
Rapport d'enseignement d'intégration

ST5 Ingénierie système pour le contrôle-commande des centrales nucléaires face aux grands enjeux de sûreté et de flexibilité des systèmes énergétiques décarbonés

Réalisé par le groupe no. 5 :

Matthieu GOMEZ

Elouan BONTRON

Mohamed BOUHAMED

Hugo VUHACHEUX

Tom SILVESTRE

Lucas PONCET

Table des matières

1	Ingénierie des exigences	1
1.1	environnement et parties prenantes	1
1.2	Exigences pour la Conception du Contrôleur	1
1.3	Variables à observer pour satisfaire ces exigences	1
1.4	Formalisation des exigences	2
1.5	Simulation de ces exigences	2
1.6	Formalisation des exigences temporisées et probabilistes	2
2	Conception de la commande des vannes	4
2.1	Régulation de la température	4
2.2	Limitation du débit dans les échangeurs et les pompes	4
2.2.1	Vérification de la vitesse dans les vannes	4
2.2.2	Détermination de la valeur d'ouverture minimale de bypass	4
2.2.3	Détermination de la valeur minimal d'ouverture des vannes en séries	5
2.2.4	Modèle de la commande de la vanne	6
2.3	Régulation du débit	6
2.3.1	Configuration à 2 échangeurs	6
2.3.2	Configuration à 1 échangeur	7
2.3.3	Application au modèle de commande des vannes	9
3	Vérification et analyse de la conception	10
3.1	Test de régulation	10
3.2	Guide d'exploitation	13
3.2.1	Limites d'emploi fonctionnel	13
3.2.2	Etude d'un cas particulier : scénario de "grand chaud"	15
4	Commande des pompes	17
4.1	Introduction	17
4.2	Présentation de l'automate en blocs fonctionnels	17
4.2.1	Présentation des blocs fonctionnels	17
4.2.2	Construction de la detection de défauts	18
4.2.3	Construction de l'automate de gestion de défauts	18
4.2.4	Pilotage de l'interface de commande	19
4.2.5	Mise en place d'une batterie de test et resultats	19
4.2.6	Conclusion	20
5	Conclusion	22

Chapitre 1

Ingénierie des exigences

L'objectif de cette partie est de prendre en main le système de refroidissement, et d'établir les exigences qu'il doit respecter.

1.1 environnement et parties prenantes

Environnement

Le système de refroidissement est connecté à un réservoir d'eau déminéralisée, dans laquelle il prélève de l'eau pour compenser les fuites dans le circuit SEK. Il est aussi relié à une source d'eau froide, dans laquelle l'eau réchauffée par le passage dans le circuit va passer et être refroidie au contact d'échangeurs. Elle va ainsi pouvoir passer dans les machines pour les refroidir. Au passage, l'eau se réchauffe et ainsi le cycle continue. Tous ceci est fait sous la supervision de l'opérateur, qui relève les informations et commande le circuit.

Parties prenantes

Les parties prenantes qui vont intervenir autour du SRI sont :

- **Propriétaire de l'installation** : Responsable de la fiabilité du système et de la disponibilité du refroidissement.
- **Autorités locales** : Régulent les impacts environnementaux, tels que la température des rejets d'eau.
- **Opérateurs et équipes de maintenance** : S'assurent du fonctionnement sûr et gérable des équipements.

1.2 Exigences pour la Conception du Contrôleur

Exigences pour la commande des vannes :

- *Contrôle de la Température* : Assurer que la température de l'eau du SRI reste entre 16°C et 30°C.
- *Différentiel de Température* : Maintenir une différence de 7°C entre la température d'entrée du SEN et la sortie du SRI.
- *Contrôle du Débit dans les Échangeurs* : Limiter la vitesse de l'eau dans les échangeurs à un maximum de 6 m/s.

Ces exigences garantissent un refroidissement stable, évitant la surcharge ou le sous-refroidissement du système.

Exigences pour la logique de commande des pompes :

- *Débit Minimum* : Maintenir un débit minimum de 700 m³/h avec deux pompes en service.
- *Procédure d'urgence automatique* : Démarrer une pompe de secours en 12 secondes en cas de défaillance d'une pompe.

Ces exigences préviennent les interruptions de débit de refroidissement, protègent les pompes contre les dommages et assurent la continuité du système.

1.3 Variables à observer pour satisfaire ces exigences

Variables pour la commande des vannes :

- Température du système (T_{SRI} : °C) : Permet de s'assurer de la conformité à la plage de refroidissement.
- Température de la source d'eau froide (T_{SEN} : °C) : Permet de s'assurer de la conformité avec les normes environnementales.

- Vitesse de l'eau dans les échangeurs (V_{fluide} : m/s) : Permet de s'assurer que la vitesse de l'eau dans les échangeurs soit suffisamment faible.

Variables pour le contrôle des pompes :

- Débit (q : m^3/h) : Vérifie la conformité avec les seuils de débit requis.
- Etat des pompes ($Pump1, Pump2, Pump3$: Booléens) : Vérifiez l'état de fonctionnement des pompes

1.4 Formalisation des exigences

Exigences non temporisées et non probabilistes :

- Température de l'eau du SRI :

$$16^{\circ}C < T_{SRI} < 30^{\circ}C \quad (1.1)$$

- Vitesse du fluide dans les échangeurs :

$$V_{fluide} < 6 \text{ m/s} \quad (1.2)$$

- Débit minimal pour les pompes :

$$q > 700 \text{ m}^3/h \quad (1.3)$$

- Différence de température avec l'extérieur :

$$\begin{aligned} & ((T_{SEN} < 22^{\circ}C) \text{ AND } ((T_{SRI} - T_{SEN}) \leq 7^{\circ}C)) \\ & \text{OR} \\ & ((T_{SEN} \geq 22^{\circ}C) \text{ AND } ((T_{SRI} - T_{SEN}) \leq 5^{\circ}C)) \end{aligned} \quad (1.4)$$

La première partie de l'équation correspond aux situations normales, et la deuxième aux situations de canicule.

1.5 Simulation de ces exigences

Une fois les exigences réalisées sur OpenModelica. On simule le modèle avec le scénario de base et l'on obtient le graphe suivant :

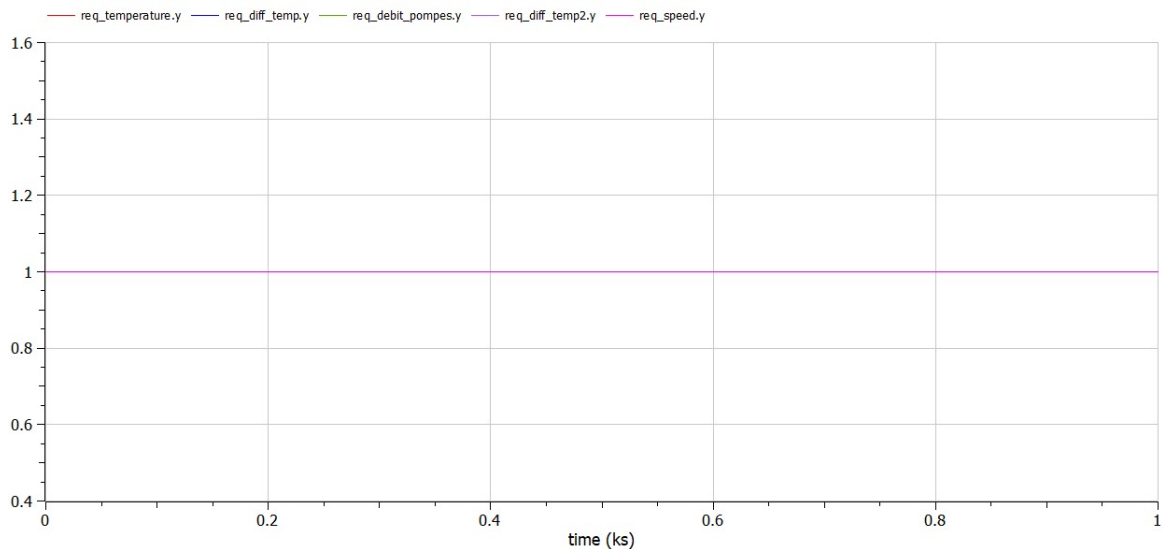


FIGURE 1.1 – Booléens des différentes exigences (débit, température, vitesse et différence de température)

On voit que ces exigences sont respectées dans le scénario de base ce qui est en accord avec les attendus. Reste désormais à asservir le système.

1.6 Formalisation des exigences temporisées et probabilistes

Pour formaliser et vérifier les exigences temporelles et probabilistes concernant la disponibilité du système de refroidissement (SRI), nous pouvons mettre en place une stratégie basée sur des simulations multiples en OpenModelica. Cette approche permet de prendre en compte les variations de conditions opérationnelles et de

détecter les défaillances potentielles lorsque les composants clés du système (pompes, échangeurs de chaleur, vannes) ne fonctionnent plus selon les spécifications requises.

Le processus se déroule comme suit :

1. Chaque simulation représente un scénario opérationnel différent, avec des variations dans les conditions afin d'évaluer le comportement du système dans diverses situations. Durant ces simulations, nous surveillons deux variables temporelles clés :
 - **Le temps pendant lequel l'équipement fonctionne en dehors des conditions nominales.**
 - **Le temps total de fonctionnement.**
2. Pour estimer la fiabilité du système, nous utilisons la formule de calcul du MTBF (Mean Time Between Failures) :

$$\text{MTBF} = \frac{\text{temps total de fonctionnement}}{\text{nombre de défaillances}}$$

Cela nous donne une mesure de la fiabilité en observant la fréquence des défaillances au fil des simulations.

3. Concernant la disponibilité, nous calculons le rapport du temps de fonctionnement en dehors de la plage normale sur le temps total de simulation, ce qui nous donne un indicateur du pourcentage de temps pendant lequel le système est opérationnel dans les limites normales.
4. Pour identifier une défaillance, nous vérifions les booléens associés aux autres exigences du système, qui indiquent si les conditions nominales sont respectées.
5. Enfin, nous pouvons lancer une série de scénarios consécutifs dans OpenModelica, où chaque scénario représente une condition opérationnelle unique. OpenModelica comptabilise les incidents rencontrés dans chaque scénario, permettant ainsi une évaluation statistique sur plusieurs cas de figure pour établir des probabilités de défaillance et la résilience globale du système.

