durée de 6 mois et intitulé : "Modélisation et analyse structurelle du modèle SRI d'une centrale nucléaire".

L'objectif était de réaliser une étude préliminaire afin de voir dans quelle mesure les méthodes bond graph d'analyse développées par le laboratoire AMPERE (CNRS/INSA Lyon) pouvaient être applicables sur un modèle thermohydraulique EDF.

Le présent document capitalise la note d'opportunité, les supports de la soutenance ainsi que le rapport de stage.

EDF R&D Projet MODRIO - Rapport de Master Recherche intitulé "Modélisation et analyse structurelle du modèle SRI d'une centrale nucléaire" **H-P1C-2012-02601-FR**
Version 1.0

Circuit de validation

Auteur	Li WANG	07/01/13	
Vérificateur	Daniel BOUSKELA	07/01/13	
Approbateur	Corinne PUJOL	09/01/13	

Pré-diffusion

Code Affaire P114U0/EL2

EDF R&D Projet MODRIO - Rapport de Master Recherche intitulé "Modélisation et analyse structurelle du modèle SRI d'une centrale nucléaire" **H-P1C-2012-02601-FR**
Version 1.0

Liste de diffusion

Groupe destinataire

P1-STEP Chefs	
P1-STEP Chefs groupe	

EDF R&D	Projet MODRIO - Rapport de Master Recherche intitulé "Modélisation et analyse structurelle du modèle SRI d'une centrale nucléaire"	H-P1C-2012-02601-FR Version 1.0
--------------------	--	--

AVERTISSEMENT / CAUTION

L'accès à ce document, ainsi que son utilisation, sont strictement limités aux personnes expressément habilitées par EDF.

EDF ne pourra être tenu responsable, au titre d'une action en responsabilité contractuelle, en responsabilité délictuelle ou de toute autre action, de tout dommage direct ou indirect, ou de quelque nature qu'il soit, ou de tout préjudice, notamment, de nature financière ou commerciale, résultant de l'utilisation d'une quelconque information contenue dans ce document.

Les données et informations contenues dans ce document sont fournies "en l'état" sans aucune garantie expresse ou tacite de quelque nature que ce soit.

Toute modification, reproduction, extraction d'éléments, réutilisation de tout ou partie de ce document sans autorisation préalable écrite d'EDF ainsi que toute diffusion externe à EDF du présent document ou des informations qu'il contient est strictement interdite sous peine de sanctions.

The access to this document and its use are strictly limited to the persons expressly authorized to do so by EDF.

EDF shall not be deemed liable as a consequence of any action, for any direct or indirect damage, including, among others, commercial or financial loss arising from the use of any information contained in this document.

This document and the information contained therein are provided "as are" without any warranty of any kind, either expressed or implied.

Any total or partial modification, reproduction, new use, distribution or extraction of elements of this document or its content, without the express and prior written consent of EDF is strictly forbidden. Failure to comply to the above provisions will expose to sanctions.

EDF R&D	Projet MODRIO - Rapport de Master Recherche intitulé "Modélisation et analyse structurelle du modèle SRI d'une centrale nucléaire"	H-P1C-2012-02601-FR Version 1.0
--------------------	--	---

Synthèse

Le projet européen MODRIO (Model Driven Physical Systems Operation) a pour objectif d'étendre les environnements de modélisation et de simulation, de la conception à l'exploitation des systèmes physiques. Basés sur des standards logiciels ouverts (langage Modelica, standard d'interopérabilité FMI, ...), les développements entrepris permettront d'offrir à terme des outils utilisables tout au long du cycle de vie des systèmes étudiés et d'améliorer de ce fait leur sûreté, leur disponibilité ainsi que leurs performances économiques et environnementales.

EDF R&D pilote le projet (chef de projet : Daniel BOUSKELA) et participe, entre autres, au niveau du Work Package 6 sur les services d'aide à la modélisation et à la simulation. L'un des objectifs de ce Work Package est notamment d'aider à la mise au point et à l'utilisation de modèles en améliorant le diagnostic des outils utilisés pour les simuler. L'idée principale repose sur une analyse des modèles non plus seulement mathématique mais aussi physique grâce à l'application de techniques issues du langage bond graph. En effet, la difficulté actuelle réside dans l'interprétation de diagnostics qui sont posés après simplification symbolique des équations et qui n'ont souvent plus grand rapport avec le problème physique initial sitôt que le modèle est de dimension industrielle.

En préparation du démarrage du projet, Li WANG (INSA Lyon) a réalisé un stage de Master Recherche d'une durée de 6 mois et intitulé : "*Modélisation et analyse structurelle du modèle SRI d'une centrale nucléaire*".

L'objectif était de réaliser une étude préliminaire afin de voir dans quelle mesure les méthodes bond graph d'analyse développées par le laboratoire AMPERE (CNRS/INSA Lyon) pouvaient être applicables sur un modèle thermohydraulique EDF.

Les travaux réalisés ont notamment participé :

- à la construction d'un modèle bond graph du sous-système SRI ;
- et à une première analyse structurelle locale des principaux composants du SRI (bâche, pompe, échangeur, ...).

Le présent document capitalise la note d'opportunité justifiant la collaboration EDF/AMPERE, les supports de la soutenance ainsi que le rapport de stage qui ont ainsi été produits.

Les travaux seront poursuivis dans le cadre du projet MODRIO pour finaliser l'analyse structurelle globale du modèle SRI et déterminer l'applicabilité de la méthode d'analyse bond graph à un modèle Modelica. L'analyse structurelle sera étudiée dans un premier temps comme une aide à la détermination des conditions d'état stationnaire d'un système par inversion. D'autres applications pourront toutefois être investiguées comme l'aide au recalage des modèles à partir de mesures effectuées sur site ou la détermination d'entrées provocant des sorties non désirables.

EDF R&D	Projet MODRIO - Rapport de Master Recherche intitulé "Modélisation et analyse structurelle du modèle SRI d'une centrale nucléaire"	H-P1C-2012-02601-FR Version 1.0
--------------------	--	---

Sommaire

PAGE DE GARDE	I
CIRCUIT DE VALIDATION	II
PRE-DIFFUSION.....	II
LISTE DE DIFFUSION	III
AVERTISSEMENT / CAUTION	1
SYNTHESE	2
SOMMAIRE.....	3
1. NOTE D'OPPORTUNITE.....	4
2. SUPPORTS DE LA SOUTENANCE	9
3. RAPPORT DE STAGE	24

EDF R&D Projet MODRIO - Rapport de Master Recherche intitulé "Modélisation et analyse structurelle du modèle SRI d'une centrale nucléaire"	H-P1C-2012-02601-FR Version 1.0
--	--

1. Note d'opportunité

	<p>Projet Support à la modélisation de la Centrale Numérique (P114U)</p> <p>Note d'opportunité pour la collaboration EDF R&D – Laboratoire AMPERE</p> <p>Analyse structurelle de modèles pour déterminer les conditions d'état stationnaire par approche inverse</p>
NOTE D'OPPORTUNITE - COLLABORATION ENTRE EDF ET LE CNRS	
1. PREAMBULE	
<p>Le laboratoire AMPERE, entité mixte du CNRS, a engagé un étudiant en Master dont il assure l'encadrement et le soutien scientifique, pour la réalisation d'une étude relative à la « modélisation et à l'analyse structurelle de modèles en vue de la détermination des conditions d'un état stationnaire par approche inverse » (d'après l'« Etude »). EDF souhaite collaborer à la réalisation de l'Etude pour voir dans quelle mesure la méthodologie développée peut aider à rendre plus systématique la procédure de calcul d'un état stationnaire utilisée actuellement pour ses modèles Modelica. A ce titre, EDF fournit un cas-test industriel, celui du SRI qui est un système de réfrigération de centrale nucléaire.</p> <p>Les Résultats de l'Etude sont susceptibles d'être utilisés par les Parties, notamment dans le cadre du futur projet européen « MODRIO ».</p>	
<hr/> <small>© EDF 22.04.2009</small> 1/5	

EDF R&D	Projet MODRIO - Rapport de Master Recherche intitulé "Modélisation et analyse structurelle du modèle SRI d'une centrale nucléaire"	H-P1C-2012-02601-FR Version 1.0
--------------------	--	--



Projet Support à la modélisation de la Centrale Numérique (P114U)

Note d'opportunité pour la collaboration EDF R&D – Laboratoire AMPERE

Analyse structurelle de modèles pour déterminer les conditions d'état stationnaire par approche inverse

2. CONTEXTE

2.1. Motivations

Au cours de ces vingt dernières années, le Laboratoire AMPERE a développé une méthodologie pour dimensionner des systèmes mécatroniques sur critères énergétiques et dynamiques. Cette méthodologie est basée sur l'utilisation de modèles bond graph inverses et sur leur analyse structurelle physique pour aider le concepteur à bien poser son problème de dimensionnement.

Dans le domaine nucléaire et thermique, EDF est souvent amené à procéder à des calculs inverses pour :

- déterminer l'état initial de modèles dynamiques (initialisation pour prédire le comportement par exemple de transitoires sensibles);
- déterminer les valeurs des paramètres d'un modèle à partir d'un point de fonctionnement connu (calage pour se rapprocher de l'état réel du circuit);
- comparer des architectures pour satistaire un cahier des charges donné (pré-dimensionnement pour des études préalables de conception).

Actuellement, à EDF/R&D, cette inversion de modèles est rendue possible grâce au langage acausal Modelica : après avoir identifié les variables fixées et les variables à déterminer, le compilateur se charge d'organiser les équations pour construire de manière appropriée et automatique le modèle inverse adéquat.

Cependant, l'inversion de modèle reste une tâche délicate : la détermination des ensembles de variables à fixer et de variables à déterminer n'est pas si aisée et repose actuellement fortement sur l'expertise métier des modèles. Dans ce sens, la méthodologie développée par le Laboratoire AMPERE semble intéressante pour systématiser l'inversion de modèles et apporter un réel diagnostic sur les problématiques inverses. Cette méthodologie pourrait notamment aider l'ingénieur à analyser les degrés de liberté du système et les dépendances de certaines variables qui sont incompatibles avec une inversion donnée, et aboutir ainsi à un réel gain de temps au cours des études.

2.2. Objectifs

L'étude envisagée ici se focalise sur l'utilisation de modèles inverses pour déterminer un état initial. Cet état est un ensemble de valeurs prises par les variables d'état du système au démarrage de l'étude dynamique. Sa détermination est souvent un problème délicat car, en général, il n'est pas connu de manière directe mais par observation des sorties du système (i.e. par connaissance de certaines grandeurs mesurées qui ne sont pas nécessairement les variables d'état).

Dans le domaine nucléaire et thermique, l'état initial est en principe toujours stationnaire (i.e. les dérivées de toutes les variables d'état sont nulles). Il est obtenu en déterminant, par calcul inverse, les positions des actionneurs réglants et/ou les valeurs des conditions aux limites (e.g. pression, enthalpie, débit) à partir des valeurs caractérisant le point de fonctionnement de départ (e.g. niveau et pression dans un ballon, puissance nominale de l'installation, ...).



Projet Support à la modélisation de la Centrale Numérique (P114U)

Note d'opportunité pour la collaboration EDF R&D – Laboratoire AMPERE

Analyse structurelle de modèles pour déterminer les conditions d'état stationnaire par approche inverse

En pratique, les difficultés rencontrées sont alors les suivantes :

- déterminer quelles sont les variables à fixer dans le modèle et quelles sont celles à libérer. Ceci requiert un certain temps et fait appel à l'expertise métier de celui qui manipule le modèle ;
- obtenir un état qui est stationnaire (i.e. où les dérivées de toutes les variables sont nulles pendant toute la durée de la simulation tant qu'il n'y a pas d'entrée de perturbation).

L'Etude se propose de voir dans quelle mesure l'application de la méthodologie du Laboratoire AMPERE peut aider à améliorer cette procédure de détermination d'un état initial sur l'exemple du circuit SRI (Figure 1).

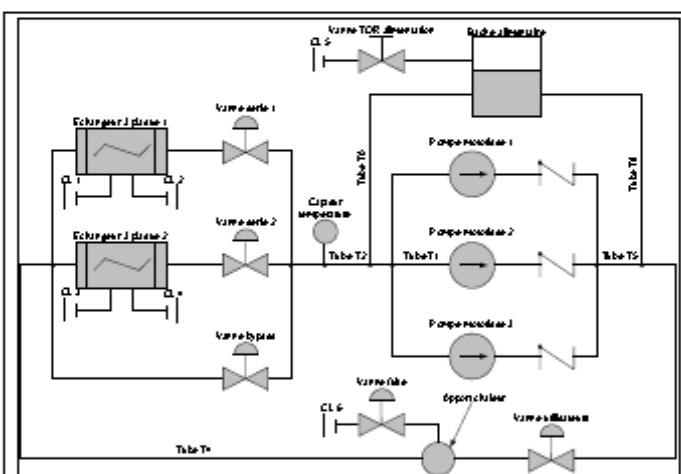


Figure 1 : Schéma de principe du circuit SRI

Le SRI (Système de Réfrigération Intermédiaire) d'une centrale nucléaire est en effet le cas-test retenu pour cette Etude car il est relativement illustratif des problèmes d'inversion de modèles rencontrés au sein d'EDF dans la mesure où il est complet et où il comprend à la fois une partie physique et une partie commande. Il reste toutefois relativement simple (la thermohydraulique est ici monophasique liquide) et présente l'avantage d'être un système relativement découplé de son environnement, où il n'y a pas à gérer de conditions aux limites complexes.

L'objectif ici est de calculer les entrées pour un état stationnaire spécifié du SRI, c'est-à-dire calculer la position de vannes réglantes pour obtenir des conditions de fonctionnement spécifiées en sortie des échangeurs. Un modèle complet du SRI a été développé en langage Modelica. Celui-ci a été validé complètement sous Dymola et partiellement sous Scicos. Le problème de détermination de l'état initial stationnaire reste cependant non complètement résolu puisque Dymola ne converge pas vers un état tout à fait stationnaire.

EDF R&D	Projet MODRIO - Rapport de Master Recherche intitulé "Modélisation et analyse structurelle du modèle SRI d'une centrale nucléaire"	H-P1C-2012-02601-FR Version 1.0
--------------------	--	--



Projet Support à la modélisation de la Centrale Numérique (P114U)

Note d'opportunité pour la collaboration EDF R&D – Laboratoire AMPERE

Analyse structurelle de modèles pour déterminer les conditions d'état stationnaire par approche inverse

3. DÉROULEMENT DE L'ETUDE

3.1. Programme de travail

Sur la base de la méthodologie d'inversion pour l'aide à la conception et au dimensionnement des systèmes développée par le Laboratoire AMPERE, l'étudiant de Master aura comme objectif :

- de mettre en place un modèle du SRI dans le langage bond graph ;
- de mettre en œuvre les phases d'analyse structurelle de la méthodologie pour étudier les possibilités d'inversion et les ensembles de variables de sortie qui peuvent être spécifiées pour déterminer, à partir d'un modèle inverse, les entrées du modèle compatibles avec un état stationnaire ;
- d'initier l'étude de faisabilité pour appliquer cette méthodologie à des modèles initialement écrits en langage Modelica.

