

Modélisation et régulation d'un champ solaire en recirculation utilisant des réflecteurs linéaires de Fresnel

Ce chapitre présente les travaux de thèse portant sur la réalisation de modèles de champs solaires DSG utilisant des réflecteurs linéaires de Fresnel. Ces modèles sont utilisés pour mener des études dynamiques sur le champ solaire, notamment pour étudier l'impact de transitoires d'ensoleillement sur son fonctionnement. Une première partie décrit le dimensionnement d'un premier champ solaire, et la méthode utilisée pour parvenir à ce dimensionnement. Une deuxième partie est ensuite consacrée à une étude dynamique du modèle réalisé à partir du premier dimensionnement, une partie de l'étude se faisant sans régulation du champ solaire et une autre partie présentant la régulation modélisée. Enfin, une troisième partie traite d'un dimensionnement modifié du champ solaire et de sa modélisation par une approche différente, ainsi que la description d'une régulation proposée pour ce champ solaire.

Deux modèles simples de récepteurs Fresnel ont été développés et ajoutés à la librairie ThermoSysPro pour les besoins de la modélisation. Le premier modèle de récepteur est utilisé pour les travaux décrits dans la deuxième partie, et le deuxième modèle (plus réaliste dans la façon de modéliser le flux thermique et la surface d'échange) est présenté dans la troisième partie et est utilisée pour la simulation de journées complètes d'ensoleillement.

5.1. Dimensionnement d'un champ solaire LFR à génération directe de vapeur

L'architecture en recirculation est utilisée pour cette partie des travaux, car c'est ce mode de fonctionnement qui a été choisi pour le prototype AlsolenSup. En effet, le développement des modèles au début du travail de thèse s'est fait dans une optique d'application des travaux au prototype, utilisant la génération directe de vapeur et un champ solaire de type Fresnel. La modélisation s'est ensuite finalement orientée vers une installation plus proche de la taille de petites centrales existantes, en visant une puissance thermique de sortie d'environ 10 MWth.

Le dimensionnement a été réalisé en utilisant à la fois un modèle très simple de la génération de vapeur avec une feuille Excel et la macro XSteam [1], et un modèle dynamique Dymola plus complexe. Des itérations entre ces deux modèles ont permis de converger vers les caractéristiques de fonctionnement décrites dans les sections suivantes.

5.1.1. Puissance thermique et débits

Le design du champ utilise certaines contraintes que nous avons fixées, servant ainsi de base au dimensionnement :

<i>Grandeur</i>	<i>Valeur visée</i>
Irradiation incidente - point de dimensionnement	1000 W/m ²
Facteur de concentration géométrique	40
Puissance thermique - sortie surchauffeur	10 MW
Température - sortie surchauffeur	450°C
Pression – sortie de surchauffeur	85 bars
Titre thermodynamique - sortie vaporiseur	0.7

Température – eau alimentaire	100°C
Tableau 5-1 : Contraintes-objectifs de base pour le dimensionnement	

La température de sortie est choisie à 450°C, cette valeur représentant un bon compromis entre la haute température recherchée par les études récentes du domaine (500°C) [2], et les valeurs moins élevées des prototypes et centrales en fonctionnement actuellement (voir chapitre 2). Le titre visé en sortie de vaporiseur est choisi à 70%, pour les raisons évoqués au chapitre 2. A partir des contraintes résumées par le Tableau 5-1, on peut grâce à un raisonnement en stationnaire simple remonter aux paramètres principaux décrivant le champ solaire, en utilisant au besoin les équations de la section 2.2.1 du chapitre 2 :

- A partir de la température et de la puissance thermique voulue en sortie de surchauffe, on en déduit le débit de vapeur nécessaire ;
- En supposant un séparateur de phase parfait, et en utilisant la valeur du titre recherché, on en déduit le débit total dans le vaporiseur et le débit de recirculation, ainsi que le débit d'eau alimentaire ;
- Le niveau moyen de pression dans le vaporiseur et le titre de sortie donnent la valeur de l'enthalpie du fluide de sortie et de la phase liquide recirculée ;
- Les débits et enthalpies d'entrées et sorties du vaporiseur et du surchauffeur permettent de calculer les puissances thermiques échangées ;