Chapitre 2

Conception de la commande des vannes

2.1 Régulation de la température

2.2 Limitation du débit dans les échangeurs et les pompes

2.2.1 Vérification de la vitesse dans les vannes

Pour maximiser la vitesse dans les échangeurs, nous ouvrons totalement les vannes des échangeurs et nous fermons celle du circuit bypass. Dans la configuration deux échangeurs, la simulation nous renvoie ces deux graphiques pour la vitesse u et la sortie y du bloc *ReqSpeed* :

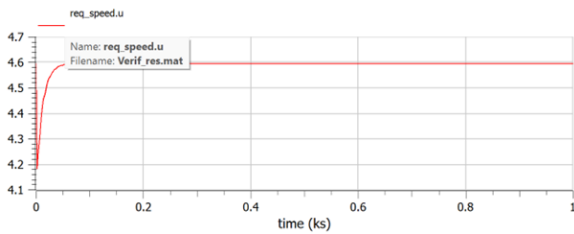


FIGURE 2.1 – Vitesse du fluide dans les échangeurs pour la configuration 2 échangeurs

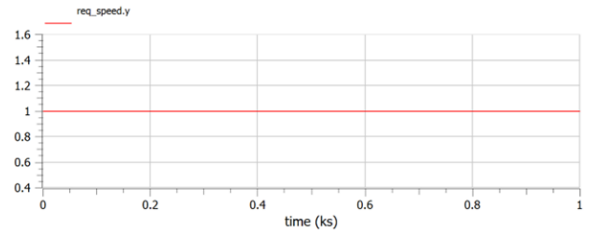


FIGURE 2.2 – Sortie du bloc *ReqSpeed* pour la configuration 2 échangeurs

Nous pouvons voir que la vitesse reste constamment en dessous de 6 m/s, donc le bloc *ReqSpeed* renvoie constamment une sortie à 1. Ainsi, lorsqu'on a 2 échangeurs, la condition de vitesse est toujours respectée.

Pour la situation à un échangeur, nous obtenons ces courbes :

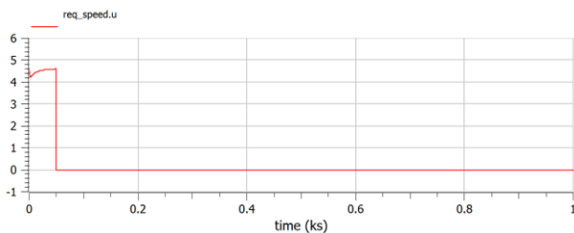


FIGURE 2.3 – Vitesse du fluide dans les échangeurs pour la configuration 1 échangeur

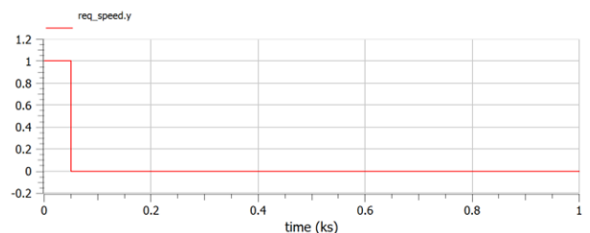


FIGURE 2.4 – Sortie du bloc *ReqSpeed* pour la configuration 1 échangeur

Nous pouvons voir que la vitesse passe rapidement au dessus de 6 m/s. Ainsi, lorsque l'on a que 1 échangeur, il faut imposer une ouverture maximale de la vanne de l'échangeur pour pouvoir respecter la condition de vitesse.

2.2.2 Détermination de la valeur d'ouverture minimale de bypass

Comme montré précédemment, la simulation à deux échangeurs ne nécessite pas d'ouverture de la vanne bypass pour respecter la condition sur la vitesse dans les échangeurs.

Cependant, la situation à un échangeur ne respecte pas cette condition. Pour trouver l'ouverture minimale de bypass à avoir, on met en place une rampe décroissante sur l'ouverture de la vanne bypass. On peut ainsi observer le booléen représentant la condition sur la vitesse au cours du temps :

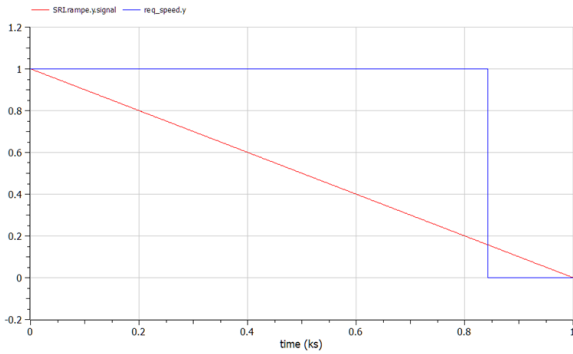


FIGURE 2.5 – Graphique illustrant l'évolution de la rampe au fil du temps et la vérification de la condition de vitesse.

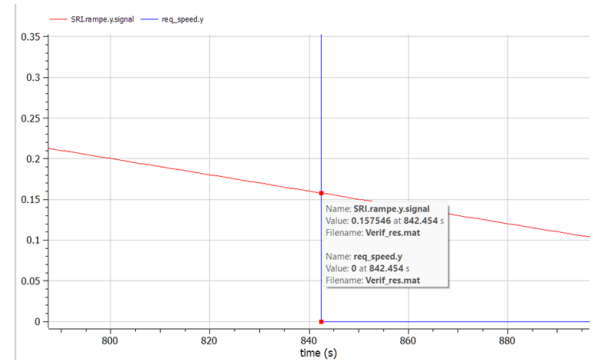


FIGURE 2.6 – Graphique montrant la valeur minimal d'ouverture de la vanne bypass

Ainsi, nous pouvons obtenir la valeur pour laquelle la vitesse passe au dessus de 6 m/s, c'est la valeur d'ouverture de la vanne bypass sous laquelle il ne faut pas passer, ainsi **ouv_bypass_min** = 0.157

2.2.3 Détermination de la valeur minimal d'ouverture des vannes en séries

On définit une constante égale à 0 pour l'ouverture de la vanne serie, et nous nous plaçons dans le scénario où un seul des échangeurs fonctionne pour vérifier l'ouverture minimum d'une vanne pour assurer un débit suffisant dans les pompes. Pour ce faire, nous utilisons encore une rampe décroissante sur l'ouverture de la vanne bypass et nous cherchons à partir de quand le débit devient inférieur à $700 \text{ m}^3/\text{s}$

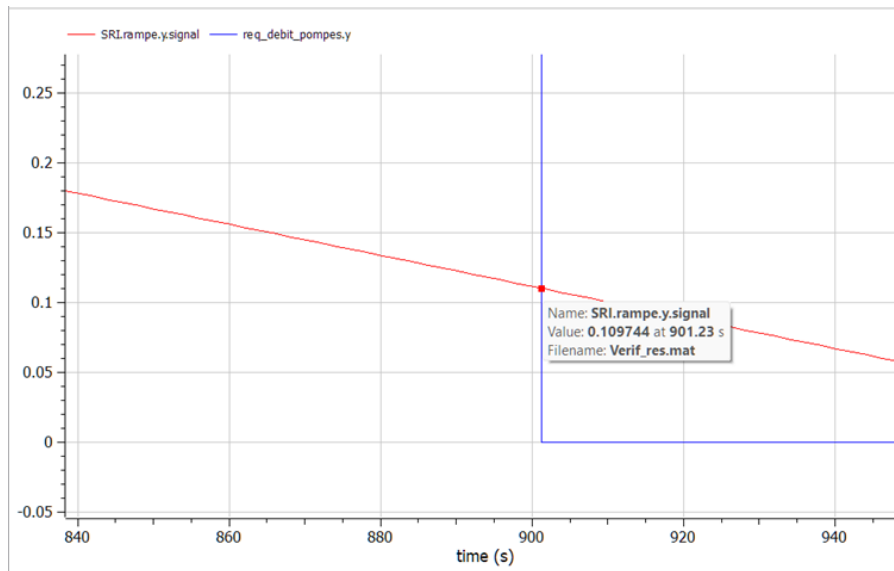


FIGURE 2.7 – Graphique montrant la valeur minimal d'ouverture pour une seule des vannes en séries

Pour une seule vanne on trouve ainsi **ouv_serie_min** = 0.11

Si maintenant les 2 vannes fonctionnent, on obtient :

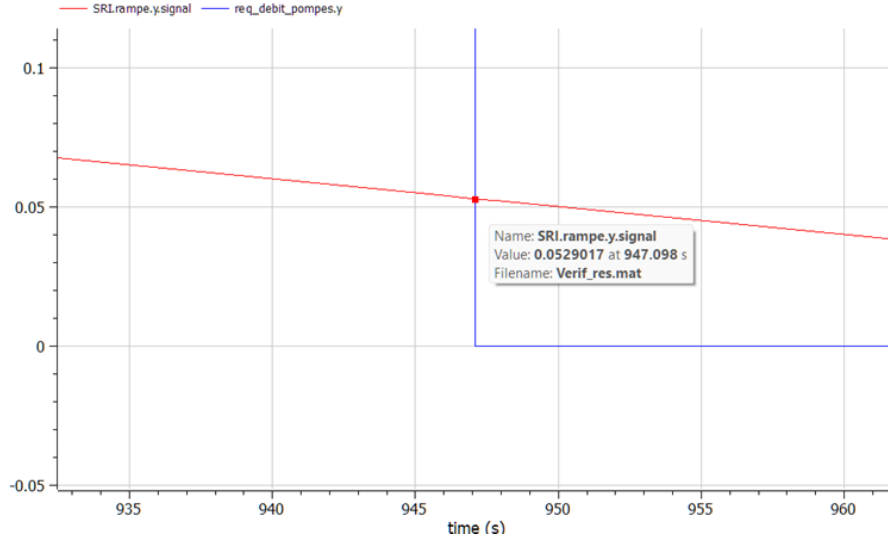


FIGURE 2.8 – Graphique montrant la valeur minimal d'ouverture pour les deux vannes en séries