L'étude effectuée au cours du Master constituera un travail préliminaire à une activité de recherche qui se poursuivra dans le cadre du projet européen ITEA2 MODRIO et qui pourra investiguer d'autres applications de la méthodologie telles que l'aide au recalage de modèles à partir de mesures effectuées sur site ou la détermination d'entrées provoquant des sorties non désirables.

3.2. Rôle de chacune des Parties

Le Laboratoire AMPERE se charge de la modélisation bond graph du SRI et des aspects théoriques liés à l'analyse structurelle physique de modèles.

EDF fournit toute la documentation nécessaire à la modélisation du SRI et apporte son expertise industrielle quant au fonctionnement du circuit et aux besoins d'analyse des modèles.

3.3. Livrables et planning

L'étude doit aboutir à :

- un modèle bond graph du SRI ;
- un rapport d'étude décrivant :
 - o le modèle bond graph du SRI ;
 - o son analyse structurelle en vue de la détermination d'un état stationnaire ;
 - o l'applicabilité de cette analyse sur le modèle Modelica du SRI (modèle fourni par EDF).

Pour ce faire, l'étudiant de Master sera encadré par le Laboratoire AMPERE du 02 avril 2012 au 30 septembre 2012.

EDF R&D	Projet MODRIO - Rapport de Master Recherche intitulé "Modélisation et analyse structurelle du modèle SRI d'une centrale nucléaire"	H-P1C-2012-02601-FR Version 1.0
--------------------	--	--



Projet Support à la modélisation de la Centrale Numérique (P114U)

Note d'opportunité pour la collaboration EDF R&D – Laboratoire AMPERE

Analyse structurelle de modèles pour déterminer les conditions d'état stationnaire par approche inverse

3.4. Remise du rapport

Le Laboratoire AMPERE transmet à EDF les documents produits dans le cadre du Master afin que le Comité technique (constitué de représentants du Laboratoire AMPERE et d'EDF) émette son avis.

4. MOYENS AFFECTÉS

Le Laboratoire AMPERE se charge de l'encadrement scientifique de l'étudiant en Master et lui fournit les moyens matériels nécessaires à la réalisation de l'Etude.

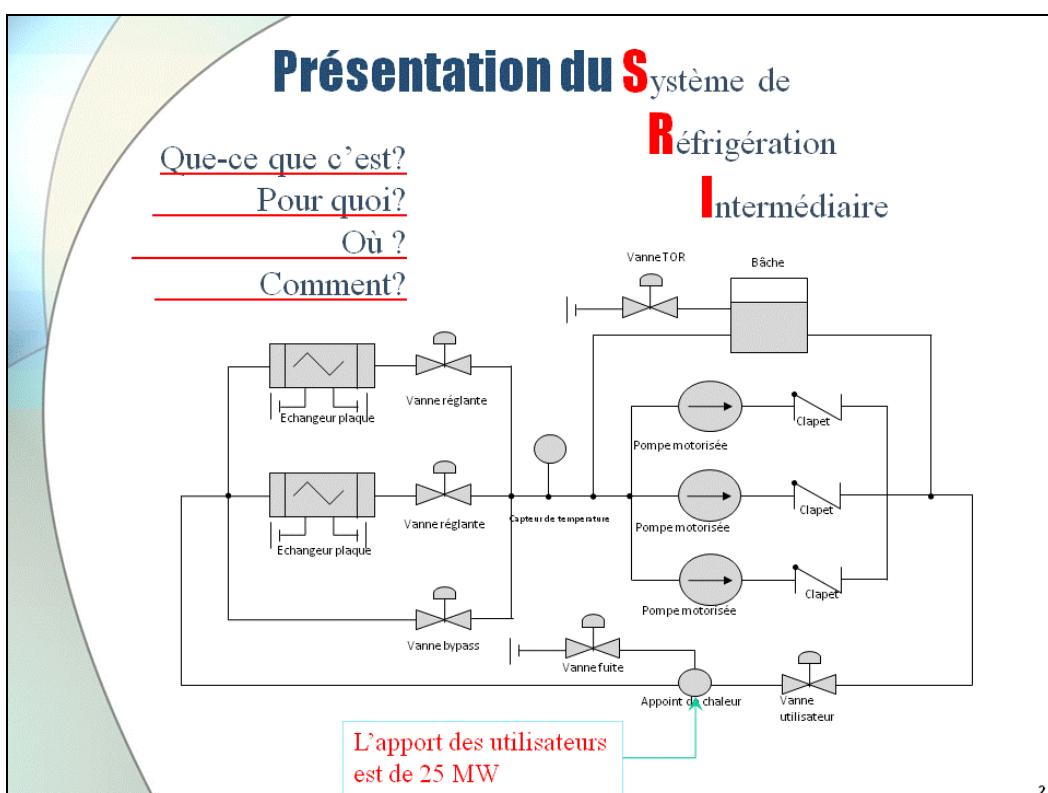
EDF suit le déroulement de l'Etude en participant régulièrement à des réunions d'avancement.

Chaque Partie supporte ses coûts de réalisation de l'Etude. En conséquence, il n'y a pas de contribution financière de la part d'EDF envers le Laboratoire AMPERE.

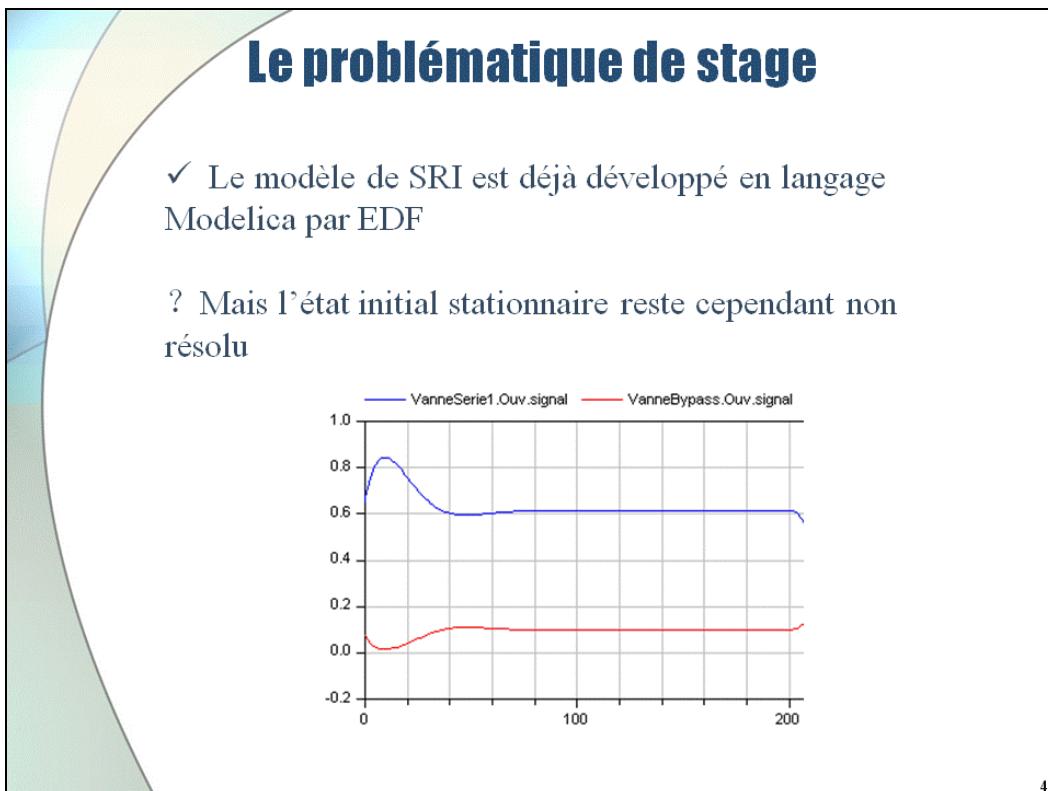
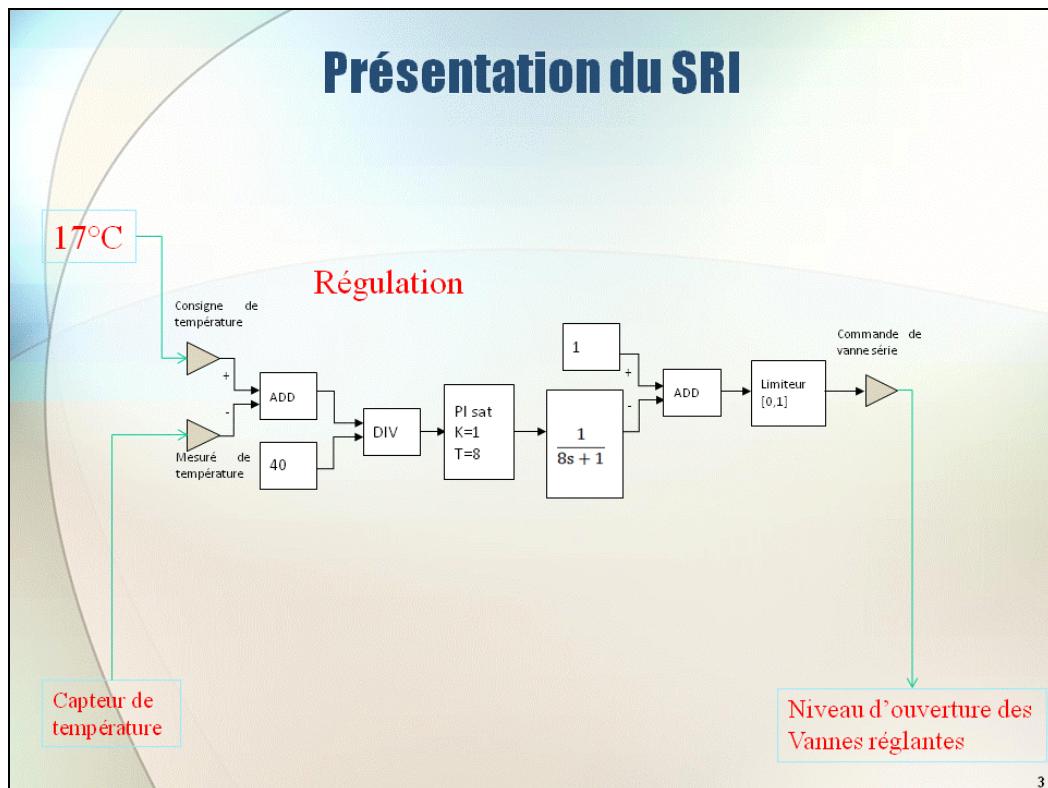
2. Supports de la soutenance



1



2



L'objectifs du stage

L'objectifs du stage:

- de mettre en place un modèle du SRI dans le langage bond graph, en utilisant le logiciel MS1 ;
- de mettre en œuvre la causalité par rapport aux propriétés physiques du système.
- de mettre en œuvre les phases d'analyse structurelle pour donner des précisions sur les ensembles compatibles de variables fixées et de variables à déterminer via les études de la causalité du modèle bond graph.

5

Présentation du stage

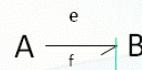
Partie I Etude bibliographique

Li WANG
13/09/2012

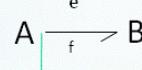
6

Concept du bond graph

Les variables généralisées et la causalité:

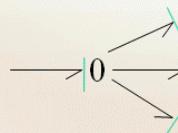


A impose un effort à B, B renvoie un flux à A

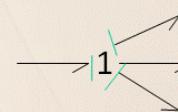


A impose un flux à B, B renvoie un effort à A

Les jonctions et leur règles de causalité:



Les efforts sont égaux et la somme des flux sont algébriquement nulle; 1 seul lien avec trait causal près de la jonction 0

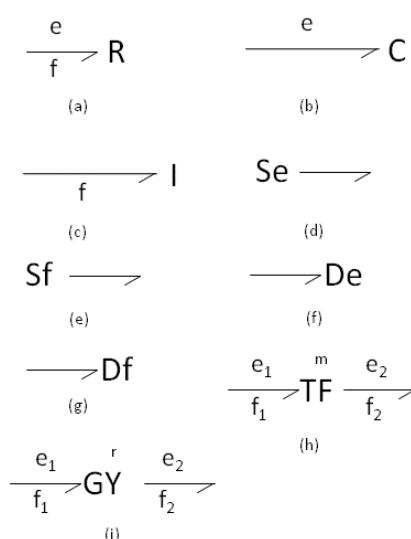


Les fluxs sont égaux et la somme des efforts sont algébriquement nulle; 1 seul lien sans trait causal près de la jonction 1

7

Concept du bond graph

Les neuf éléments principaux :



la source d'effort Se
la source de flux Sf
le détecteur De
le détecteur Df
le stockage potentiel C
le stockage inertiel I
la dissipation R
le transformateur TF
le gyrateur GY.

8

La procédure d'affectation de la causalité

- **SCAP** *Sequential causality assignment procedure*

- Affecter la causalité obligatoire aux sources, aux détecteurs et aux éléments R non inversibles et répercuter sur l'environnement en respectant les contraintes de causalité sur éléments de la structure de jonction;
- Affecter une causalité intégrale préférentielle aux éléments I et C si possible et répercuter sur l'environnement en respectant les contraintes de causalité sur éléments de la structure de jonction;
- Compléter la causalité sur les éléments R non affecté et propager en respectant les contraintes de causalité sur éléments de la structure de jonction;
- En cas de conflit sur une jonction, rechercher l'élément I ou C à la cause du conflit et lui affecter une causalité dérivée. Boucler avec l'étape précédente;

9

Modélisation bond graph du système hydraulique

En cas du fluide incompressible

$$E_I^* = \int_V \frac{1}{2} \rho v^2 dV = \int_0^l \frac{1}{2} \rho \frac{q^2}{A(x)} dx$$

Phénomène de stockage cinétique

$$\left\{ \begin{array}{l} I = \rho \int_0^l \frac{dx}{A(x)} \\ \Gamma = \frac{dE_I^*}{dq} = \rho \int_0^l \frac{dx}{A(x)} q = Iq \end{array} \right. \longrightarrow \boxed{V \text{ fixé}} \xrightarrow{v(x,t)}$$

$$\xrightarrow{} E_I(\Gamma) = \frac{1}{2} \frac{A\Gamma^2}{\rho l} \quad \xrightarrow{} \frac{d\Gamma}{dt} \xrightarrow{q} I: \rho \int_0^l \frac{dx}{A(x)}$$

10

Modélisation bond graph du système hydraulique

En cas du fluide faiblement compressible

Phénomène de stockage réversible d'énergie libre

$$dU = TdS - pdV + \mu dm$$

l'énergie libre $F = U - TS$

$$\frac{dF}{dt} = -p \frac{dV}{dt} + \mu \frac{dm}{dt}$$

$$\mu(V, m) = (\frac{\partial F}{\partial m})_{T,V}$$

$$-p(V, m) = (\frac{\partial F}{\partial V})_{T,m}$$

$\frac{\mu}{\frac{dm}{dt}} C \leftarrow \frac{-p}{\frac{dV}{dt}}$

11

Modélisation bond graph du système thermique

Phénomène de conduction thermique

Bond graph

$$\dot{S}_1 = \frac{-K_c(T_1 - T_2)}{T_1}$$

$$\dot{S}_2 = \frac{K_c(T_1 - T_2)}{T_2}$$

Pseudo-bond graph

$$\dot{Q} = K_c(T_1 - T_2)$$

12

Modélisation bond graph du système thermique

Phénomène dissipatif d'énergie sans génération d'entropie, élément R multiport associé

Application: Ecoulement d'un fluide dans une conduite

$$\begin{array}{l} \dot{m} = \frac{K_d A}{2} \frac{P_1}{\sqrt{T_1}}, \text{ si } p_2 < 0,5 p_1 \\ \dot{H} = \dot{m} h_1 = \dot{m} c_p T_1 \end{array} \quad \leftrightarrow \quad \begin{array}{c} P_1, T_1 \\ \dot{m}_1, \dot{H}_1 \end{array} \quad \boxed{\mathbb{R}} \quad \begin{array}{c} P_2, T_2 \\ \dot{m}_2, \dot{H}_2 \end{array}$$

R multi-port non-inversible !