Le tableau ci-dessous résume les grandeurs résultant de ce raisonnement :

<i>Grandeur</i>	<i>Valeur obtenue – modèle Excel simplifié</i>
Débit de vapeur - surchauffeur	3.06 kg/s
Débit alimentaire	3.06 kg/s
Débit de recirculation	1.31 kg/s
Débit total - vaporiseur	4.37 kg/s
Puissance thermique reçue - vaporiseur	6979 kWth
Puissance thermique reçue - surchauffeur	1712 kWth

Tableau 5-2 : Caractéristiques de fonctionnement obtenues par le modèle Excel simplifié

5.1.2. Configuration du champ solaire et des récepteurs :

La Figure 5-1 montre un schéma de principe du type de champ solaire choisi et permet d'explicitier le cadre de la modélisation. Le vaporiseur est divisé en 4 lignes parallèles alimentant un ballon séparateur commun. La phase liquide est recirculée en entrée du champ solaire par une pompe de recirculation, et la vapeur alimente le surchauffeur (une seule ligne).

Ce design à plusieurs lignes parallèles est préféré à celui d'une seule longue ligne pour le vaporiseur car il offre l'avantage d'une meilleure compacité, puisque la ligne de surchauffe a une longueur proche de celle d'une ligne de vaporiseur. Le Tableau 5-2 montre en effet qu'il y a un facteur 4 entre la puissance thermique à apporter au vaporiseur et celle à apporter au surchauffeur. On comprend alors que pour avoir une longueur globalement équivalente entre les deux sections du champ solaire, une configuration comportant 4 lignes de vaporiseur soit retenue.

Le tableau ci-dessous résume les paramètres retenus pour les deux types de récepteurs :

<i>Paramètre du récepteur</i>	<i>Vaporiseur</i>	<i>Surchauffeur</i>
Nombre de lignes	4	1
Nombre de tubes par récepteur	7	3
Diamètre tube	22.5 mm	42.906 mm

Longueur tubes et ligne	257 m	234 m
Surface d'échange obtenue	508.6 m ²	94.6 m ²
Flux échangé	20346,2 kW	3784.9 kW

Tableau 5-3 : Paramètres choisis pour le dimensionnement des récepteurs

La surface d'échange calculée est la surface totale extérieure des tubes, et le flux échangé est calculé à partir de cette surface et du rayonnement direct concentré. On fait donc ici l'hypothèse très simplificatrice que l'échange thermique se fait sur la totalité de la surface extérieure des tubes, et que le rendement thermique et optique est de 100%.