Pour les deux vannes on trouve ainsi $\text{ouv_serie_min} = 0.053$

2.2.4 Modèle de la commande de la vanne

En plus de la commande en boucle fermé nous allons introduire des saturations plus restrictives que l'intervalle $[0; 1]$. Nous obtenons alors la commande suivante :

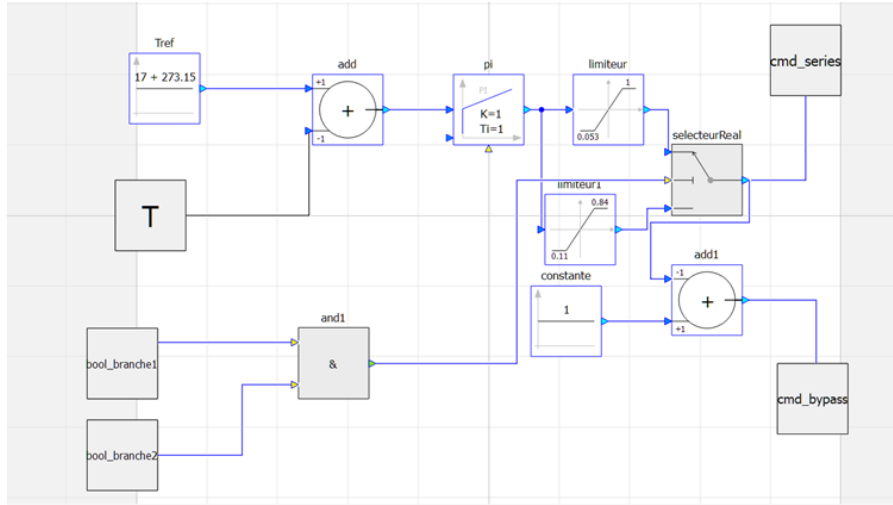


FIGURE 2.9 – Commande de la vanne avec les conditions limites

2.3 Régulation du débit

2.3.1 Configuration à 2 échangeurs

Calcul de CV_{tot}

Lorsque les vannes séries sont totalement ouvertes, on a $CV_s = 8000$, et lorsque la vanne bypass est fermée, on a $CV_{by} = 0$. Ainsi, on peut calculer

$$CV_{tot} = 2 \cdot \sqrt{\frac{8000^2 \cdot 3040^2}{8000^2 + 3040^2}} = 5683$$

Calcul de CV_{bymax}

Dans le cas de l'ouverture minimale des 2 vannes, nous avons calculé dans ?? que $ouv_serie_min = 0.053$, on peut donc calculer $CV_s = ouv_serie_min \cdot 8000 = 424$ Ainsi,

$$CV_{bymax} = 5683 - 2 \cdot \sqrt{\frac{424^2 \cdot 3040^2}{424^2 + 3040^2}} = 4843$$

Et donc $ouv_bypass_max = \frac{4843}{8000} = 60.5\%$

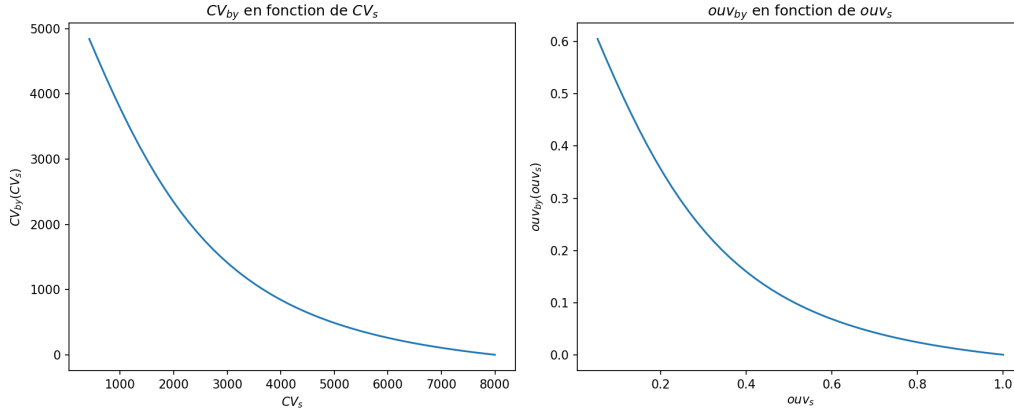


FIGURE 2.10 – Graphiques montrant la corrélation entre les ouvertures de vannes

Calcul des coefficients de l'interpolation

Posons $f(x) = a \cdot (1 - x)^3 + b$ avec a et b à identifier. Alors avec les conditions aux limites, c'est à dire dans le cas où les vannes séries sont totalement ouvertes ou ouvertes au minimum, nous avons :

$$\begin{cases} f(0.053) = 0.605 \\ f(1) = 0 \end{cases} \quad \text{D'où nous déduisons : } \begin{cases} a = 0.712 \\ b = 0 \end{cases}$$

Ainsi, nous pouvons tracer l'interpolation :

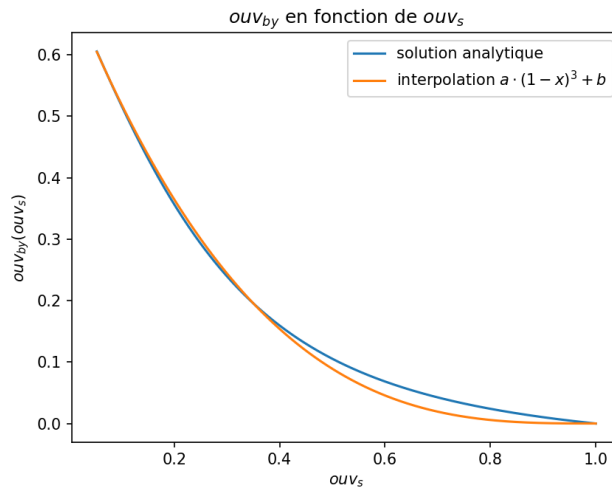


FIGURE 2.11 – Interpolation polynomiale de $ouv_{by}(ouv_s)$

2.3.2 Configuration à 1 échangeur

Le débit doit rester constant pour toute situation. Ainsi, nous gardons la même valeur de CV_{tot}

Calcul de CV_{bymax}

Dans le cas de l'ouverture minimale d'une vanne, nous avons calculé dans 2.2.2 que $ouv_serie_min = 0.11$, on peut donc calculer $CV_s = ouv_serie_min \cdot 8000 = 880$ Ainsi,

$$CV_{bymax} = 5683 - \sqrt{\frac{880^2 \cdot 3040^2}{880^2 + 3040^2}} = 4837$$

Et donc $ouv_bypass_max = \frac{4837}{8000} = 60.5\%$

Dans le cas de l'ouverture maximale de la vanne, nous avons calculé dans 2.2.2 que $ouv_bypass_min = 0.16$. Ainsi, l'ouverture de la vanne bypass doit qu au moins être égale à 16 % pour satisfaire les exigences de vitesse. Mais si on prend $CV_{smax} = 8000$, ce qui correspond au cas où la vanne est entièrement ouverte, on calcule :

$$CV_{bymin} = 5683 - \sqrt{\frac{8000^2 \cdot 3040^2}{8000^2 + 3040^2}} = 2841$$

Ainsi, on obtient une valeur de $ouv_bypass_min = \frac{2841}{8000} = 35.5\%$, ce qui est bien supérieur aux 16% requis. Les exigences sont donc satisfaites.

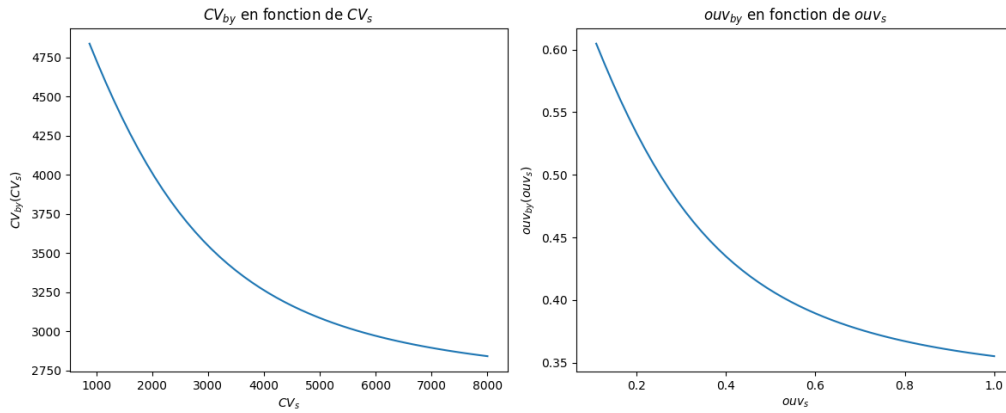


FIGURE 2.12 – Graphiques montrant la corrélation entre les ouvertures de vannes

Calcul des coefficients de l'interpolation

Toujours avec $f(x) = a \cdot (1 - x)^3 + b$, cherchons à identifier à identifier a et b . Alors avec les conditions aux limites, c'est à dire dans le cas où la vanne série est totalement ouverte ou ouverte au minimum, nous avons :

$$\begin{cases} f(0.11) = 0.605 \\ f(1) = 0.355 \end{cases} \quad \text{D'ou nous déduisons : } a = b = 0.355$$

Ainsi, nous pouvons tracer l'interpolation :