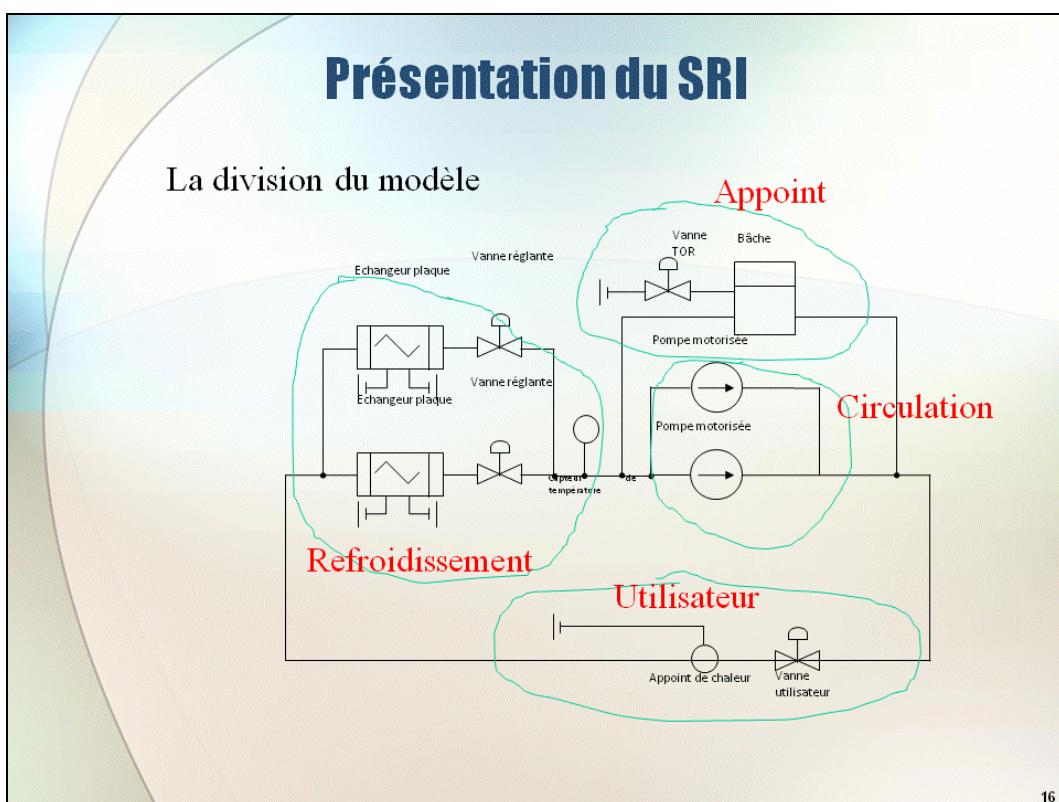
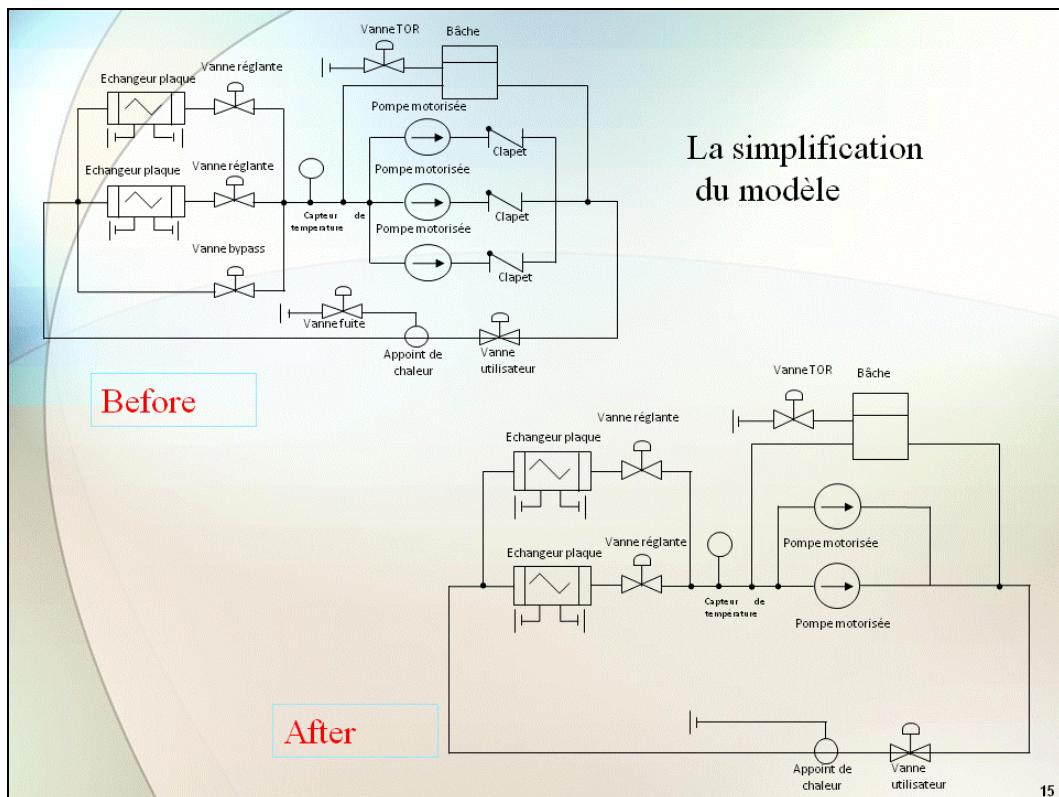
13

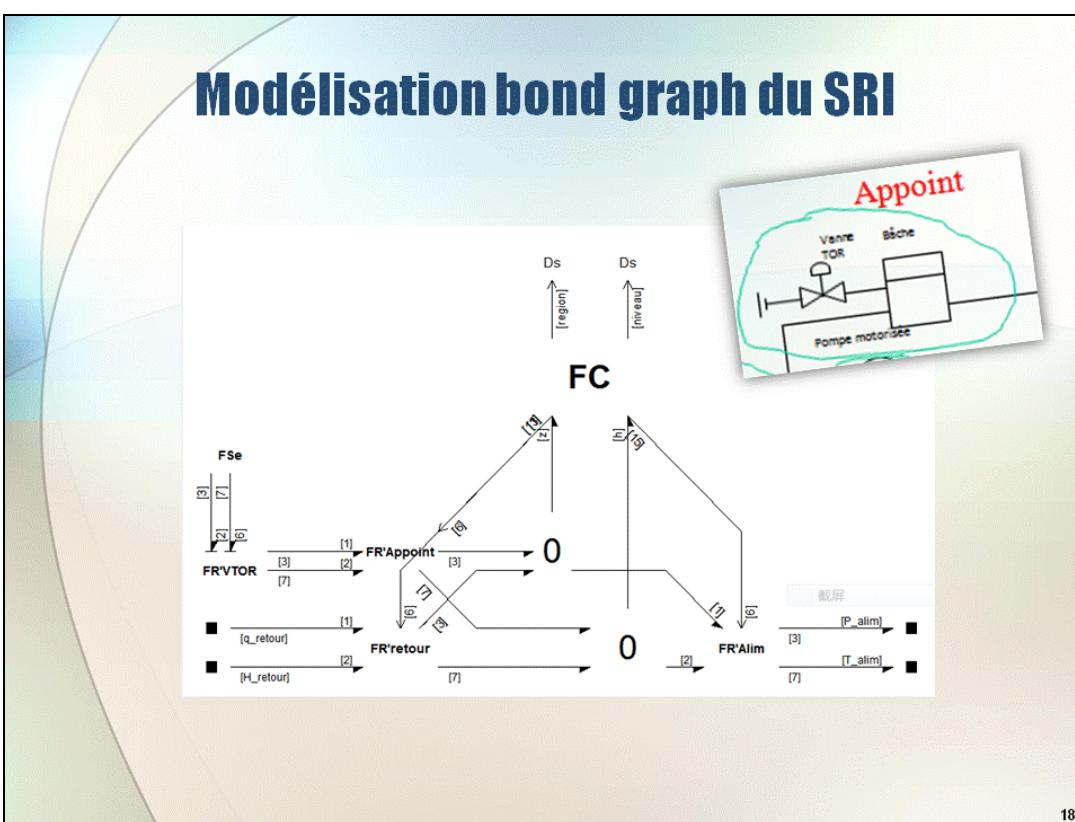
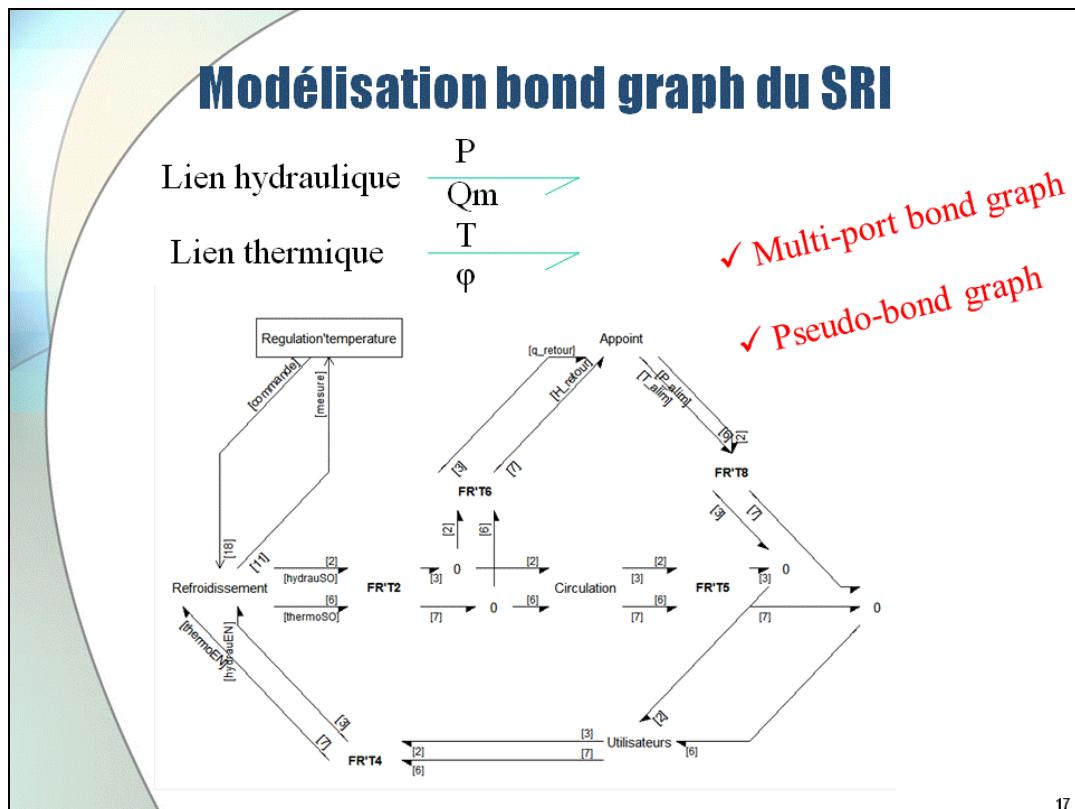
Présentation du stage