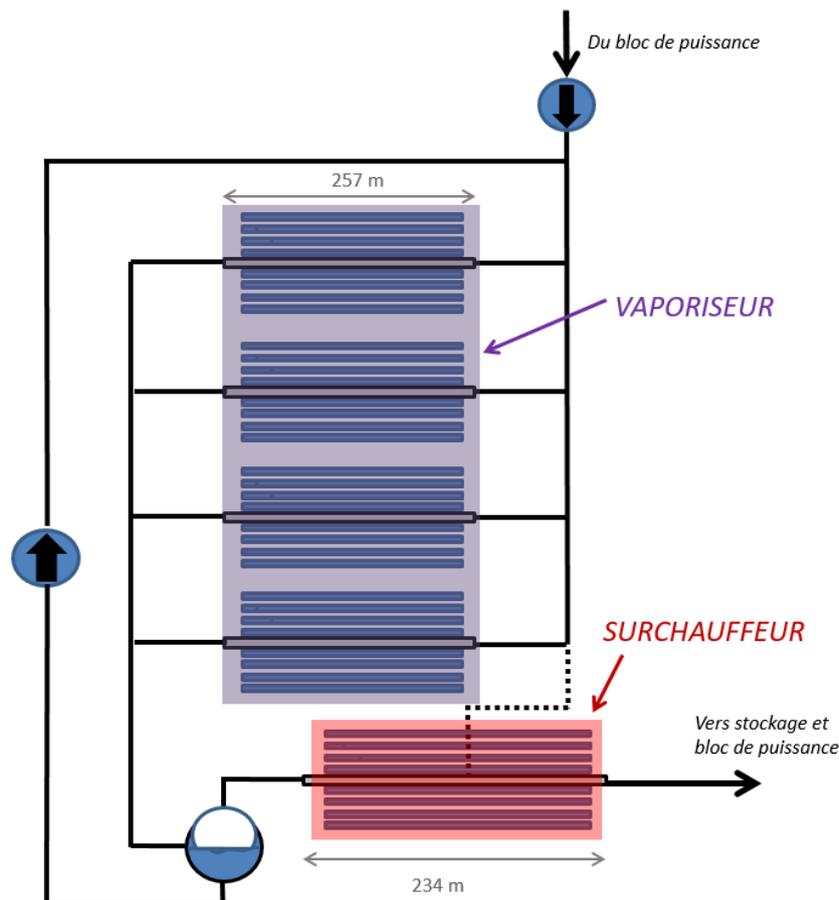


Figure 5-1 : Schéma de principe du champ solaire Fresnel dimensionné modélisé



Figure 5-2 : Schématisation des récepteurs du vaporiseur (gauche) et du surchauffeur (droite)

La Figure 5-2 montre une schématisation des deux récepteurs dimensionnés pour le champ solaire.

En comparant les deux tableaux précédents, on voit que la puissance thermique qui doit être absorbée par le fluide (Tableau 5-2) est d'environ 35-40% de la puissance « idéale » reçue par les tubes, calculée comme décrit ci-dessus (Tableau 5-3). Ce rendement est jugé acceptable pour un dimensionnement, considérant les éléments suivants :

- L'effet cosinus dû à l'angle incidence réduit l'irradiation incidente effectivement reçue ;

- Les pertes optiques du champ et des réflecteurs (réflectivité, facteur d'interception, pertes de fin de ligne, erreur de visée, etc.) réduisent le flux incident sur le récepteur ;
- Les pertes optiques et thermiques des récepteurs réduisent le flux absorbé par les tubes.

Pour pouvoir utiliser des lignes de vaporiseur de même longueur que le surchauffeur, une configuration à plusieurs tubes est utilisée dans le récepteur. Le tableau ci-dessous la compare à une configuration à un seul tube :

<i>Configuration</i>	<i>7 tubes par ligne</i>	<i>1 tube par ligne</i>
Débit unitaire de ligne	1.09 kg/s	1.09 kg/s
Diamètre de tube	0.0225 m	0.06 m
Longueur	257 m	700 m
Surface totale d'échange	508.6 m ²	527.8 m ²
Puissance thermique – vaporiseur	20346 kW	21112 kW
Vitesse moyenne de fluide	0.81 m/s	0.79 m/s

Tableau 5-4 : Comparaison des architectures pour le récepteur du vaporiseur

On voit qu'en considérant le même débit unitaire de ligne, il faut avec la configuration à un seul tube une longueur de ligne de 700m pour obtenir la même surface d'échange qu'avec 7 tubes, et un diamètre d'environ 6cm pour conserver la même vitesse de fluide. Un design à 7 tubes est donc choisi pour conserver l'architecture à 4 lignes de vaporiseur de longueurs équivalentes à la ligne de surchauffeur.

5.1.3. Tuyauterie externe aux récepteurs

La figure ci-dessous schématise le dimensionnement choisi pour la tuyauterie externe aux récepteurs :