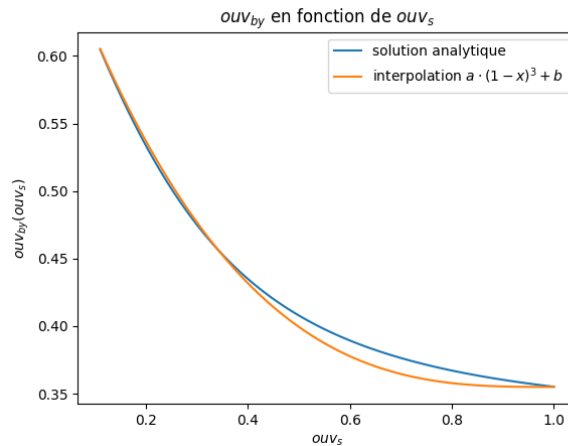


FIGURE 2.13 – Interpolation polynomiale de $ouv_{by}(ouv_s)$

2.3.3 Application au modèle de commande des vannes

On injecte les coefficients obtenus dans des fonctions polynome qu'on mets en place dans le module CmdVannes sur OpenModelica, comme le montre la figure suivante :

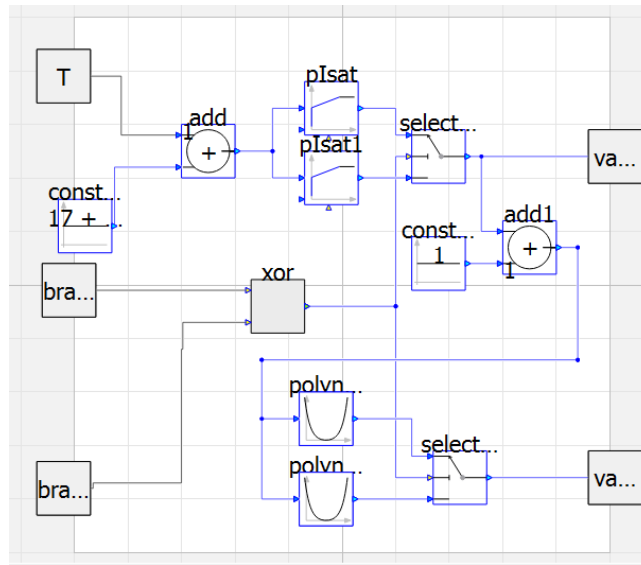


FIGURE 2.14 – module CmdVannes corrigé

Chapitre 3

Vérification et analyse de la conception

3.1 Test de régulation

Dans cette partie, nous allons vérifier que la régulation établie dans la partie précédente respecte les exigences établies en première partie. Pour cela nous allons soumettre notre régulation à plusieurs scénarios

Scénario 1

Le premier scénario est un ensemble d'évènement

- A 200 secondes, un client de 10MW est “déconnecté” du circuit.
- A 400 secondes, la pompe 2 est arrêtée.
- A 413 secondes, la pompe 3 est démarrée.
- A 500 secondes, une opération de nettoyage de l'échangeur 1 commence.
- A 700 secondes, un client de 10 MW est “connecté” au circuit.
- A 750 secondes, un client de 5 MW est “connecté” au circuit.

L'objectif est de s'assurer que le système vérifie les exigences lors d'un changement de pompe, une opération de maintenance d'un échangeur, et d'une augmentation de la puissance à refroidir. // Nous obtenons après simulation la courbe suivante pour la température

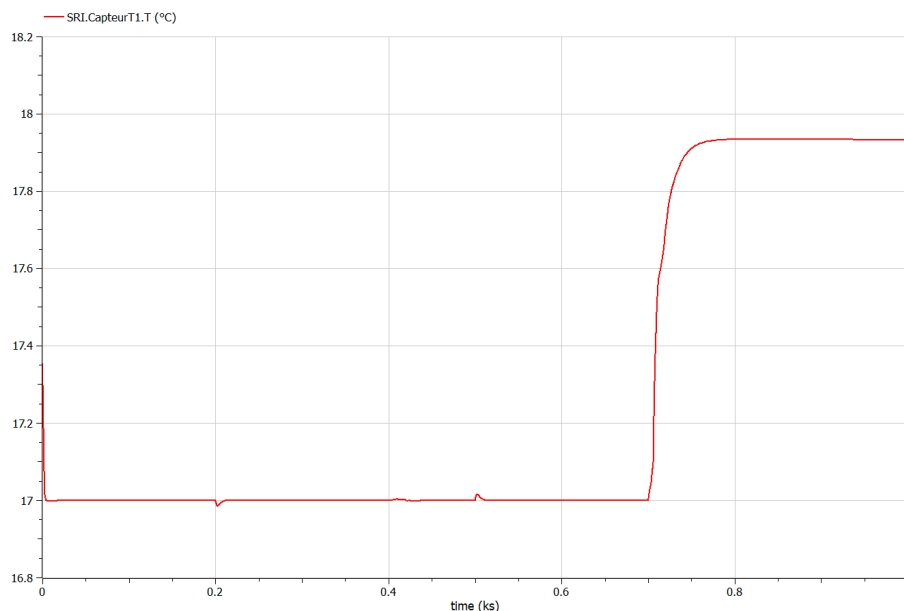


FIGURE 3.1 – Simulation de la température à la sortie des échangeurs pour le scénario 1

On remarque que le système supporte facilement la déconnexion du client de 10MW à 200 secondes car la température reste constante. De même pour le changement de pompe entre 400 et 413, la température reste à 17°C. Cependant, on note une augmentation de la température lorsqu'on déconnecte un des échangeurs à 500MW. Cette température ne parvient pas à revenir à 17°C et augmente encore lorsqu'on rajoute de nouveaux clients à 700 et 750 secondes. Ces résultats semblent cohérent avec le fonctionnement du régulateur : on souhaite maintenir le même débit dans les échangeurs, donc si on en enlève un, le refroidissement est moins performant.

Nous pouvons aussi vérifier que le débit reste constant sur le graphique suivant :

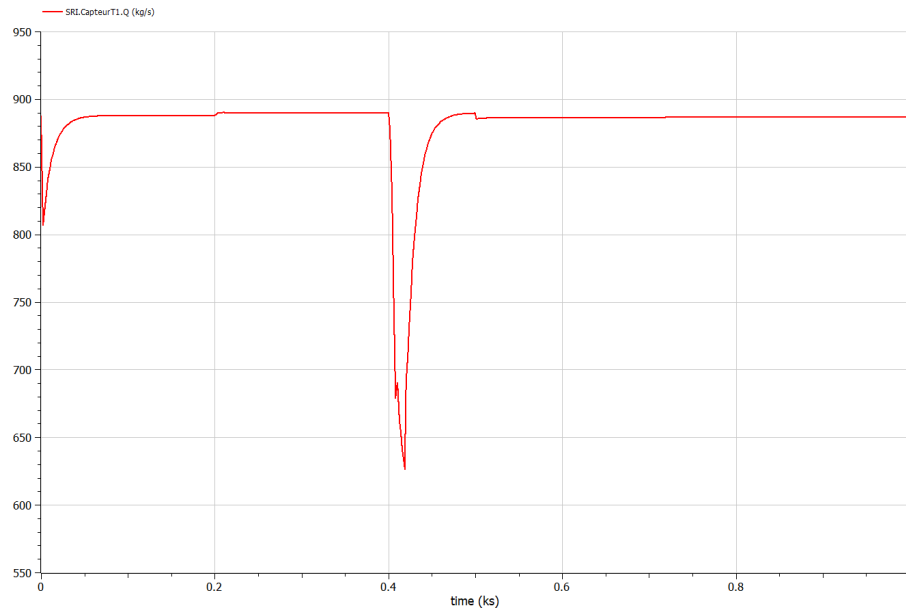


FIGURE 3.2 – Simulation du débit à la sortie des échangeurs pour le scénario 1

Malgré une chute à 400 secondes, le débit dans les échangeurs reste constant. Cette chute brutal s'explique par le changement de pompe, mais n'impacte pas la température (comme on a pu l'observer sur la courbe de température), car le temps de changement de pompe est suffisamment court, et permet donc un retour à la normale rapidement.

Enfin, on peut vérifier l'exigence sur la différence de température entre le prélèvement et le rejet dans la source froide pour l'échangeur 2 sur le graphique suivant :

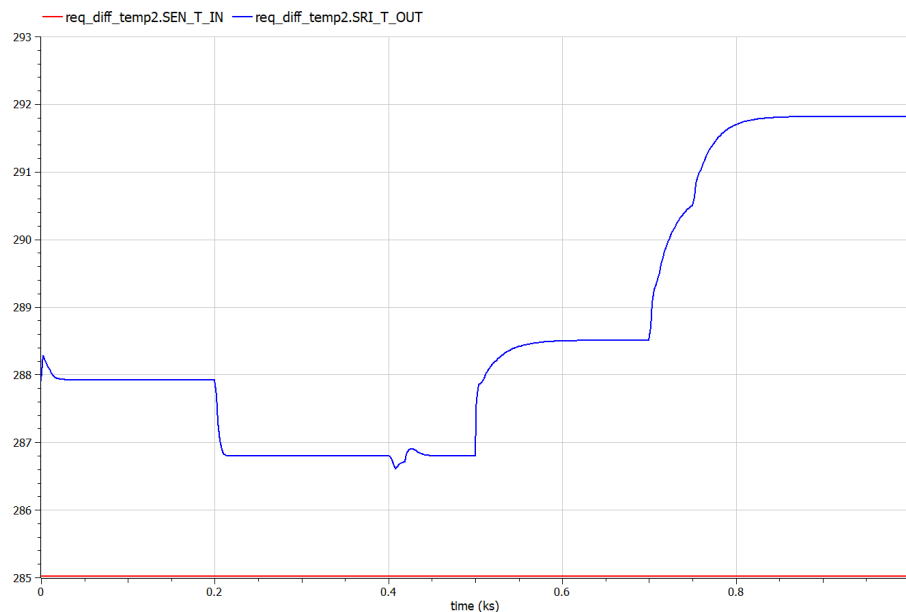


FIGURE 3.3 – Simulation de la température de l'eau prélevée (rouge) et rejetée (bleu) dans la source froide pour le scénario 1

On se place ici dans le cas où la température d'entrée est inférieure à 22°C. On remarque que l'écart entre l'entrée (rouge) et la sortie (bleu) reste bien en dessous de 7°C. L'exigence est donc bien vérifiée.