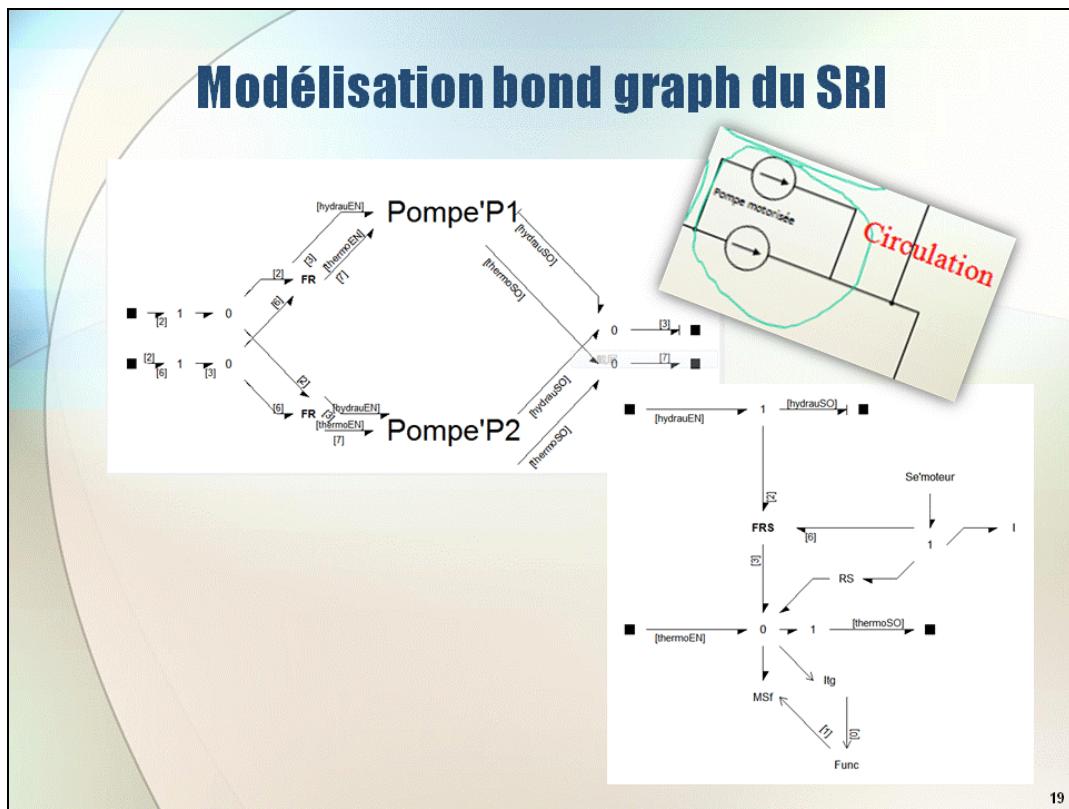
Partie II Les travaux effectués

Li WANG
13/09/2012

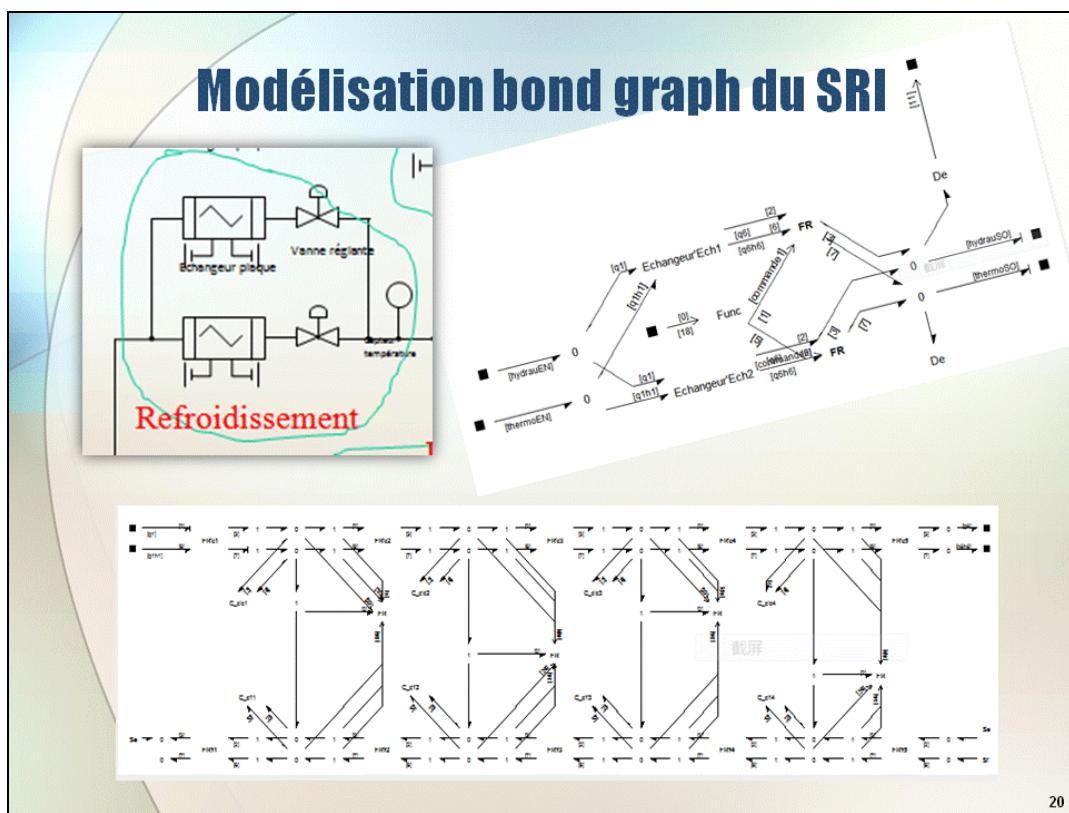
14



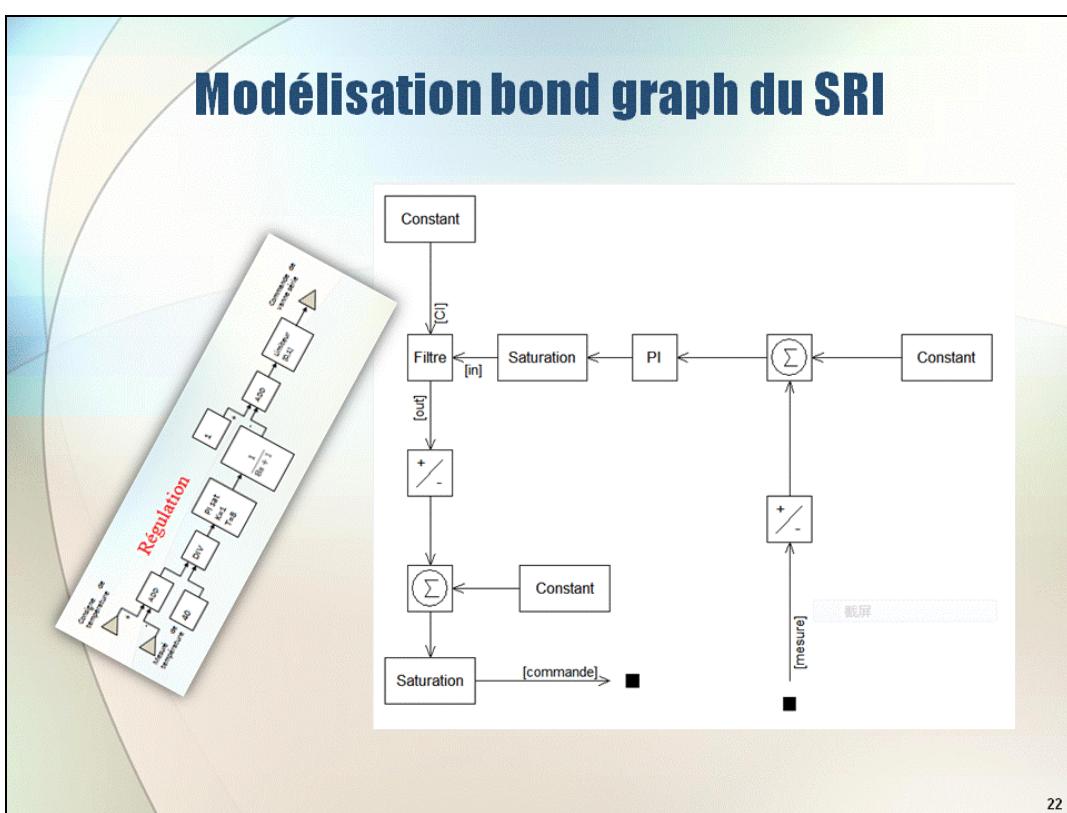
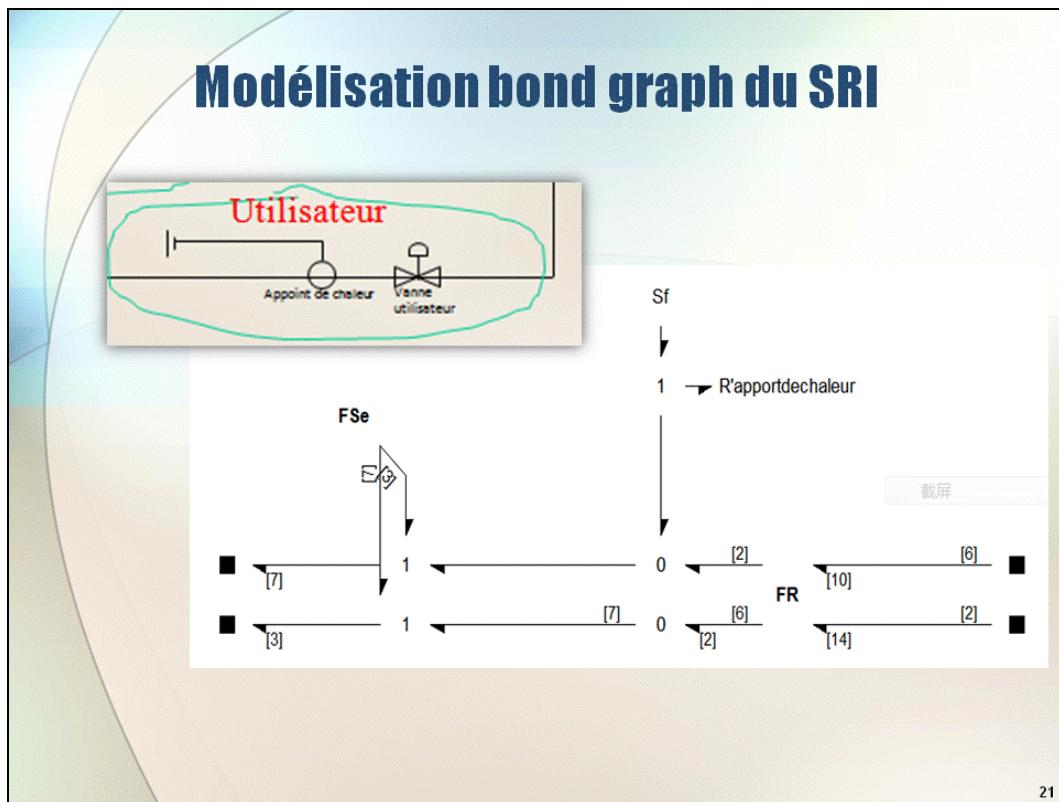




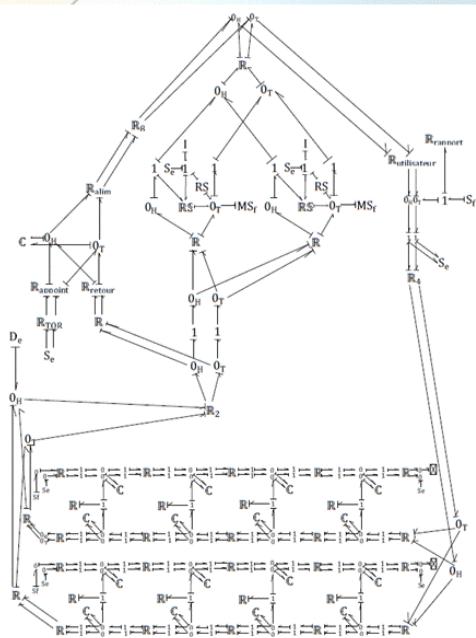
19



20



Affectation de la causalité sur le modèle du SRI



23

Analyses structurelles locales

La bâche

Le stockage potentiel C multi-port

$$\sum_i \varphi = \sum_i^n (h_i - h_m) Q_i$$

$$\left. \begin{aligned} \rho \cdot A \cdot \frac{\partial z}{\partial t} &= \sum_{i=1}^n Q_i \\ \rho \cdot A \cdot z \cdot \frac{\partial h_m}{\partial t} &= \sum_{i=1}^n (h_i - h_m) \cdot Q_i \end{aligned} \right\}$$

$$P = P_{atm} + \rho g \frac{z}{2} \quad \rightarrow \quad P = \Phi_1(P, H, z)$$

Boucle algébrique

On suppose que le fluide est incompressible
 Les variables d'entrée: Q_m, φ
 Les variables de sortie: T, P

24

Analyses structurelles locales

La pompe

L'élément RS du frottement



$$C_f = \begin{cases} |R| < 1 \Rightarrow \text{sign}(R) \cdot C_{f0} \cdot (1 - |R|) \\ |R| \geq 1 \Rightarrow 0 \end{cases}$$

$$\rightarrow \begin{cases} C_f = C_f(R) = C_f(\omega) \\ \dot{W}_f = C_f \omega = \Psi(\omega) \end{cases}$$

Les variables d'entrée: T, ω

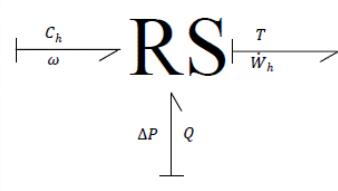
Les variables de sortie: Cf, \dot{W}_f

25

Analyses structurelles locales

La pompe

L'élément RS multi-port de conversion d'énergie



$$\begin{cases} \Delta P = \rho g h_n = Eau_PH_d(P_m, H) g f(Q, \omega) \\ C_h = \frac{1}{r_h} \frac{Q_v \Delta P}{\omega} = g(Q, \omega) \frac{Q_v \Delta P}{\omega} \\ \dot{W}_h = C_h \omega = g(Q, \omega) Q_v \Delta P \end{cases}$$

\rightarrow Les variables d'entrée: Q, ω , T

Les variables de sortie: ΔP , Ch, \dot{W}_h

26

Analyses structurelles locales

Les tubes et les vannes

La dissipation R multi-port
(La perte de charge)



Pour les vannes régulantes et la vanne utilisateur:

$$\Delta P \cdot C_v \cdot |C_v| = 1.733 \cdot 10^{12} \cdot \frac{Q \cdot |Q|}{\rho^2}$$

Pour la vanne TOR:

$$\Delta P = \frac{k}{2 \cdot \rho} \cdot Q \cdot |Q|$$

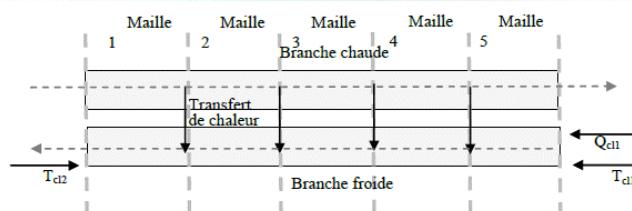
Pour les tubes:

$$\Delta P = \frac{k}{2 \cdot \rho} \cdot Q \cdot |Q| + \rho \cdot g \cdot \Delta z$$

27

Analyses structurelles locales

Les échangeurs



La résistance thermique R

$$\begin{aligned}
 \frac{T}{\varphi_i} &\quad R \quad \varphi_i = K_i \cdot (T_{c,i} - T_{f,i}) \\
 \frac{1}{K_i} &= \frac{1}{\tilde{h}_{c,i}} + \frac{1}{\tilde{h}_{f,i}} + \frac{\epsilon_m}{\lambda_m} \\
 \tilde{h}_{b,i} &= 11.245 \cdot qm_{b,i}^{0.8} \left(\frac{\mu_{b,i} \cdot cp_{b,i}}{\lambda_{b,i}} \right)^{0.4} \cdot \lambda_{b,i} \\
 \rightarrow R_{Transfert} &= \frac{1}{K_i} = \Phi(Q, c_p, \mu, \lambda) = \Phi(Q_c, Q_f, P_c, P_f, H_c, H_f) = \frac{T}{dw}
 \end{aligned}$$

28

Perspective

les analyses
structurelles
locales du
système au
niveau de
modélisation

Les analyses
globalement sur
tout le système

Les précisions sur
les calculs des
entrées pour un état
stationnaire spécifié

29

Merci
Questions?

30

EDF R&D	Projet MODRIO - Rapport de Master Recherche intitulé "Modélisation et analyse structurelle du modèle SRI d'une centrale nucléaire"	H-P1C-2012-02601-FR Version 1.0
--------------------	--	---

3. Rapport de stage



INSA Lyon

Master GSA

Rapport de Stage de Master Recherche 2

Modélisation et Analyse Structurelle du Modèle de SRI d'une Centrale Nucléaire

Li WANG

Tuteur : Wilfrid Marquis-Favre

Tuteur pédagogique : Gérard Scordelli

Laboratoire Ampère

Septembre 2012

Modélisation et Analyse Structurelle du Modèle de SRI d'une Centrale Nucléaire

Li WANG*

*Ecole Centrale de Lyon, 69134, Lyon, France.
Laboratoire Ampère (INSA) bâtiment St Exupéry, 25, av. Jean Capelle, 69621, Villeurbanne
Cedex
li.wang7788@gmail.com

Abstract. SRI (System of Intermediate Refrigeration) works at the machine room of the nuclear central and it provides the service of the refrigeration of the auxiliary parts in the nuclear plant. The study of the internship is to help calculating the level of opening of the valves which aim to control the working state of the thermo-exchangers. A model has been already built in language Modelica by EDF but the stationary initial state of system can't be measured now. In this report the bond graph representation of SRI will be built and the structural analysis of this model will provide the details of the information of the set of variables, including the undetermined variables and the constant variables.

Résumé. Le SRI (Système de Réfrigération Intermédiaire) est installé dans une salle de machine où il assure la réfrigération des auxiliaires. L'étude aménagée ici a pour perspective de calculer le niveau d'ouverture des vannes qui visent à contrôler l'état de fonctionnement des échangeurs thermiques. Un modèle complet du SRI a été développé en langage Modelica par EDF. Le problème de la détermination de l'état initial statique n'est cependant pas complètement résolu. Dans ce rapport une représentation bond graph du SRI est construite. Les analyses structurales documentent les précisions sur les ensembles compatibles de variables fixes et de ceux à déterminer via les études de la couplage du modèle bond graph.

Keywords: Modélisation du bond graph, analyse structurelle physique du modèle

Content

1	Introduction	4
2	Présentation du SRI	6
2.1	Description du SRI	6
2.2	Cahier de charges	7
2.3	Paramétrage du modèle	8
2.4	Descriptions des composants	9
2.4.1	Bâche	9
2.4.2	La pompe centrifuge dynamique	10
2.4.3	Lavanne réglate	12
2.4.4	Lavanne TOR	12
2.4.5	Le tube de perte de charge	13
2.4.6	L'échangeur à plaques	13
3	Représentation bond graph du SRI	16
3.1	La simplification du modèle SRI	16
3.2	La division du modèle	17
3.3	Appoint	18
3.4	Circulation	19
3.5	Refroidissement	21
3.6	Utilisateur	23
3.7	Régulation	24
4	Affectation de la causalité sur le modèle bond graph du SRI	25
5	Analyse structurelle	27
5.1	La bâche	27
5.1.1	Le stockage potentiel C multi-port dans la bâche	27
5.1.2	Les dissipations R multi-ports d'orifice	28
5.2	La pompe	29
5.2.1	L'élément RS du rotor	29
5.2.2	L'élément RS multi-port de la conversion d'énergie	30
5.3	L'échangeur	31
5.3.1	Les dissipations R multiports dans la modélisation bond graph d'échangeur	31
5.3.2	Le sous-système C_c	31
5.3.3	La résidence thermique R	32
5.3.4	Les conditions limites de deux côtés de la branche froide	32
5.4	Les warms	33
5.5	Les tubes	34
6	Conclusion	35
	Bibliographie	36

1 Introduction

Le SRI (Système de Réfrigération Intermédiaire) d'une centrale nucléaire est un cas d'étude relativement illustratif des problèmes d'inversion de modèles dans la mesure où il est complet et où il comprend à la fois une partie physique et une partie commande.

L'étude envisagée ici a pour perspective de calculer les entrées pour un état stationnaire spécifié du SRI, c'est-à-dire calculer la position de vannes régulières pour obtenir des conditions de fonctionnement spécifiées en sortie des échangeurs. Un modèle complet du SRI a été développé en langage Modelica. Celui-ci a été validé complètement sous Dymola et partiellement sous Scicos.

Modelica est un langage de modélisation qui est destiné à permettre une modélisation pratique de systèmes complexes et est développé par l'association à but non lucratif de Modelica [1]. Dymola est commercial et de l'environnement de simulation basé sur le langage modelica et qui est développé par la société française Dassault Systèmes AB. Dymola est un logiciel de modélisation multiphysique, c'est-à-dire les modèles peuvent être constitués d'éléments provenant des domaines différents. Scicos est une boîte à outil faisant office de simulateur graphique de systèmes dynamiques. Scicos est inclus dans le logiciel de calcul scientifique ScicosLab. On peut créer avec Scicos des diagrammes bloc permettant de modéliser et de simuler des systèmes hybrides.

Le problème de détermination de l'état initial stationnaire reste cependant non complètement résolu (Dymola ne converge pas vers un état tout à fait stationnaire). L'application de la méthodologie développée par le Laboratoire AMPERE semble intéressante notamment pour sa capacité d'analyse du système en utilisant le langage bond graph [5]. Les recherches sur le bond graph dans le laboratoire AMPERE pourraient notamment aider à analyser les modèles en donnant des précisions sur les ensembles compatibles de variables fixées et de variables à déterminer. Sur la base de la méthodologie sur les modèles bond graph développée par le Laboratoire AMPERE [2], ce travail de stage MASTER recherche aura comme objectif :

- de mettre en place un modèle du SRI dans le langage bond graph, en utilisant le logiciel MS1 ;
- de mettre en œuvre la causalité par rapport aux propriétés physiques du système.
- de mettre en œuvre les phases d'analyse structurelle pour donner des précisions sur les ensembles compatibles de variables fixées et de variables à déterminer via les études de la causalité du modèle bond graph.

Dans ce rapport, on va d'abord présenter en détail le SRI, surtout les composants principaux du système ; et puis, on va construire la représentation bond graph du système sous MS 1 et on va affecter la causalité sur ce modèle bond graph ; finalement, on va faire des analyses structurelles locales du modèle SRI.

2 Présentation du SRI

2.1 Description du SRI

Le SRI est situé en salle des machines où il assure la réfrigération des auxiliaires (e.g. alternateur, pompe de circulation, ...) de la partie conventionnelle de la centrale. La valeur de consigne du système de maintien de température est de 17 °C. L'apport maximal de puissance des systèmes auxiliaires refroidis est de 25 MW.

L'ensemble du SRI est modélisé à l'exception de la fonction de dégazage H2. Le modèle comprend donc :

- la fonction de refroidissement, assurée par deux échangeurs à plaques et un bypass ;
- la fonction de circulation d'eau, assurée par trois pompes en parallèle, dont une pompe en secours (à l'arrêt en fonctionnement normal) ;

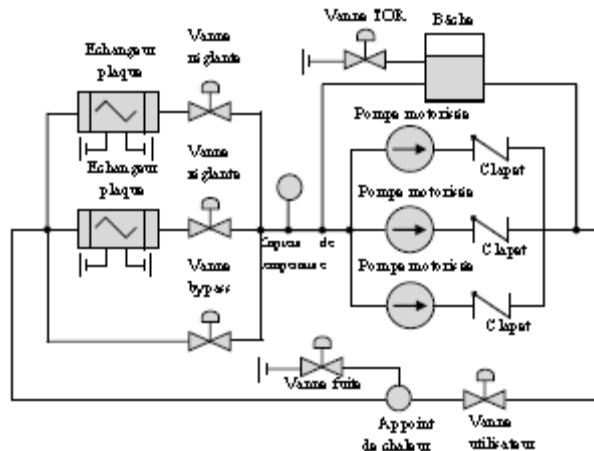


Fig. 1. Topologie de la partie physique du SRI

- la fonction d'appoint en eau, assurée par une bâche alimentaire avec recirculation de l'eau.

Les systèmes servis sont globalement représentés par un apport de puissance et une fuite éventuelle. Le contrôle de commande comprend, en toute rigueur, deux régulations :

- la régulation de température en sortie des échangeurs ;
- la régulation du niveau d'eau dans la bâche.

Ici, dans le modèle, seulement la régulation de température est représentée (Figure 2). Enfin, le modèle est relié à son environnement grâce aux conditions limites, représentées par des blocs CL sur la figure 1.

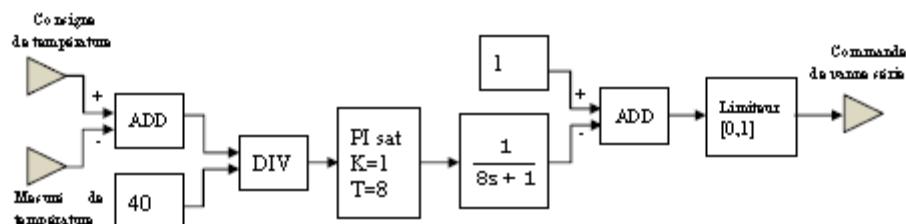


Fig. 2. Régulation de température du système SRI

2.2 Cahier de charges

Les cahiers de charge envisagé ici est de calculer l'état stationnaire du SRI, c'est-à-dire calculer la position des vannes régulières (i.e. de la vanne bypass et des vannes série 1 et 2) pour obtenir une température de 17 °C en sortie des échangeurs lorsque :

- l'apport des utilisateurs est de 25 MW ;
- les ouvertures des vannes fuite et utilisateur sont fixées ;
- les pompes 1 et 2 fonctionnent à vitesse nominale et la pompe 3 est arrêtée ;
- la hauteur initiale d'eau dans la bâche est connue.

2.3 Paramétrage du modèle

Les valeurs des paramètres des composants sont données dans le tableau 1.

Table 1. paramétrage du modèle

Composant	Paramètres	Description
Echangeur plaques 1 et 2	$k_{h_bda_m_etal} = 15.0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ $e_{metal} = 0.0006 \text{ m}$ $S_p = 2 \text{ m}^2$ $Nbp = 499$ $c1_chaud = 1.12647$ $c1_froid = 1$	Conductivité thermique d'un énl Epaisseur d'un métal Surface d'une plaque Nombre de plaques Facteur correctif de perte de charge Facteur correctif de perte de charge
Vannes séries 1 et 2 Vanne bypass	$Cvmax = 8005.42$	CV max, caractéristique linéaire
Pompes motorisées 1, 2 et 3	$\omega_{rot} = 1400 \text{ tr/mm}$ $J = 10 \text{ kg m}^2$ $Cf0 = 10$ $-88.67x^2 + 43.15$ $-3.7751x^4 + 3.61x - 0.0075464$	Vitesse de rotation nominale Moment d'inertie Coefficient de frottement Polynôme de la caractéristique (x représente le débit volumique) Polynôme rendement hydraulique (x représente le débit volumique)
Bâche alimentaire	$A = 7 \text{ m}^2$	Section de la bâche
Vanme TOR	$k = 1000$	Coefficient de perte de charge
Vanme utilisateurs	$Cvmax = 8005.42$	CV max, caractéristique linéaire
Vanme fuite	$Cvmax = 500$	CV max, caractéristique linéaire
Apport de chaleur	$A = 800$ $K = 1000 \text{ W/(m}^2\text{K)}$	Surface d'échange Coefficient d'échange
Tubes T1, T2, T4, T5	$k = 25.36$ de $la_z = 0$	Coef. perte de charge Différence altitudes entrée/sortie
Tubes T6, T8	$k = 46.73 \cdot 10^3$ de $la_z = 30$	Coef. perte de charge Différence altitudes entrée/sortie

Et les valeurs de conditions de limite sont données sur le tableau 2 :

Table 2. Conditions aux limites

Condition limite	Paramètre	Description
CL1 et CL3	P = 3 bars T = 285 K	Pression imposée Température imposée
CL2 et CL4	P = 1 bar T = 285 K	Pression imposée Température imposée
CL5	P = 3 bars T = 290 K	Pression imposée Température imposée
CL6	P = 1 bar T = 290 K	Pression imposée Température imposée

2.4 Descriptions des composants

2.4.1 Bâche

C'est un modèle de réservoir contenant de l'eau. Il s'agit d'un volume, comprenant n arrivées/départs d'eau. Le ciel de la bâche est supposé ouvert, à pression constante paramétrable. Les effets de bord correspondants aux départs d'eau sont gérés : lorsque le niveau d'eau est inférieur à l'altitude d'un départ d'eau, l'eau ne peut s'écouler à travers ce départ (c'est-à-dire ne peut pas sortir de la bâche). L'eau peut évidemment toujours s'écouler à travers une arrivée (c'est-à-dire entrer dans la bâche). La distinction entre départ et arrivée dépend du signe du débit (entrant ou sortant). La bâche est supposée de type cylindrique à axe vertical (et non horizontal comme c'est le cas pour le SRI).

Système d'équations associé :

Bilan de masse

$$\rho \cdot A \cdot \frac{\partial z}{\partial t} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (1)$$

Bilan d'énergie

$$\rho \cdot A \cdot z \cdot \frac{\partial h_m}{\partial t} = \sum_{i=1}^n (h_i - h_m) \cdot Q_i \quad (2)$$

Où ρ est la masse volumique de l'eau, A la section de la bâche, z l'altitude d'eau dans la bâche, Q_i les débits entrants ou sortants, h_m l'enthalpie massique moyenne de l'eau dans la bâche et h_i l'enthalpie du fluide entrant ou sortant.

Et quand $z = 0$, le bilan d'énergie est remplacé par

$$\frac{\partial h_a}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

On considère l'orifice d'arrivée ou de départ comme une perte de charge singulière modulée par la hauteur d'eau par rapport à celle de l'orifice, et le sens du débit.

$$k \cdot \frac{\rho_t \cdot |\rho_t|}{2 \cdot \rho} = \begin{cases} \rho_t \leq 0 \text{ ou } (\rho_t > 0 \text{ et } z \geq z_t + \epsilon) \Rightarrow P_{\text{ext}} + \rho \cdot g \cdot \max(z - z_t, 0) - P_t \\ \rho_t > 0 \text{ et } z < z_t + \epsilon \text{ et } z > z_t \Rightarrow P_{\text{ext}} + \rho \cdot g \cdot \frac{(z - z_t)^2}{\epsilon} - P_t \\ \text{Sinon} \Rightarrow 0 \end{cases} \quad (4)$$

Où ϵ est le diamètre de l'orifice, P_{ext} la pression dans le ciel de la bâche, z l'altitude du piézogage de l'entrée ou de la sortie ; k un coefficient de perte de charge.

2.4.2 La pompe centrifuge dynamique

Il s'agit d'un modèle dynamique de pompe, intégrant l'équation des masses tournantes. Ce modèle comporte deux états : l'enthalpie massique de l'eau dans le volume de la pompe et la vitesse angulaire de rotation de la pompe. La pompe est mise en rotation grâce à un moteur électrique, via un coupleur mécanique.

Système d'équations associé :

Conversion de la hauteur manométrique en mise en charge :

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h_n \quad (5)$$

Où $\Delta P = P_2 - P_1$, h différence entre la pression du fluide entrant et celle du fluide sortant ; ρ est la masse volumique de l'eau ; h_n est la hauteur manométrique.

Bilan d'énergie :

$$\rho \cdot V \cdot \frac{\partial h_n}{\partial t} = -Q \cdot \Delta h + \dot{W}_h + \dot{W}_f \quad (6)$$

Où $\dot{W}_h = C_h \cdot \omega$, C_h est le couple hydraulique, et ω est la vitesse angulaire de rotation ; $\dot{W}_f = C_f \cdot \omega$, où C_f est le couple des forces de frottement. Et V est la volume de la pompe, Q le débit massique à travers la pompe, Δh la variation d'enthalpie massique à travers la pompe et h_n l'enthalpie massique dans le volume de la pompe.