Scénario 2

Le deuxième scénario que nous avons mis en place est beaucoup plus théorique et nous permet de vérifier si notre modèle de commande arrive à imposer la température de sortie à 17°C. Le voici :

- A 200 secondes, l'échangeur 1 est déconnecté
- A 600 secondes, l'échangeur 1 est reconnecté

L'objectif ici est aussi de vérifier que le fonctionnement à deux échangeurs est identique avant la déconnexion et après la reconnexion.

Nous obtenons après simulation la courbe suivante pour la température

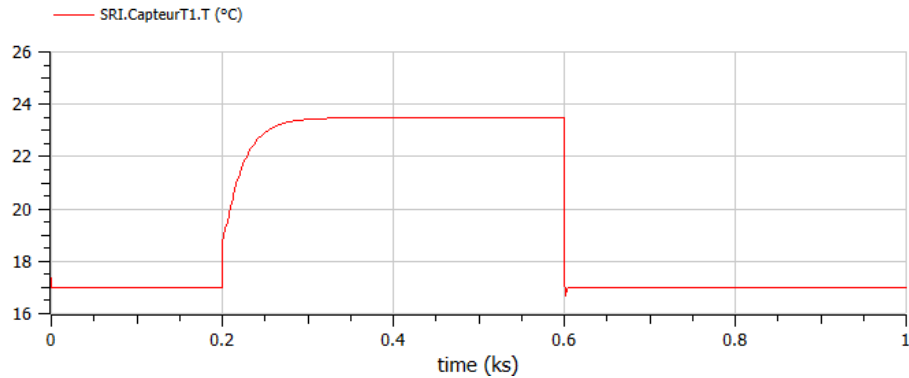


FIGURE 3.4 – Simulation de la température à la sortie des échangeurs pour le scénario 2

Nous voyons que la température n'arrive pas à atteindre 17°C lorsque juste une vanne est ouverte. C'est du au fait que la consigne de flux constant oblige la vanne bypass à rester ouverte au minimum à 0.355. Ainsi, meme si elle est ouverte au minimum, il y a toujours une quantité de chaleur qui passe par cette vanne et qui empêche le système de descendre à 17°C. On peut le voir sur le graphique suivant montrant l'ouverture de la vanne bypass lors du scénario 2, où lors de la deuxième phase la vanne bypass reste constante à sa valeur minimale :

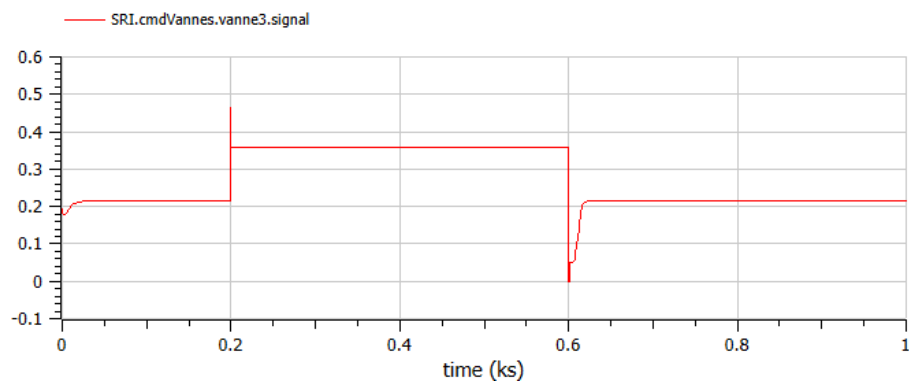


FIGURE 3.5 – Simulation de l'ouverture de la vanne bypass pour le scénario 2

Nous pouvons aussi vérifier que le débit reste constant avec ce graphique :

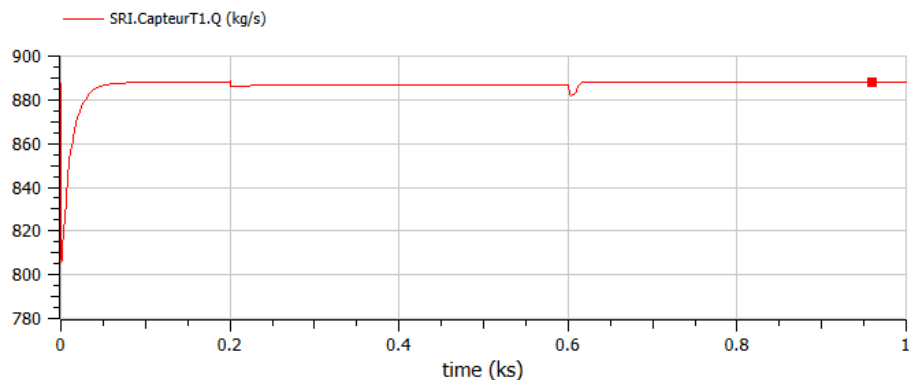


FIGURE 3.6 – Simulation du débit à la sortie des échangeurs pour le scénario 2

3.2 Guide d'exploitation

3.2.1 Limites d'emploi fonctionnel

L'objectif est de vérifier la capacité du système à maintenir la consigne de température de 17°C malgré une augmentation continue de la charge, et de déterminer les limites à partir desquelles les critères de régulation ne sont plus respectés.

— À 200 secondes, la charge commence à augmenter progressivement sous forme d'une rampe. La consigne de température est maintenue au début de la montée en charge.

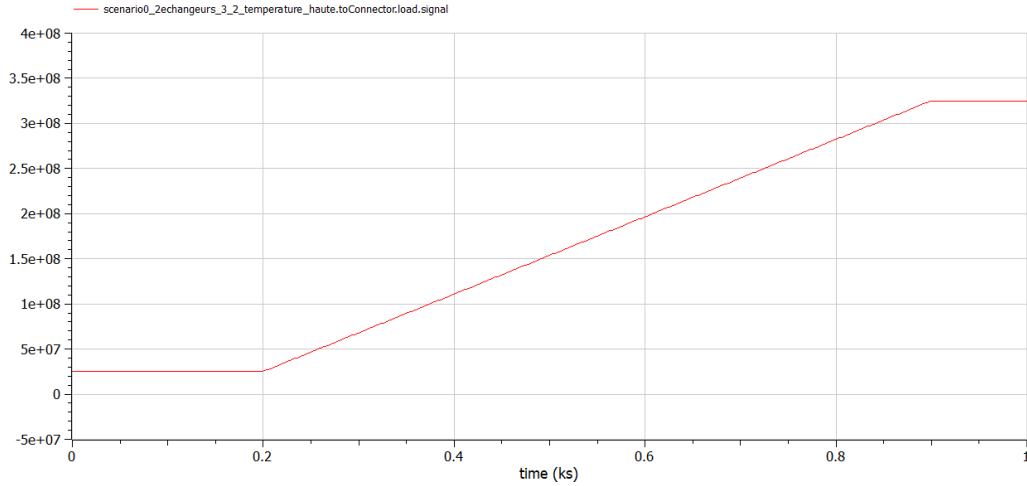


FIGURE 3.7 – scénario d'augmentation progressive de charge

- Pendant toute la simulation, le débit à la sortie des échangeurs reste constant.

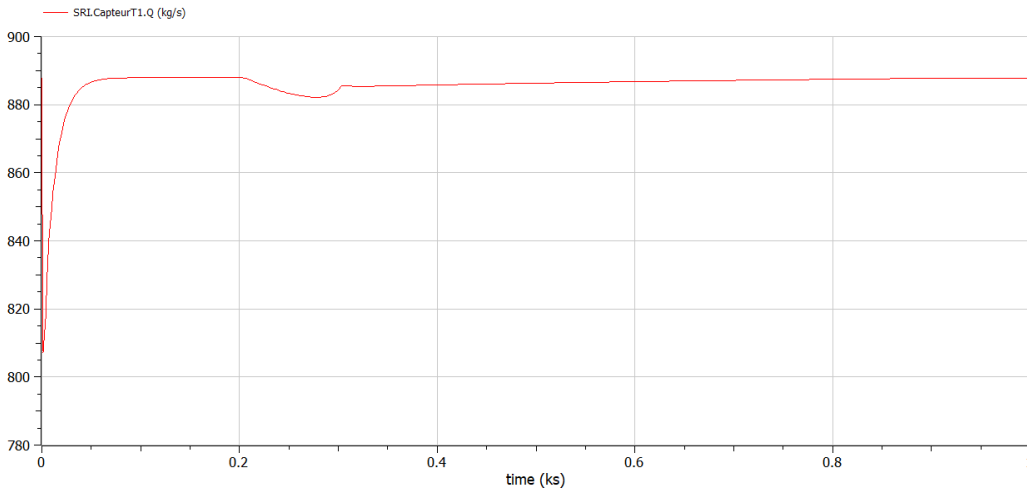


FIGURE 3.8 – Simulation du débit à la sortie des échangeurs pour le scénario d'augmentation progressive de charge

— À 300 secondes, avec une charge atteignant 67 MW, le système n'est plus capable de maintenir la température à 17°C. La température commence à dériver de la consigne, indiquant les limites de performance du régulateur pour la gestion de la montée en charge.

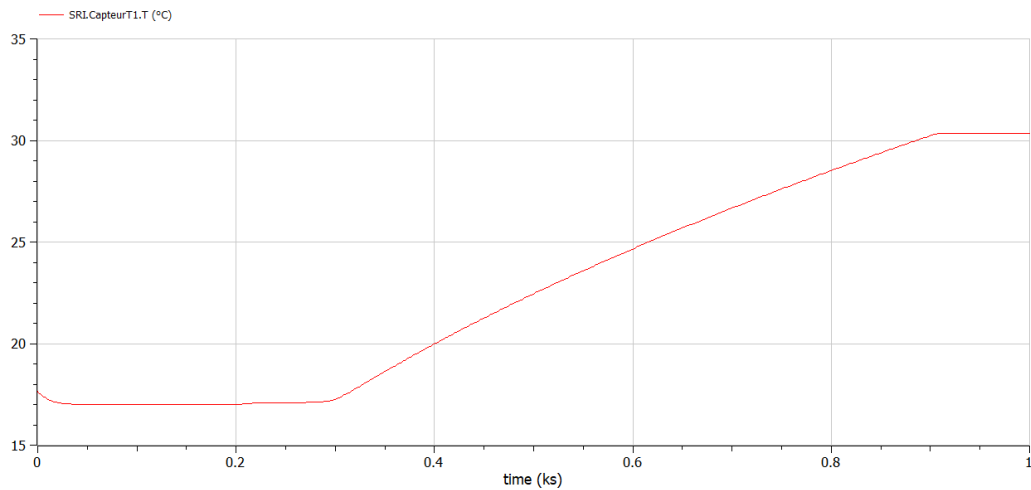


FIGURE 3.9 – Simulation de la température à la sortie des échangeurs pour le scénario d’augmentation progressive de charge

— Par ailleurs, à 288 secondes, avec une charge de 63 MW, la différence de température imposée sur la source froide dépasse la limite autorisée. Ce point marque la limite au-delà de laquelle le delta de température autorisé pour la source froide n’est plus respecté.

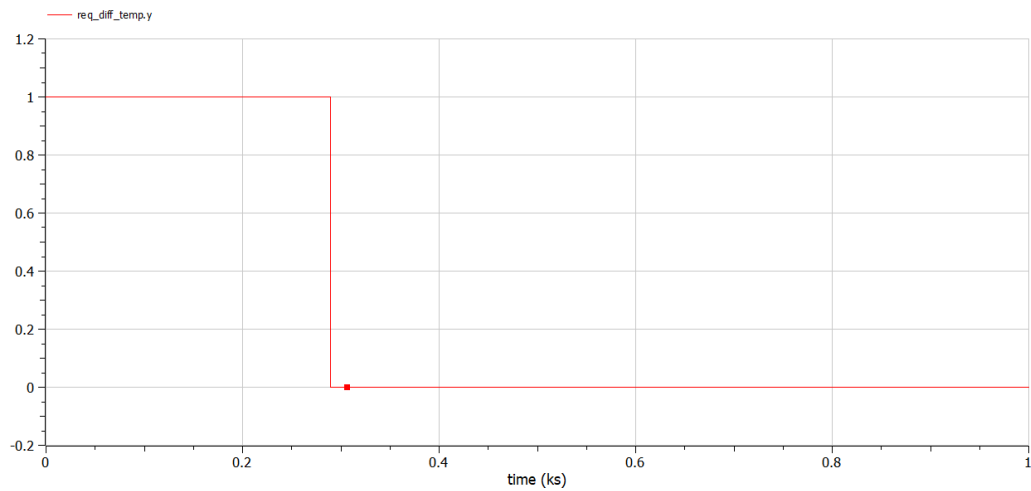


FIGURE 3.10 – Signal de l’exigence sur la delta température imposé sur la source froide.

— À 880 secondes, avec une charge de 317 MW, la température atteint 30°C, dépassant ainsi la limite haute autorisée dans la branche froide du circuit de refroidissement. Cela indique que le système ne parvient plus à dissiper la chaleur efficacement à ce niveau de charge.

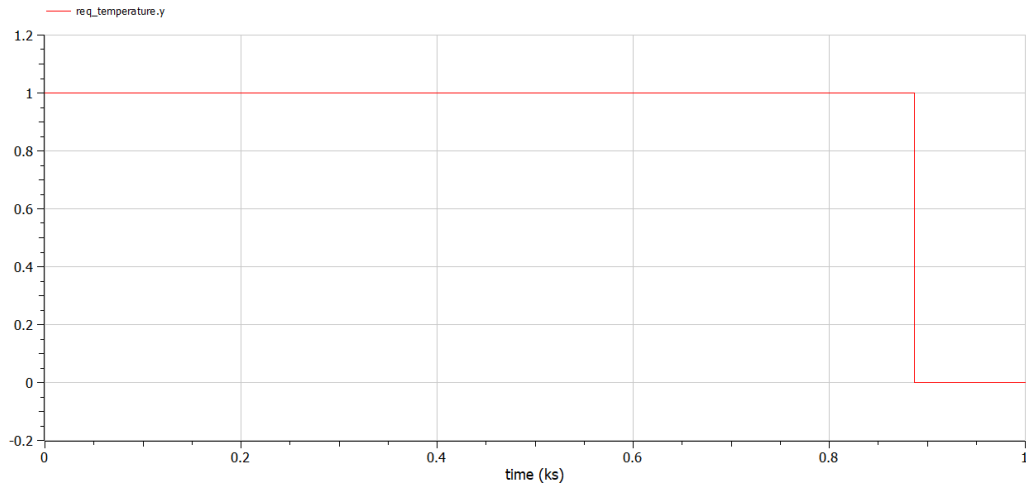


FIGURE 3.11 – Signal de l'exigence sur la température (i.e. 0 lorsque T dépasse 30°).

À partir de ces seuils, des ajustements dans le contrôle ou une amélioration de la capacité du circuit de refroidissement pourraient être nécessaires pour garantir le maintien des critères de performance sous des charges élevées.

3.2.2 Etude d'un cas particulier : scénario de "grand chaud"

On se place maintenant dans une situation de "grand chaud", où la température de la source froide est plus élevée et la de débit en provenance de la source froide. Pour modéliser un tel scénario, nous avons décidé de positionner la température de la source froide à 25°C et la pression entre l'amont et l'aval à 2 bar.

Afin d'assurer le bon fonctionnement de l'initialisation de la simulation numérique, nous gardons les valeurs initiales de température et pression, puis nous les chargeons à partir de 10 secondes. Après 100 secondes, le système est en régime permanent avec les nouvelles valeurs de température et de pression.

Comme sur le scénario précédent, à partir de 200 secondes, nous augmentons ensuite la charge à refroidir, modélisée sous la forme d'une rampe.

La première chose que l'on remarque est l'incapacité du système à tendre vers une température de 17°C dans l'échangeur dès le départ.

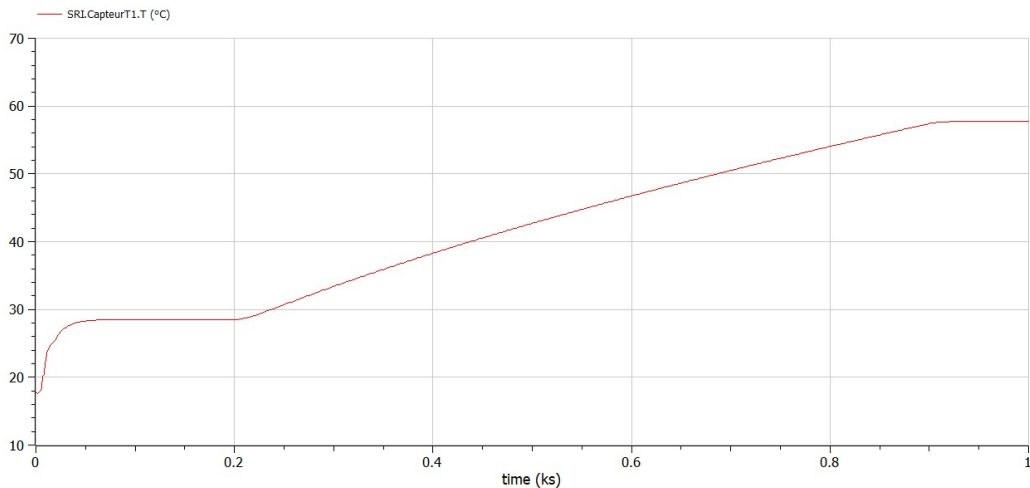


FIGURE 3.12 – Simulation de la température à la sortie des échangeurs pour le scénario de "grand chaud"

De plus, le système ne parvient pas à respecter l'exigence de différence de température.

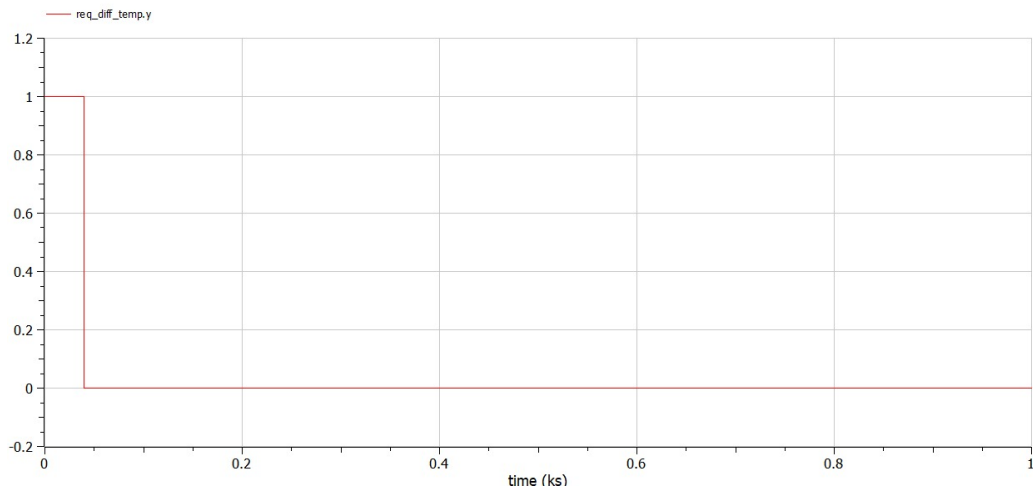


FIGURE 3.13 – Signal de l'exigence sur la delta température imposé sur la source froide.

Enfin, à 237 seconde (ce qui correspond à une charge de 41MW), l'exigence de température n'est plus respectée.