La hauteur manométrique est donnée par :

$$h_n = a_1 \cdot Q_v \cdot |Q_v| + a_2 \cdot Q_v \cdot R + a_3 \cdot R \cdot |R| \quad (7)$$

Le rendement hydraulique est donné par :

$$\eta_h = b_1 \cdot \frac{Q_v^2}{R^2} + b_2 \cdot \frac{Q_v}{R} + b_3 \quad (8)$$

Avec

$$R = \frac{V_{rot}}{V_{nom}} \quad (9)$$

$$V_{rot} = \frac{30}{\pi} \cdot \omega \quad (10)$$

Où V_{nom} désigne la vitesse nominale de rotation et Q_v le débit volumique à travers la pompe. $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ sont des coefficients constants.

Mise en rotation de la pompe :

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = C_m - C_f - C_a \quad (11)$$

Où J est le moment d'inertie de la pompe et ω est égal à la vitesse de rotation de l'arbre. Le couple moteur C_m est transmis par l'arbre du moteur via le coupleur mécanique.

Le couple de frottement est donné par :

$$C_f = \begin{cases} |R| < 1 \Rightarrow sign(R) \cdot C_{fa} \cdot (1 - |R|) \\ |R| \geq 1 \Rightarrow 0 \end{cases} \quad (12)$$

Le calcul du couple hydraulique C_a dépend du mode de fonctionnement de la pompe. Si la pompe fonctionne en pompe (i.e. l'arbre de la pompe fournit la puissance mécanique au fluide), c'est-à-dire si $W_a \geq 0$, alors :

$$C_a = \frac{1}{r_a} \cdot \frac{Q_v \cdot \Delta P}{\omega} \quad (13)$$

Sinon, la pompe fonctionne en turbine (i.e. l'eau fournit la puissance mécanique à la pompe) :

$$C_h = r_h \cdot \frac{Q_v \cdot \Delta P}{\omega} \quad (14)$$

2.4.3 La vanne réglante

La vanne se comporte comme une perte de charge singulière commandable. Son volume est supposé nul. C'est pourquoi le modèle est quasi-statique, sans état. La caractéristique de la vanne (i.e. la relation reliant le Cv à l'ouverture) peut être linéaire, ou tabulée.

Système d'équations associé :

Calcul de la perte de charge :

$$\Delta P \cdot C_v \cdot |C_v| = 1.733 \cdot 10^{12} \cdot \frac{\rho \cdot |Q|}{\rho^2} \quad (15)$$

Où Q est le débit massique à travers la vanne, ΔP la perte de charge à travers la vanne, ρ la masse volumique de l'eau.

Calcul du Cv :

$$C_v = C_v^{\text{max}} \cdot \Omega \quad (16)$$

Où Ω est l'ouverture de la vanne (valeur réelle comprise entre 0 et 1).

2.4.4 La vanne TOR

La vanne se comporte comme une perte de charge singulière commandable. Son volume est supposé nul. C'est pourquoi le modèle est quasi-statique, sans état.

Système d'équations associé :

Calcul de la perte de charge :

$$\Delta P = \frac{k}{2 \cdot \rho} \cdot Q \cdot |Q| \quad (17)$$

Où Q est le débit massique à travers la vanne, ΔP la perte de charge à travers la vanne, k le coefficient de perte de charge singulière et ρ la masse volumique de l'eau.

2.4.5 Le tube de perte de charge

Il s'agit d'un tube de perte de charge statique.

Système d'équations associé :

Calcul de la perte de charge :

$$\Delta P = \frac{k}{2 \cdot \rho} \cdot Q \cdot |Q| + \rho \cdot g \cdot \Delta z \quad (18)$$

Où Q est le débit massique à travers le tube, ΔP la perte de charge à travers le tube, k le coefficient de perte de charge, Δz la différence d'altitude entre l'entrée et la sortie du tube, ρ la masse volumique de l'eau.

Avec

$$k = \frac{16 \cdot A \cdot L}{\pi^2 \cdot D^4} \quad (19)$$

Où A est le coefficient de perte de charge frottement, L la longueur du tube et D le diamètre du tube.

2.4.6 L'échangeur à plaques

Il s'agit d'un échangeur eau/eau maillé fonctionnant à contre-courant. Le maillage est à mailles décalées.

Système d'équations associé :

Calcul de la perte de charge :

$$\Delta P_{ij} = c_{q,i} \cdot 14423.2 \cdot \frac{1}{\rho_{ij}} \cdot qm_{ij}^{-4.19} \cdot qu_{ij}^2 \cdot \left(147247 + 1.54 \cdot \frac{(M-1)}{2} + 10497 \cdot qm_{ij}^{4.21} \right) \quad (20)$$

Avec

$$qm_{q,i} = \frac{|Q_{q,i}|}{\mu_{q,i} \cdot M} \quad (21)$$

$$qu_{q,i} = \frac{|Q_{q,i}|}{M} \quad (22)$$

$$M = \frac{N_p - 1}{2} \quad (23)$$

Où $\Delta P_{a,i}$ est la perte de charge entre les centres des mailles $i-1$ et i de la branche ; $Q_{a,i}$ est le débit de masse de l'eau entrant dans la maille i à partir de la maille $i-1$ de la branche b ; $\rho_{a,i}$ est la masse volumique de l'eau dans la maille i de la branche b ; $\mu_{a,i}$ est la viscosité dynamique de l'eau dans la maille i de la branche b . $c_{a,i}$ est le coefficient correctif pour la branche b ; N_p est le nombre de plaques ; Et on a $b = c$ pour la branche chaude et $b = f$ pour la branche froide.

Le flux de chaleur de la branche chaude vers la branche froide est :

$$\varphi_i = K_i \cdot (T_{a,i} - T_{f,i}) \quad (24)$$

avec

$$\frac{1}{K_i} = \frac{1}{\tilde{h}_{a,i}} + \frac{1}{\tilde{h}_{f,i}} + \frac{\epsilon_m}{\lambda_m} \quad (25)$$

$$\tilde{h}_{a,i} = 11.245 \cdot qm_{a,i}^{0.3} \cdot \left(\frac{\mu_{a,i} \cdot \Delta P_{a,i}}{\lambda_{a,i}} \right)^{0.4} \cdot \lambda_{a,i} \quad (26)$$

Où $\tilde{h}_{a,i}$ est le coefficient d'échange correctif dans la maille i côté branche b ; ϵ_m est l'épaisseur du métal et λ_m la conductivité thermique du métal; K_i est le coefficient d'échange global dans la maille i .

Bilans d'énergie :

$$V_{a,i} \cdot \rho_{a,i} \cdot \frac{\partial (\tilde{h}_{a,i})}{\partial t} = h_{a,i} \cdot Q_{a,i} - h_{a,f,i} \cdot Q_{a,f,i} \pm \varphi_i \cdot S_{a,i} \quad (27)$$

$$S_{a,i} = \frac{N_p - 2}{N} \cdot S_p \quad (28)$$

Où $V_{b,i}$ est le volume de la maille i de la branche, N le nombre de mailles ; $\bar{h}_{b,i}$ est l'énergie interne massique moyenne de l'eau dans la maille i de la branche b ;
 S_p Surface d'une plaque.

Et le signe \pm valant - pour la branche chaude et + pour la branche froide.

3 Représentation bond graph du SRI

Après avoir bien présenté les descriptions du système et des composants principaux, et avec l'aide des codes Modelica donnés par EDF, on peut construire la représentation bond graph du SRI en utilisant le logiciel MS1.

En raison de la complexité du SRI, on va d'abord essayer de simplifier le SRI puis on divisera le système par quatre parties puis construire la représentation bond graph du SRI par chacune d'entre eux.

3.1 La simplification du modèle SRI

On ajoute quelques hypothèses pour simplifier la construction du système et le modèle simplifié du SRI est sur la figure 3.

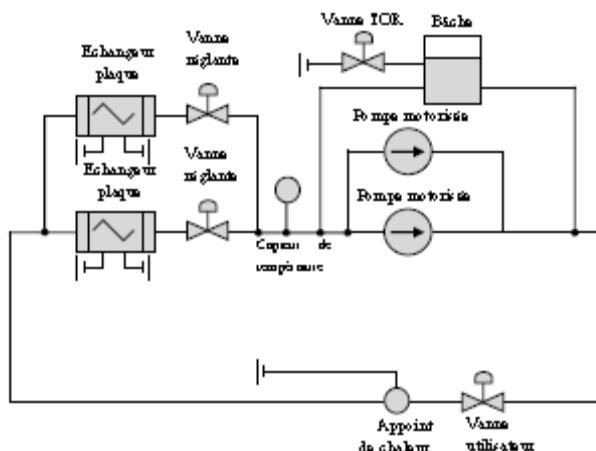


Fig. 3. Modèle simplifié du SRI

On supprime la vanne bypass et la pompe 3, parce qu'il s'agit de composants utilisés en cas d'urgence. On supprime aussi les deux clapets parce qu'ils fonctionnent comme deux interrupteurs idéaux. C'est-à-dire quand ils changent l'état de fonctionnement, ils vont influencer la structure bond graph du système et la causalité

du modèle. Donc pour diminuer la complexité du modèle, on suppose que les deux clapets sont toujours ouverts. En plus, comme l'ouverture de la vanne fuite est fixée à 1, elle est toujours ouverte et n'est pas représentée dans le modèle. On supprime aussi un orifice de vidange de la bâche, car elle n'est pas intéressante dans le modèle simplifié.

Ensuite, la régulation du système est contrôlée uniquement par les deux vannes réglantes auxquelles le capteur de température donne un signal de température mesurée. Comme on supprime la régulation du système par la vanne TOR qui contrôle directement le niveau d'eau dans la bâche, on suppose que l'ouverture de vanne TOR est fixée.

Par ailleurs, pour éviter le changement de la causalité du modèle bond graph du SRI, on néglige tous les cas d'inversion de débit dans le système.

3.2 La division du modèle

On divise le système par quatre parties : Appoint, Circulation, Refroidissement et Utilisateur (Figure 4).

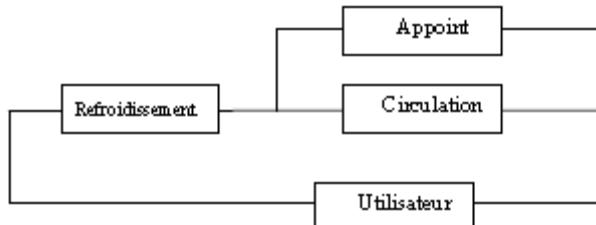


Fig. 4. Les quatre parties du système

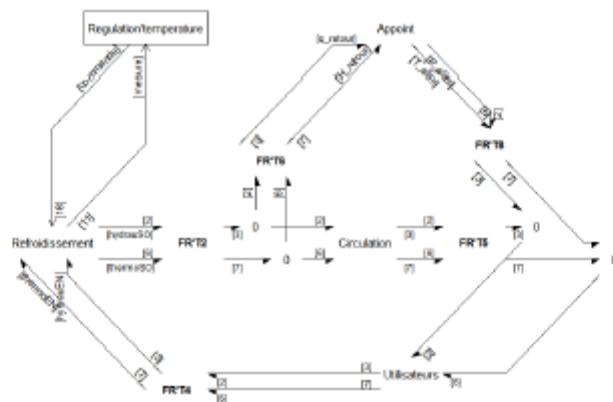
Dans la partie Refroidissement, il y a deux échangeurs à plaques, deux vannes réglantes et un détecteur de température. Le fonctionnement de cette partie est évidemment de refroidir le fluide en régulant les vannes. La partie Appoint comporte une bâche et une vanne TOR. Le rôle de cette partie est la source du fluide du SRI. Les deux pompes motorisées constituent la partie Circulation. Les pompes fournissent l'énergie nécessaire pour la circulation du fluide dans le système.

Par rapport aux descriptions du SRI, on sait que le système concerne principalement deux domaines, le domaine hydraulique et le domaine thermique (il concerne aussi le domaine mécanique dans les deux pompes motorisées). Donc la représentation bond graph est plutôt une modélisation multibond graph[4]. C'est-à-dire, entre chaque élément, il y a deux liens de puissance, un hydraulique et l'autre thermique.

On va construire aussi un sous-système bloc diagramme Régulation qui donne le signal de commande aux vannes régulières par rapport à la température mesurée par le détecteur de température et de la température consigne du système.

Avant la modélisation, on doit choisir les variables d'effort-flux pour chaque lien de puissance. Pour le lien hydraulique, on choisit la pression comme l'effort et le débit massique comme le flux, et pour celui thermique, on choisit la température comme l'effort et le flux de chaleur comme le flux. Donc la représentation bond graph est aussi un modèle pseudo-bond graph[6].

Tout d'abord, on construit l'interface de la racine et elle est donnée sur la figure 5.



de la bâche se comportent tous comme une perte de charge, donc on utilise les R multi-port pour le représenter dans la construction band graph.

On va discuter la causalité et faire les analyses locales sur cette partie dans le chapitre suivant.

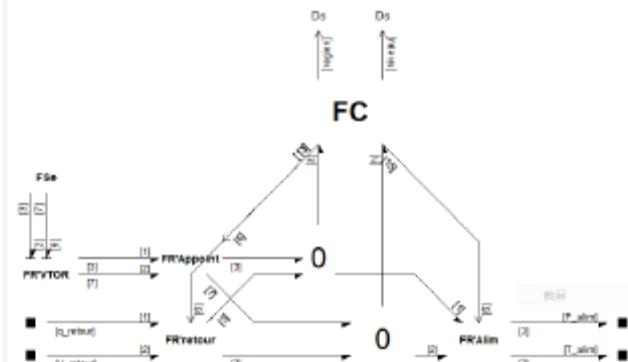


Fig. 6. La représentation de la partie Appoint

3.4 Circulation

Dans cette partie, on a deux pompes en parallèle (Figure 7).

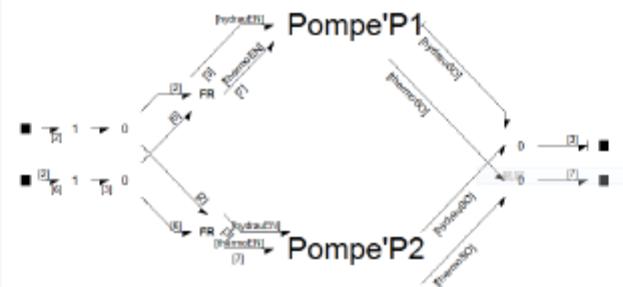


Fig. 7. La représentation bond graph de la partie Circulation

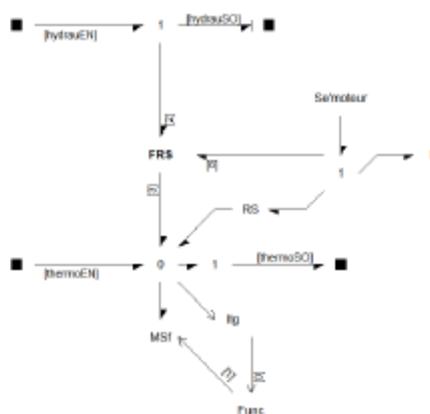


Fig. 8. La représentation bond graph de la pompe

On ajoute un élément R multi-port à côté de la pompe pour représenter la perte de charge dans les tubes. Et on construit un sous-système Pompe dans MS1 pour mettre la représentation bond graph de la pompe qui est sur la figure 8.