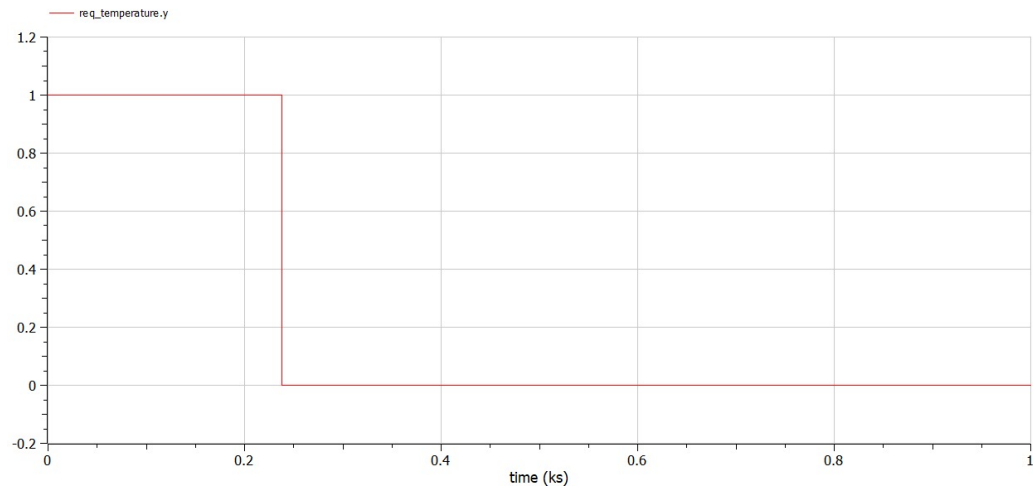


FIGURE 3.14 – Signal de l'exigence sur la température (i.e. 0 lorsque T dépasse 30°).

Ces résultats montre que le système n'est pas adapté pour un contexte de "grand chud". Cela risque de poser problème dans le contexte de réchauffement climatique actuel. En effet, avec l'augmentation du nombre et l'intensité des épisodes de canicule et sécheresse, les augmentations de température des sources froides et les diminutions de débit des rivières vont devenir de plus en plus fréquents. De plus, afin d'assurer un accès à l'eau pour les populations, les autorités locales risques de renforcer leurs exigences en terme d'utilisation d'eau. On peut donc imaginer qu'une modification du système de refroidissement est nécessaire pour faire face aux nouvelles exigences actuelles.

Chapitre 4

Commande des pompes

4.1 Introduction

Cette partie 4 porte sur la reprise en mode secours du système de pompes. Le système initial comprend trois pompes que l'opérateur peut contrôler manuellement pour garantir un débit minimal dans les échangeurs mentionnés dans les parties précédentes. L'objectif ici est de concevoir un automate qui surveille l'état des pompes et déclenche un mécanisme de secours en mettant en marche une pompe disponible lorsque l'une des pompes tombe en panne.

Plusieurs approches ont été envisagées : une approche combinatoire, consistant à évaluer tous les cas possibles et à imposer une solution pour chacun, mais en raison nos difficultés d'implémentation avec le langage ST, nous avons finalement opté pour une approche basée sur des blocs fonctionnels avec le langage Continuous Function Chart (CFC), orienté page. Notre approche s'est donc déroulée en plusieurs étapes, on prendra pour exemple la pompe 1 mais il en sera de même pour les pompes 2 et 3 par permutation circulaire.

4.2 Présentation de l'automate en blocs fonctionnels

4.2.1 Présentation des blocs fonctionnels

De manière préliminaire, il convient d'expliquer la fonction des blocs logiques TON et RS et des différentes fonctions logiques construites grâce à ces blocs PO_SWITCH, ST_1SM_BFE et IHM. Ainsi, toute la réflexion sur l'agencement des blocs les uns par rapport aux autres repose sur l'alternance de l'émission de fronts montants et descendants, leur détection et leur transcription en un signal booléen, ainsi que l'élaboration des conditions via les portes logiques.

Le bloc **RS** dans CODESYS est un **bistable Set-Reset** qui permet de contrôler une sortie avec deux entrées : **S** (Set) pour activer la sortie à **TRUE**, et **R** (Reset) pour la remettre à **FALSE**. Si les deux sont activés en même temps, la priorité va à **R**.

Le bloc **TON** dans CODESYS est un **temporisateur à retard à l'enclenchement** (Timer On Delay) qui active sa sortie après un délai spécifié lorsque l'entrée **IN** est mise à **TRUE**. Le délai est défini par le paramètre **PT** et la sortie **Q** passe à **TRUE** lorsque le temps est écoulé.

Le bloc **ST_1SM_BFE** est un bloc fonctionnel permettant de piloter un actionneur unidirectionnel avec deux commandes binaires (*marche/arrêt*) où la commande d'arrêt prend la priorité si les deux commandes sont actives (bloc RS). Un signal de défaut (*Fault*) permet de simuler une panne de l'actionneur.

Le bloc **PO_Switch** contrôle un actionneur unidirectionnel via une commande binaire (**P0**). Lorsque **P0** passe à **TRUE**, il génère un ordre d'activation (**Order_Enabled**), et lorsqu'il passe à **FALSE**, il génère un ordre de désactivation (**Order_Disabled**), en détectant les transitions grâce aux déclencheurs de front montants et descendants (**R_TRIG** et **F_TRIG**).

Le bloc **IHM** utilise trois instances indépendantes du bloc **PO_Switch** pour contrôler trois actionneurs. Chaque actionneur reçoit une commande binaire (**POi**) et génère des ordres d'activation et de désactivation correspondants pour les moteurs de la pompe via deux sorties (**POi_CMD_E**, **POi_CMD_D**). Les sorties activent ou désactivent les moteurs de manière indépendante, en fonction des commandes reçues par chaque entrée.

4.2.2 Construction de la detection de défauts

Il a été nécessaire d'identifier lorsqu'une pompe en marche présente un défaut. Pour cela, les connexions suivantes (Figure 4.1) ont été effectuées pour chaque pompe dans le fichier `PUMP_CTRL` (PRG). Ainsi, la variable `Default_1` prend la valeur du booléen `TRUE` si la pompe 1 présente un défaut lorsqu'elle est en marche (pour la signification des signaux se référer à l'annexe avec la définition des variables globales). Il est important de noter que l'information sur le défaut de la pompe n'est accessible que lorsque celle-ci est allumée par l'opérateur.

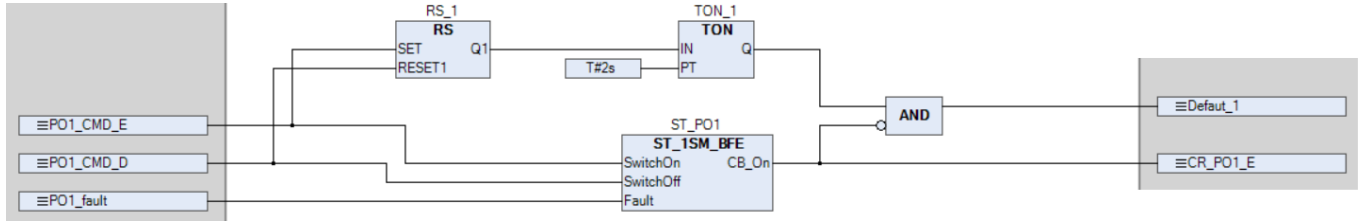


FIGURE 4.1 – Schéma de détection d'un défaut

4.2.3 Construction de l'automate de gestion de défauts

Pour la construction de notre automate, nous avons opté pour un parcours cyclique : nous examinons la pompe 1, puis, en fonction de la commande imposée par l'actionneur et de son état (défaut détecté ou non, la variable `Default_1` prend donc la valeur du booléen `TRUE` ou `FALSE`), nous décidons de commander l'ouverture de la pompe suivante. Ce raisonnement est appliqué de manière identique pour chaque pompe, de sorte que la structure de l'automate via les schémas-blocs reste la même, que l'on considère la pompe 1, 2 ou 3, moyennant des indices de variables différents. Il s'agit alors ensuite de vérifier si la pompe 2 est déjà allumée ou non. Si elle n'est pas allumée, on doit déterminer si une commande a été donnée pour l'activer, mais qu'elle reste inactive en raison d'un défaut. Dans le cas où cette pompe présente également un défaut, le seul choix restant est d'allumer la troisième pompe (si celle-ci n'est pas déjà en marche). C'est dans ce cas particulier que la variable `BackUp` prend la valeur du booléen `TRUE` et commande alors l'ouverture de la pompe 3.

Grâce à un agencement de différentes portes logiques OR et AND, ainsi qu'à l'utilisation de `Po_Switch`, TON et RS, on obtient le montage suivant.

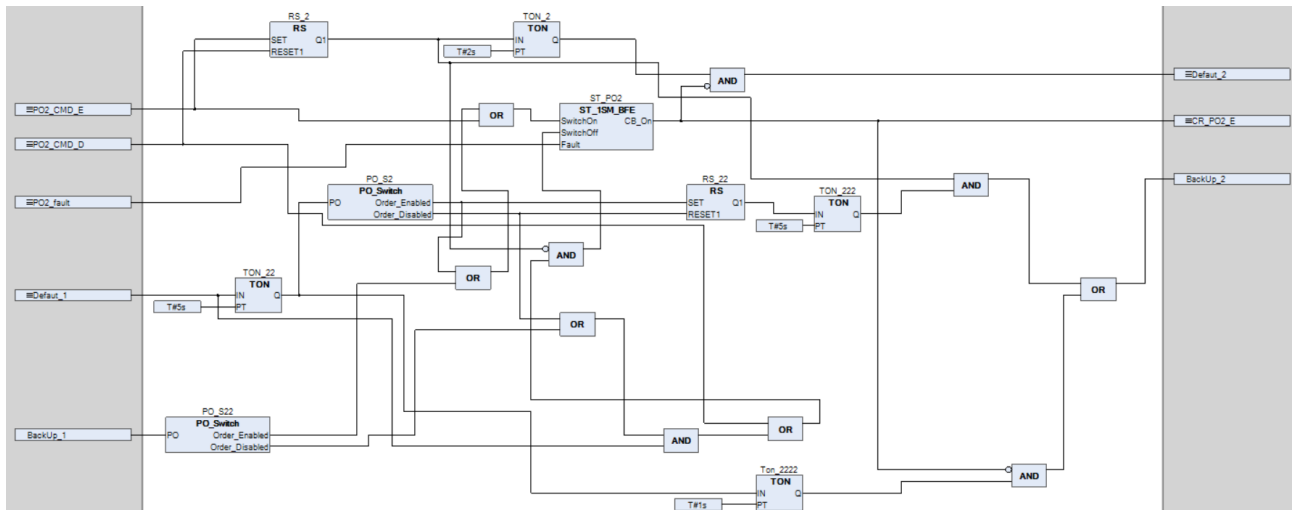


FIGURE 4.2 – Schéma de fonctionnement de l'automate de gestion de défauts

L'illustration du trajet des informations à travers les différents blocs est complexe en raison des nombreuses interconnexions. Ainsi, nous nous contenterons de vérifier les exigences du cahier des charges à travers la batterie de tests présentée dans la section suivante.