De la partie mécanique, on utilise une source d'effort pour représenter le couple moteur qui est transmis par l'arbre du moteur via le coupleur mécanique, un stockage

inertille I pour déterminer la vitesse angulaire de rotation en respectant la mise en rotation de la pompe et un élément RS pour représenter à la fois la perte de charge en raison du frottement et à la fois pour fournir une puissance de frottement W_f au lien thermique en respectant le bilan d'énergie de la pompe.

On utilise un élément RS multi-port entre la partie mécanique, la partie thermique et la partie hydraulique qui est une dissipation d'énergie et en même temps un générateur du flux pour représenter la conversion d'énergie dans la pompe.

On va discuter la causalité et faire les analyses locales sur cette partie dans le chapitre suivant.

3.5 Refroidissement

La partie Refroidissement comporte deux échangeurs à plaques, deux vannes régulières et un détecteur de température (Figure 9).

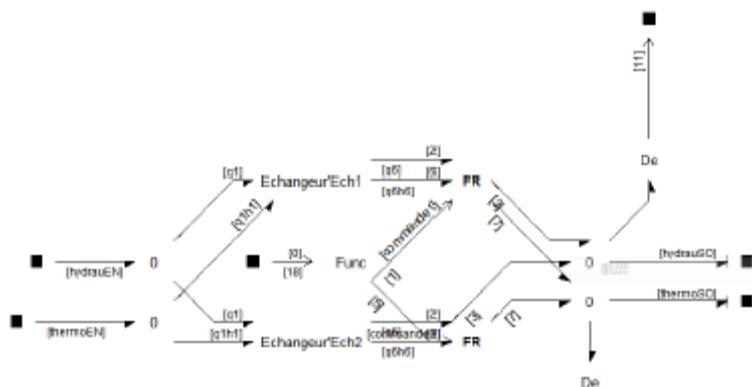


Fig. 9. La représentation bond graph du refroidissement

On prend le détecteur de température comme un détecteur d'effort De. Les deux vannes régulières se comportent comme deux R multi-ports modulés[3]. Le détecteur va donner les températures réelles dans le système comme des signaux d'entrée à un sous-système bloc diagramme Régluation qui va donner un signal de sortie pour commander l'ouverture des deux vannes régulières. Et on construit ainsi un sous-système bond graph pour représenter la modélisation des échangeurs.

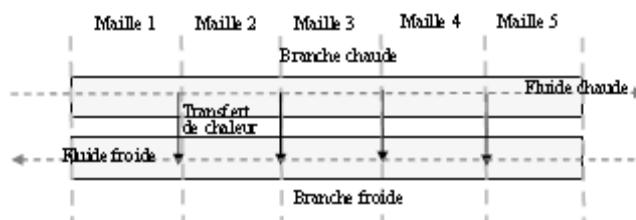


Fig. 10. La construction simplifiée équivalente d'échangeur

Dans chaque échangeur, on a plein de branches chaudes et plein de branches froides mais alternativement en parallèle et il est difficile de déterminer les transferts de chaleur entre les branches. Car la direction du fluide des branches chaudes et du fluide des branches froides sont opposées, une construction équivalente est proposée sur la figure 10: on suppose qu'il y a seulement une branche chaude et une branche froide dans chaque échangeur et on divise virtuellement chaque branche par cinq mailles. Et la surface d'une maille de la branche équivalente est calculée par :

$$S_{A,i} = \frac{N_f - 2}{N} \cdot S_p \quad (29)$$

On suppose qu'il existe des pertes de charge entre chaque maille et qu'il existe un transfert de chaleur entre la branche chaude et la branche froide. Le transfert de chaleur entre les branches comporte trois parties : la convection thermique dans la branche chaude, la conduction thermique du métal entre deux branches et la convection thermique dans la branche froide. La représentation bond graph des échangeurs est donnée sur la figure 11.

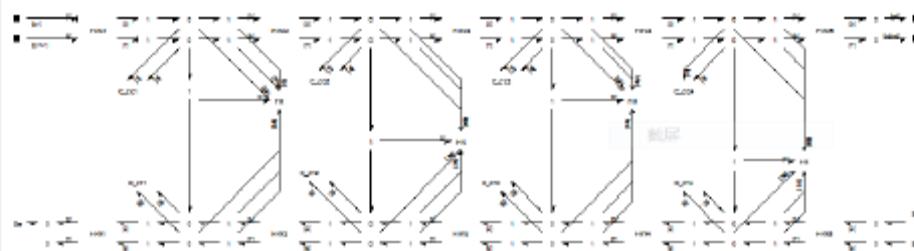


Fig. 11. La représentation bond graph d'échangeur

Dans la représentation bond graph d'échangeur, on met une dissipation R modulée pour représenter la résistance thermique entre le lien thermique de la branche chaude et celui de la branche froide et on met les éléments R multi-ports pour représenter les pertes de charge entre les mailles dans les deux branches [7]. On construit aussi les sous-systèmes C_{c} pour respecter le bilan d'énergie de l'échangeur. On met les conditions limites de la température dans les deux côtés de la branche froide, comme les deux sources d'effort sur le lien thermique. Par contre, on impose un débit massique dans l'entrée de la branche froide au lieu de la condition limite de la pression, comme une source de flux sur le lien hydraulique. Parce que si on impose les deux pressions dans les deux côtés de la branche froide, on doit mettre deux sources d'effort sur le lien hydraulique, mais cela va causer le conflit de causalité sur lien hydraulique dans la représentation bond graph du SRI.

On va discuter en détail la causalité et faire les analyses locales sur cette partie dans le chapitre suivant.

3.6 Utilisateur

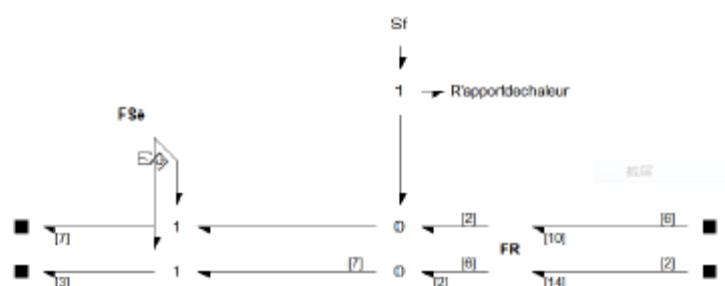


Fig. 12 . La représentation bond graph de la partie Utilisateur

Utilisateur est une partie qui contient une vanne utilisateur et un apport de chaleur. La chaleur est introduite par une source de flux et on prend en compte l'apport de chaleur comme un élément R qui donne une augmentation de la température du système. La vanne utilisateur est représentée par un R multi-port qui cause la variation de la pression. On met une source d'effort multi-port pour représenter la condition limite 6.

La structure d'Utilisateur est donnée sur la figure 12.

3.7 Régulation

Le SRI est contrôlé par une régulation de température en sortie des échangeurs. On construit donc un sous-système bloc diagramme Régulation. Et les signaux d'entrées sont la température réelle en sortie des échangeurs et la température consigne (17°C) et le signal de sortie est une commande pour l'ouverture des vannes régulières.

La représentation bloc diagramme de Régulation est donnée sur la figure 13.

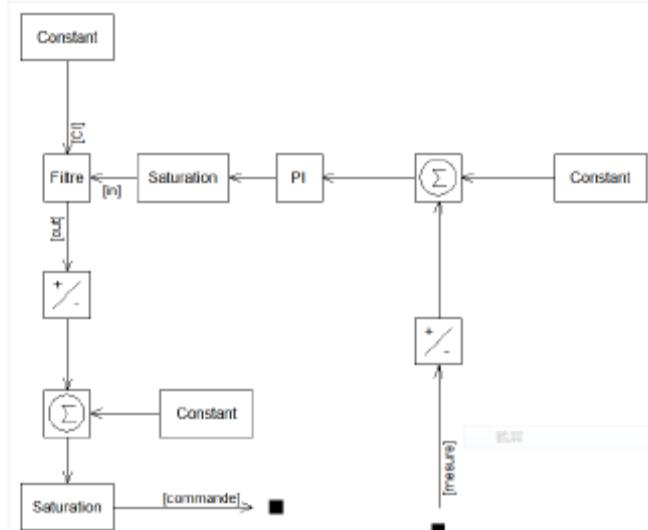
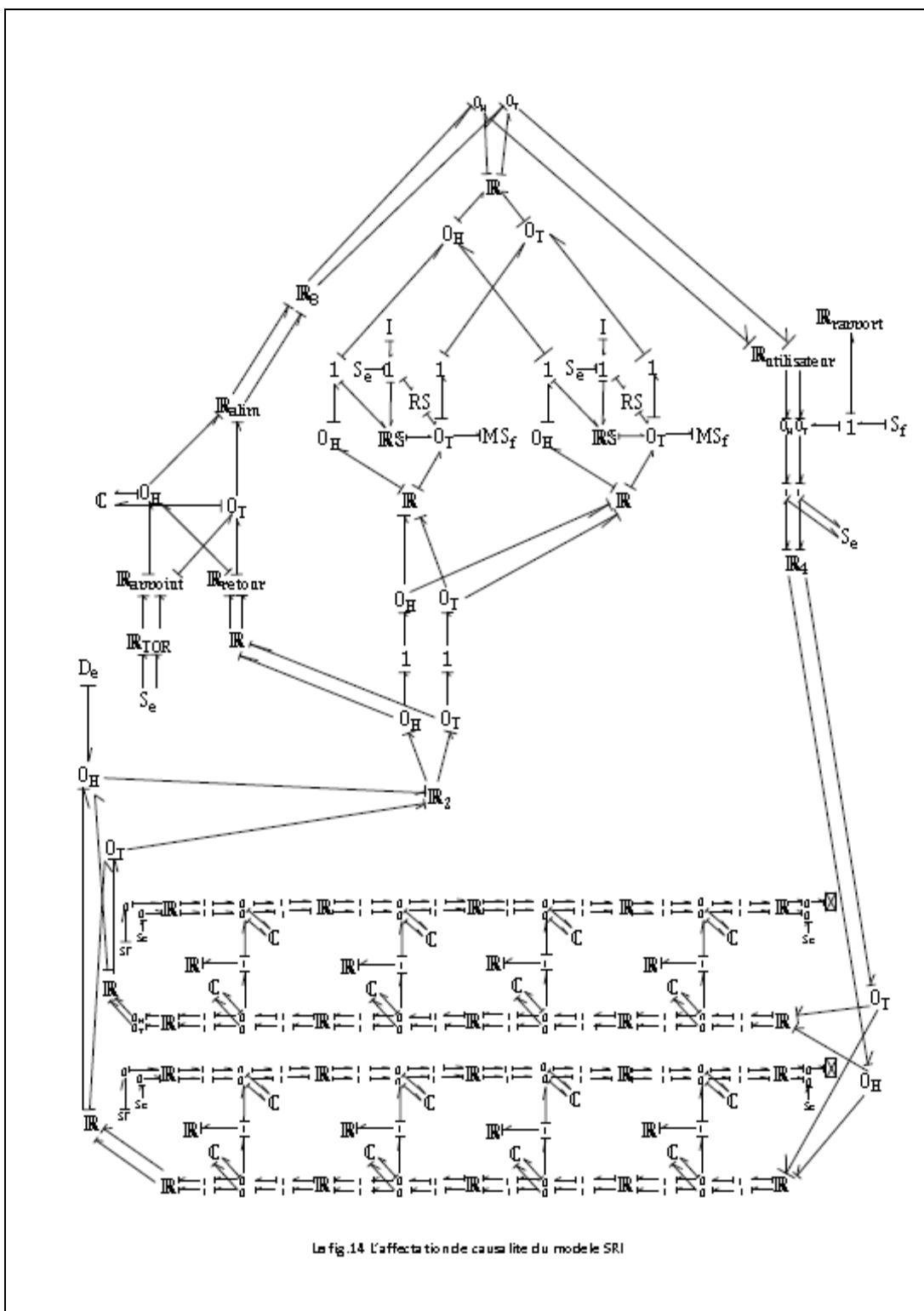


Fig.13. La représentation bloc diagramme du sous-système Régulation

4 Affectation de la causalité sur le modèle bond graph du SRI

Après toute la programmation du modèle bond graph en MS1, la causalité se propage dans le modèle et il existe des conflits de causalité du SRI pour deux possibilités : en raison de la non-linéarité du système et de la complexité du modèle, parfois le logiciel MS1 ne peut pas déterminer la causalité par lui-même, donc il faut imposer progressivement la causalité pour l'aider à effacer les conflits de causalité le plus possible ; dans certaines situations, on arrive à des situations de conflits, et en base des descriptions du système, on ne peut pas déterminer la causalité que lque part. Dans ce cas, soit on simplifie progressivement le modèle par ajout de certaines hypothèses supplémentaires, soit on modifie certaines hypothèses que lque part pour respecter la causalité du système.

Le représentation bond graph du système SRI avec l'affectation de la causalité est sur donné la figure suivante.



5 Analyse structurelle

L'analyse du système SRI est nécessaire à plusieurs niveaux, dans la phase de conception comme dans celle de synthèse de lois de commande. Dans ce chapitre, on va faire des analyses structurelles pour certains éléments principaux. On s'intéresse plutôt aux analyses locales, c'est-à-dire les analyses sur le fonctionnement et la causalité des éléments.

5.1 La bâche

Dans la représentation bond graph de la bâche, les éléments principaux sont le stockage potentiel C multi-port, les trois dissipations R multi-ports d'orifices.

5.1.1 Le stockage potentiel C multi-port dans la bâche

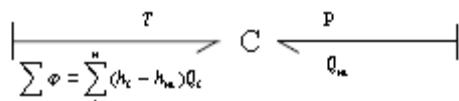


Fig.15. Le stockage potentiel C multi-port dans la représentation bond graph de la bâche

Le stockage potentiel C multiport est une partie très importante dans la représentation bond graph de la bâche du SRI. Il y a deux liens de puissance liés avec cet élément, un thermique et l'autre hydraulique (Figure 15).

$$\rho \cdot A \cdot \frac{\partial x}{\partial t} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (30)$$

$$\rho \cdot A \cdot z \cdot \frac{\partial h_m}{\partial t} = \sum_{i=1}^n (h_i - h_m) \cdot Q_i \quad (31)$$

Cet élément est introduit pour respecter le bilan de masse (30) et le bilan d'énergie (31). Les variables d'entrée sont le flux du lien thermique Φ et le flux du lien hydraulique Q_m . Les variables de sortie sont donc la pression P et la température T .

Pour la variable de sortie P , on a

$$P = P_{ext} + \rho g \frac{z}{2} \quad (32)$$

Où P_{atm} est la pression atmosphérique, ρ la masse volumique du fluide dans la bâche et z le niveau d'eau dans la bâche. On sait que le niveau d'eau dans la bâche z est déterminé par le débit entrant/sortant, donc on a

$$dz = \sum \phi / \rho A_{bache} \quad (33)$$

Où A_{bache} est la section de la bâche. Par rapport aux descriptions du modèle, le fluide est compressible. Et donc dans chaque élément, le débit massique $Q_m = \rho Q_0$ est déterminé par le débit volumique et la masse volumique qui n'est pas une constante. Par rapport aux codes Modelica donnés par EDF, on sait que la masse volumique est calculée par un tableau Eau_PH_diab, c'est-à-dire la masse volumique est déterminée par un tableau non-linéaire et non-inversible :

$$\rho = Fan_PH_d(P, H) \quad (34)$$

D'où on a

$$P = \Phi_1(P, H, z) \quad (35)$$

Donc pour la variable sortie P , on obtient une boucle algébrique qui va causer le conflit de causalité dans le modèle bond graph. Donc pour simplifier le problème, on suppose que le fluide est incompressible dans la bâche et donc ρ est une constante.

De la même façon, la variable de sortie T est calculée par un tableau Eau_PH_Ttab, c'est-à-dire la température est déterminée par un tableau non-linéaire et non-inversible :

$$T = Fan_PH_T(P, H) \quad (36)$$

Donc on peut fixer la causalité du stockage potentiel C multi-port comme dans la figure 19.

5.1.2 Les dissipations R multi-ports d'orifice



Fig.14. La représentation bond graph d'un orifice de la bâche

On construit les dissipations R multi-ports pour représenter des effets de bord dus à l'altimétrie des départs/arrivées d'eau en considérant les orifices comme des pertes de charge (Figure 16) et on a

$$k \cdot \frac{\rho_i \cdot |\Omega|}{2 \cdot \rho} = \begin{cases} \Omega \leq 0 \text{ ou } (\Omega > 0 \text{ et } z \geq z_i + \epsilon) \Rightarrow P_{\text{tot}} + \rho \cdot g \cdot \max(z - z_i, 0) - P_i \\ \Omega > 0 \text{ et } z < z_i + \epsilon \text{ et } z > z_i \Rightarrow P_{\text{tot}} + \rho \cdot g \cdot \frac{(z - z_i)^2}{\epsilon} - P_i \\ \text{Sinon} \Rightarrow 0 \end{cases} \quad (37)$$

Donc on peut dire que les deux pressions sont dépendantes et l'une est déterminée par l'autre. De la même logique, on suppose que le fluide est incompressible pour éviter le conflit de causalité à cause de la boucle algébrique. En d'autre terme, on suppose que la masse volumique ρ est une constante.

La température des deux côtés de la dissipation R multi-point sont égales et sont calculées par un tableau Eau_PH_T tab, c'est-à-dire la température est déterminée par un tableau non-linéaire et non-inversible :

$$T = \text{Eau_PH_T}(P, H) \quad (38)$$

Donc il y a plusieurs possibilités de causalité pour les dissipations R multi-points d'orifices.

5.2 La pompe

Dans la représentation bond graph de la pompe, ce qui est la plus difficile, c'est de représenter correctement la conversion d'énergie entre les trois domaines et en même temps d'être cohérent avec les équations du bilan d'énergie.

Dans cette partie, on suppose que le fluide est incompressible et donc la masse volumique est une constante. Les éléments les plus importants dans la représentation bond graph du pompe sont des éléments RS du frottement entre la partie mécanique et la partie hydraulique et l'élément RS multi-point entre les trois parties pour représenter la conversion d'énergie dans la pompe.

5.2.1 L'élément RS du frottement



Fig.17. L'élément RS du frottement

La représentation bond graph de l'élément est donnée sur la figure 17. Cet élément représente la dissipation du frottement et il est aussi un générateur qui fournit une

puissance des forces de frottement au lien thermique. Donc les variables d'entrée sont la vitesse angulaire ω et la température T , et les variables de sortie sont le couple des force de frottement C_f et la puissance des forces de frottement W_f . On a

$$C_f = \begin{cases} |R| < 1 \Rightarrow \text{sign}(R) \cdot C_{f0} \cdot (1 - |R|) \\ |R| \geq 1 \Rightarrow 0 \end{cases} \quad (39)$$

$$C_f = C_f(R) = C_f(\omega) \quad (40)$$

$$W_f = C_f \omega = \Psi(\omega) \quad (41)$$

Donc on peut fixer la causalité de cet élément comme sur la figure 17.

5.2.2 L'élément RS multi-port de la conversion d'énergie

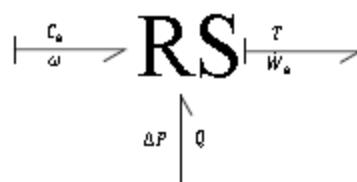


Fig. 18. L'élément RS multi-port de la conversion d'énergie

La représentation bond graph de l'élément RS multiport est sur la figure 18. Par rapport aux descriptions du système et des codes Modelica donnés par EDF, on a

$$\Delta P = \rho g h_n = E \alpha_u F H_d(P_n, H) g f(Q, \omega) \quad (42)$$

$$C_n = \frac{1}{\alpha_u} \frac{\partial \Delta P}{\partial \omega} = g(Q, \omega) \frac{\partial \Delta P}{\partial \omega} \quad (43)$$

$$W_n = C_n \omega = g(Q, \omega) Q_n \Delta P \quad (44)$$

Donc les variables d'entrée sont la température T , la vitesse angulaire ω et le débit massique Q et les variables de sortie sont la variation de la pression à travers la pompe ΔP , le couple hydraulique C_n , et la puissance hydraulique fournie par l'arbre de la pompe.

Si on considère que le fluide est compressible, alors les trois variables de sortie sont dépendantes des trois variables d'entrée. Et il y aura le conflit de causalité en rai-

son d'une boucle algébrique. On suppose donc que le fluide est incompressible et donc les trois variables de sortie sont dépendantes que de la vitesse angulaire ω et du débit massique Q .

La causalité de cet élément est fixée et elle est représentée sur la figure 18.

5.3 L'échangeur

5.3.1 Les dissipations R multi-ports dans la modélisation bond graph d'échangeur



Fig.19. La représentation bond graph de perte de charge entre les mailles dans la branche

On construit les dissipations R multi-ports (la figure 19) en respectant les pertes de charge entre les mailles dans la branche froide/chande. Et par rapport aux codes Modelica donnés par EDF, on sait qu'il y a cinq R multiports dans chaque branche et on a :

$$\Delta P_{a,i} = C_{a,i} \cdot 14423.2 \cdot \frac{1}{\rho_{a,i}} \cdot g m_{a,i}^{0.5} \cdot g u_{a,i}^2 \cdot \left(147247 + 1.54 \cdot \frac{(M-1)}{2} + 104.97 \cdot g m_{a,i}^{0.25} \right) \quad (45)$$

$$P_{a,i} = P_{a,i+1} + \Delta P_{a,i} \quad (46)$$

Et par rapport au bilan de masse, on sait que les flux du lien hydraulique sont égaux. Mais en fait, les deux températures sont toutes déterminées dans les sous-système C_c, donc sur le lien thermique, la causalité est fixée. Mais pour le lien hydraulique, il y a plusieurs possibilités de causalité.

5.3.2 Le sous-système C_c

Par rapport aux codes Modelica, on a l'équation du bilan d'énergie :

$$V_{a,i} \cdot \rho_{a,i} \cdot \frac{\partial (\bar{h}_{a,i})}{\partial t} = h_{a,i} \cdot Q_{a,i} - h_{a,i+1} \cdot Q_{a,i+1} \pm q_i \cdot S_{a,i} \quad (47)$$

Pour être cohérent avec l'équation ci-dessus, on construit un sous-système C_c comme sur la figure 20.



Fig. 20. La représentation sous graphique du sous-système C_c

Et donc on sait que le fonctionnement du sous-système C_c est de déterminer la température et le débit massique en utilisant le flux de chaleur et la pression. Donc les variables d'entrée sont le flux de chaleur et la pression et les variables de sortie sont la température qui est calculée par un tableau Eau_PH_T tab, c'est-à-dire la température est déterminée par un tableau non-linéaire et non-inversible et le débit massique qui est égal à 0 par rapport aux codes Modélia :

$$T = \text{Eau_PH_T}(P, H) \quad (48)$$

$$\dot{m}_e = 0 \quad (49)$$

Donc la causalité du sous-système C_c est fixée comme sur la figure 24.

5.3.3 La résistance thermique R

On construit des dissipations R modulées entre les liens thermiques pour représenter le transfert de chaleur entre deux branches. Comme on a

$$\varphi_i = K_i \cdot (T_{u,i} - T_{f,i}) \quad (50)$$

$$\frac{1}{K_i} = \frac{1}{\tilde{h}_{u,i}} + \frac{1}{\tilde{h}_{f,i}} + \frac{\epsilon_m}{\lambda_m} \quad (51)$$

$$\tilde{h}_{u,i} = 11.245 \cdot \varphi m_{u,i}^{0.3} \cdot \left(\frac{\mu_{u,i} \cdot c p_{u,i}}{\lambda_{u,i}} \right)^{0.4} \cdot \lambda_{u,i} \quad (52)$$

On peut déduire que

$$R_{resistance} = \frac{1}{K_i} = \phi(Q_e, Q_f, P_e, P_f, H_e, H_f) = \frac{T}{\varphi} \quad (53)$$

Donc on doit lier certains liens de signaux (en introduisant les $Q_e, Q_f, P_e, P_f, H_e, H_f$ dans les deux branches) pour moduler la dissipation R et en fait il y a pas de causalité fixée pour cet élément.

5.3.4 Les conditions limites de deux côtés de la branche froide

Dans les descriptions du système SRI, on sait qu'il y a des conditions limites de la température et de la pression à deux côtés de la branche froide. Donc en général, on doit ajouter une source d'effort à chaque côté de la branche froide. Mais dans ce cas, quand la causalité se propage sur le lien thermique de la branche froide, on ne peut pas mettre tous les R multi-ports de perte de charge en une même causalité. Mais en fait par rapport au méthode utilisé, les R multi-ports sont donc équivalentes. Donc on change la condition limite des deux côtés de la branche froide: on garde les deux températures imposées des deux côtés de la branche froide mais on remplace les deux pressions imposées des deux côtés de la branche froide par un débit massique imposé à l'entrée du fluide de la branche froide (Figure 21).

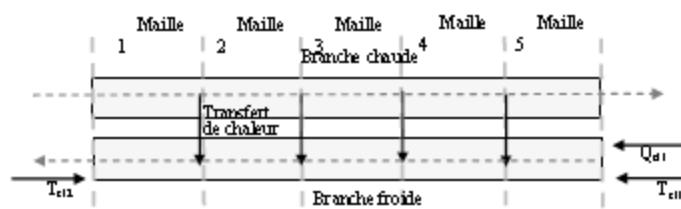


Fig. 21. Les conditions limites imposées sur les côtés de la branche froide dans l'échangeur

5.4 Les vannes



Fig. 22. La représentation boud graphique vanne du système SRI

Dans le système SRI, il y a plusieurs types de vanne: les deux vannes réglantes, la vanne TOR et la vanne utilisateur. Les vannes se comportent comme des parties de charge singulières commandables avec les équations de perte de charge différentes. En plus, les vannes sont toutes représentées par des dissipations R multi-ports donc on les analyse ensemble (Figure 23).

Pour les deux vannes réglantes et la vanne utilisateur avec l'ouverture fixée:

$$\Delta P \cdot C_v \cdot |C_v| = 1.733 \cdot 10^{12} \cdot \frac{\rho \cdot |\varrho|}{\rho^2} \quad (54)$$

Pour la vanne TOR:

$$\Delta P = \frac{k}{2 \cdot \rho} \cdot \rho \cdot |\varrho| \quad (55)$$

Donc on peut dire que les deux pressions sont dépendantes et l'une est déterminée par l'autre. Dans la même logique, on suppose que le fluide est incompressible pour éviter le conflit de causalité à cause de la boucle algébrique donc la masse volumique est une constante. En plus, on sait que les deux flux du lien hydraulique, Q_1 et Q_2 sont égaux et les deux flux du lien thermique, φ_1 et φ_2 aussi. Les deux efforts du lien thermique, T_1 et T_2 sont toutes déterminées par le tableau Ehu_PH_T.tab en utilisant les variables P_1, P_2, H_1 et H_2 . Donc pour la représentation des vannes, il y a plusieurs possibilités de causalité.

5.5 Les tubes

Il y a plusieurs tubes dans le système et on utilise des dissipations R multiports pour représenter leurs pertes de charge qui sont définis par

$$\Delta P = \frac{k}{2 \cdot \rho} \cdot \rho \cdot |\varrho| + \rho \cdot g \cdot \Delta z \quad (56)$$

La représentation bond graph du tube est même que celle de la vanne (Figure 22).

Donc les analyses structurelles du tube sont presque même que celles du tube; les deux pressions sont dépendantes et l'une est déterminée par l'autre. De la même façon, on suppose que le fluide est incompressible pour éviter le conflit de causalité à cause de la boucle algébrique donc la masse volumique reste une constante. En plus, on sait que les deux flux du lien hydraulique, Q_1 et Q_2 sont égaux et les deux flux du lien thermique, φ_1 et φ_2 aussi. Les deux efforts du lien thermique, T_1 et T_2 sont toutes déterminées par le tableau Ehu_PH_T.tab en utilisant les variables P_1, P_2, H_1 et H_2 . Donc pour la représentation des vannes, il y a plusieurs possibilités de causalité.

6 Conclusion

Une représentation bond graph du SRI est bien construite par rapport de la conception du système sur des critères dynamiques et énergétiques. Pendant la modélisation du bond graph, on ajoute certaines hypothèses supplémentaires sur le SRI pour être cohérent avec des codes Modelica donnés par EDF et en même temps pour simplifier les travaux du stage.

Les travaux du stage pourraient progressivement aider aux études sur le SRI dans le futur. À travers les analyses structurelles locales du système au niveau de modélisation, la tâche suivante est plutôt de faire des analyses globalement sur tout le système puis donner des précisions sur les ensembles compatibles de variables fixées et de variables à déterminer du système, notamment de calculer les entrées pour un état stationnaire spécifié du SRI et de rendre ainsi plus systématique la procédure de calcul d'un état stationnaire et représenter ainsi un réel gain de temps.

Bibliographie

1. FRIZZONI P., ENGELSON V. Modula: A unified object-oriented language for system modeling and simulation. Brussel: Springer-Verlag, 1998: 47-90.
2. Marqui-Faure, W. & Jardin, A. Borucki, W. (Ed.) Chp. 4: Bond graph and imaxx modelling for mechatronic system design, in Bond Graph Modelling of Engineering Systems, Springer, 2011.
3. Dauphin-Tanguy G., Les bond graphs, Hermès Science Publications, 2000.
4. Emadyuli PC. *Studying graph elements in physical systems theory*. J Franklin Inst, 1983.
5. Kame pp D. et Rosenbauer E., *System dynamics: a unified approach*, John Wiley & Sons, 1990.
6. Kame pp D., State variable and pseudo-bond graph for compressible thermo-fluid systems, *Trans ASME J. DYN Syst*, vol 01, p 201-204, 1979.
7. Emadyuli PC. *Thermodynamic bond graphs and the problem of thermal invariance*, J Franklin Inst, 1982.