Notons que, lorsqu'une pompe est activée par l'automate de récupération en raison d'un défaut détecté sur une autre pompe, il serait peu réaliste que l'automate coupe l'une des deux pompes dès que ce défaut disparaît après un certain temps. En effet, dans un contexte réel, si une pompe présente un défaut, l'opérateur la coupe pour maintenance, afin d'éviter un redémarrage immédiat du débit dès la réparation.

4.2.4 Pilotage de l'interface de commande

Pour obtenir une vue concrète du fonctionnement interne du système, notamment des actions de l'automate, nous avons développé une interface permettant de commander l'ouverture des vannes et de déclencher manuellement le défaut (simulant ainsi un phénomène physique imprévisible). Par souci de visualisation, nous ajoutons également différents voyants pour chaque pompe (défaut détecté, pompe en arrêt ou en marche).

Voici l'interface de commande :



FIGURE 4.3 – Interface de commande des pompes

4.2.5 Mise en place d'une batterie de test et résultats

Ainsi nous pouvons procéder à une série de tests afin d'évaluer l'efficacité et la robustesse de notre automate. En raison de l'architecture identique de l'automate pour chaque pompe (avec, bien entendu, des signaux d'entrée et de sortie indexés différemment), ce rapport se concentrera sur les tests réalisés autour de la pompe 1 pour les essais impliquant une seule vanne, et autour des pompes 1 et 2 pour ceux impliquant deux vannes. Afin d'écrire les tests, les abréviations suivantes seront utilisées : P_i : pompe i , où $i \in \{1, 2, 3\}$ et D_i : défaut i , où $i \in \{1, 2, 3\}$.

Le cahier des charges :

- L'automatisme attend 5 secondes avant de confirmer un défaut d'une pompe.
- L'automatisme attend 7 secondes après la confirmation d'un défaut, pour démarrer la pompe de secours.
- Si la pompe de secours envisagée n'est pas démarrée dans les 2 secondes (par exemple, car cette dernière est également en défaut), l'automatisme enclenchera, le cas échéant, une autre pompe si disponible. Cette exigence n'a de sens que si le circuit est dans une configuration avec une pompe en service.

Voici la liste des tests :

Test	Descriptif	Attendu	Résultat
1	On actionne P1 puis on déclenche D1	Récupération par la pompe 2 au bout de 12 secondes	Récupération par P2 en 6 secondes
2	On déclenche D1 puis on actionne P1	Récupération par P2 en 12 sec	Récupération par P2 en 8 secondes
3	On actionne P1 avec un défaut dormant D2 puis on déclenche D1	Récupération par P3 en 12 sec	Récupération par P3 en 8 secondes
4	On actionne P1 avec un défaut dormant D3 puis on déclenche D1	Récupération par P2 en 12 sec	Récupération par P2 en 6 secondes
5	On actionne P1 avec 2 défauts dormants D2 et D3 puis on déclenche D1	Rien ne doit se passer	Rien ne se passe (ni P2 ni P3 ne peuvent récupérer)
6	Avec 2 défauts dormants D1 et D2 puis on actionne P1	Récupération par P3 en 12 sec	Récupération par P3 en 9 secondes

Test	Descriptif	Attendu	Résultat
7	On actionne P1 puis on déclenche D1 puis on enlève D1 en <5sec	Pas de récupération par le pompe 2, P1 doit reprendre son court en < 5 sec	P1 reprend son fonctionnement normal
8	On actionne P1 et P2 puis on déclenche D1	Récupération par P3 en 12 sec	Récupération par P3 en 11 secondes
9	On actionne P1 et P2 puis on déclenche D2	Récupération par P3 en 12 sec	Récupération par la P3 en 6 secondes
10	On actionne P1 et P2 puis on déclenche D1 et D2	Récupération par P3 en 12 sec	Récupération par P3 en 6 secondes
11	On actionne P1 et P2 avec le défaut dormant D3 puis D1	Aucune récupération possible	Rien ne se passe (P3 ne peut récupérer P1)
12	On actionne P1 et P2 avec le défaut dormant D3 puis D2	Seul P1 doit être active	Rien ne se passe (3 ne peut récupérer P2)
13	Avec 2 défauts dormants D1 et D2 puis actionne P1 et P2	Récupération unique par P3 en 12 sec	Récupération par P3 en 8 secondes
14	On actionne P1 et P2 puis on déclenche D1 et on enlève D1 en <5sec	Pas de récupération par P3, P1 doit reprendre son fonctionnement en < 5 sec	P1 reprend son fonctionnement normal
15	On actionne P1 et P2 puis on déclenche D2 et on enlève D2 en <5sec	Pas de récupération par P3, P2 doit reprendre son fonctionnement en < 5 sec	P2 reprend son fonctionnement normal
16	On actionne P1 et P2 puis on déclenche D1 et D2 et on enlève D1 en <5sec	P1 doit s'activer et récupération par P3 en 12 sec	Récupération par P3 en 6 secondes
17	On actionne P1 et P2 puis on déclenche D1 et D2 et on enlève D2 en <5sec	Récupération par P3 en 12 sec, P2 doit reprendre son fonctionnement en < 5sec	Récupération par P3 en 11 secondes
18	On actionne P1 P2 P3 puis on déclenche D1	Seul P3 doit fonctionner	Rien ne se passe (pas de pompe pour récupérer)
19	On actionne P1 P2 P3 puis on déclenche D1 et D2	Seul P3 doit fonctionner	Rien ne se passe (pas de pompe pour récupérer)
20	On actionne P1 P2 P3 puis on déclenche D1 et D2 et on enlève D1 en <5sec	P3 doit fonctionner et P1 doit reprendre son fonctionne en < 5 sec	P1 reprend son fonctionnement normal
21	On actionne P1 P2 P3 puis on déclenche D1 et D2 et on enlève D2 en <5sec	P2 doit reprendre son fonctionnement en < 5sec et récupération par P3 en 12 sec	P2 reprend son fonctionnement normal

4.2.6 Conclusion

La méthode de tests présentée précédemment semble efficace mais présente quelques limites. En effet, les attentes sont en grande partie respectées, notamment en ce qui concerne le comportement général : reprise d'une pompe en cas de défaut confirmé ou réactivation de la pompe en cas de défaut non confirmé. Les tests sont jugés concluants d'une part car, pour tous les scénarios envisagés, le comportement attendu est observé en terme d'actions. Cependant, les délais imposés par le cahier des charges ne sont pas respectés. Notre modèle s'avère plus rapide que les exigences requises.

Le principal problème rencontré ici concerne le respect des délais imposés par le cahier des charges. Par exemple, un problème observé concerne le temps de réaction en fonction de l'ordre d'activation de la pompe et de l'apparition du défaut. En effet, si la pompe est activée avant l'introduction du défaut, la réaction est

2 secondes plus rapide que dans le cas inverse. Toujours dans cette configuration, notre automate confirme le défaut au bout de 5 secondes uniquement lorsque la pompe est allumée après l'apparition du défaut.

Avec un temps de travail plus long, toutes nos pistes d'amélioration sont désormais définies : trouver le bon équilibre avec les blocs fonctionnels TON pour ralentir notre modèle et ainsi satisfaire les exigences du cahier des charges.

Chapitre 5

Conclusion

Ce rapport présente la conception, la simulation et les tests d'un système de contrôle-commande pour le refroidissement d'une centrale nucléaire, avec des objectifs de régulation du débit, stabilisation de la température et gestion des pannes des pompes.

Les résultats montrent que le système fonctionne bien en configuration avec deux échangeurs, où il parvient à maintenir la vitesse de l'eau en dessous de 6 m/s et le débit minimal requis. La régulation de la température est efficace, assurant un écart de 7°C entre l'entrée et la sortie du circuit, ce qui garantit un refroidissement adéquat dans cette configuration. Cependant, des limitations apparaissent dans le cas d'une configuration à un seul échangeur. Dans ce scénario, le système ne parvient pas à maintenir la consigne de température de 17°C, ce qui pourrait être un problème pour répondre aux exigences de refroidissement dans certaines conditions.

Certaines limites apparaissent également dans des scénarios de forte charge thermique et en situation de "grand chaud." Lorsque la puissance à refroidir augmente progressivement, le système atteint un point où il ne peut plus respecter la consigne de température ni la différence de température autorisée avec la source froide. Cette situation pourrait devenir plus problématique à mesure que les épisodes de chaleur intense se multiplient en raison du réchauffement climatique.

Concernant les pompes, la gestion des pannes est bien assurée dans la majorité des tests. En cas de panne, le système est capable de déclencher rapidement une pompe de secours pour garantir la continuité du refroidissement. Les délais d'activation sont globalement conformes aux exigences, bien que de petites améliorations pourraient encore affiner la précision du mécanisme. Cela permet de maintenir un débit continu dans le circuit, même en cas de défaillance.

En conclusion, le système répond bien aux exigences en conditions normales et assure un refroidissement fiable en cas de panne, mais il montre des limites en configuration à un seul échangeur et dans des contextes de forte charge thermique. Une adaptation serait recommandée pour renforcer la capacité du système à répondre à des conditions climatiques et opérationnelles plus contraignantes, afin de garantir une efficacité optimale en toutes circonstances.