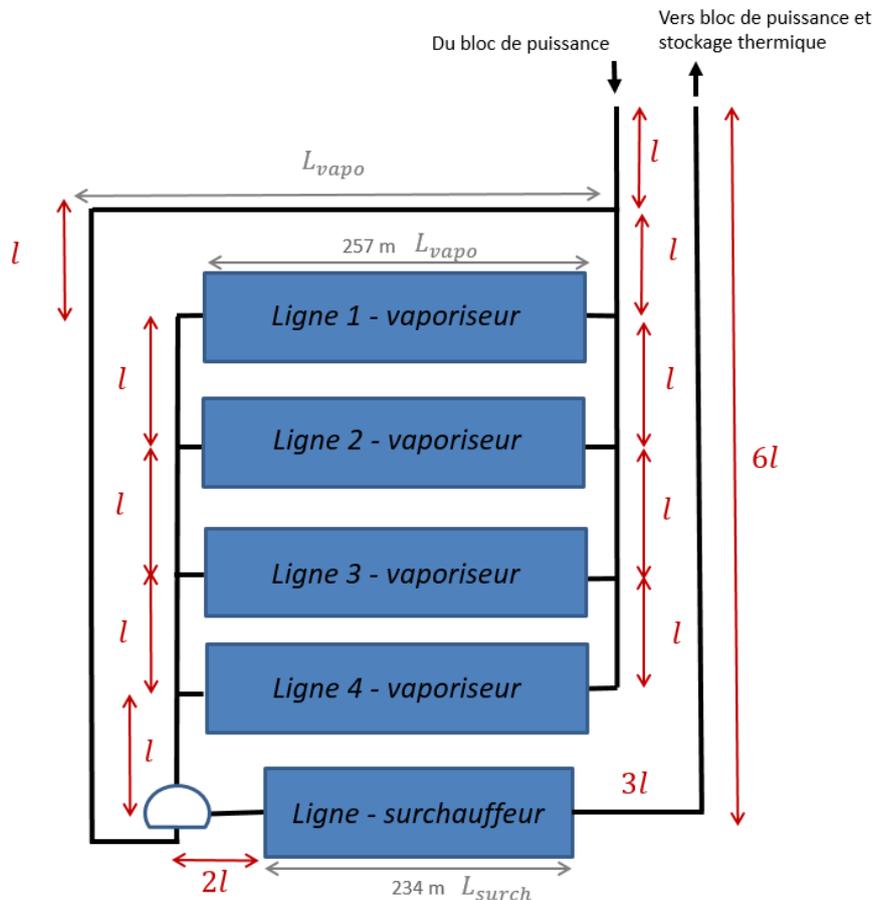


Figure 5-3 : Dimensionnement de la tuyauterie externe aux récepteurs

Ce dimensionnement permet de définir une longueur de tuyauterie associée au vaporiseur et extérieure aux récepteurs, et son équivalent pour le surchauffeur. Cela permet également de définir le nombre de singularités (coudes, collecteurs, etc.) pour l'ensemble du champ solaire. La longueur l schématisée sur la Figure 5-3 est définie comme la distance séparant deux lignes du vaporiseur, choisie ici à 20 mètres. On calcule ensuite la longueur de la tuyauterie en fonction de cette longueur. Les paramètres calculés pour la tuyauterie externe sont résumés par le tableau suivant :

	<i>Vaporiseur</i>	<i>Surchauffeur</i>
Tuyauterie externe - longueur	467m	220m
Collecteurs – entrée/sortie de récepteurs	8	4
Jonctions en « T »	6	0
Coudes	6	7

Tableau 5-5 : Tuyauterie externe aux récepteurs et singularités du champ solaire

Les collecteurs sont les composants qui répartissent ou rassemblent les débits entre la tuyauterie et les récepteurs multi-tubes du champ solaire. Ces composants génèrent des pertes de charge, raison pour laquelle il est important de les considérer dans le dimensionnement, ainsi que les coudes et les jonctions en « T ».

Les réflecteurs du champ solaire seront considérés dans un dimensionnement plus évolué plus loin dans ce chapitre, en utilisant le facteur de concentration géométrique et la surface de la fenêtre pour calculer la surface des réflecteurs.

5.2. Modélisation et étude dynamique du champ solaire

5.2.1. Modèle global et conditions limites

Le champ solaire a été modélisé en utilisant la bibliothèque Modelica ThermoSysPro, décrite dans le chapitre 4. La figure ci-dessous montre les composants modélisés :

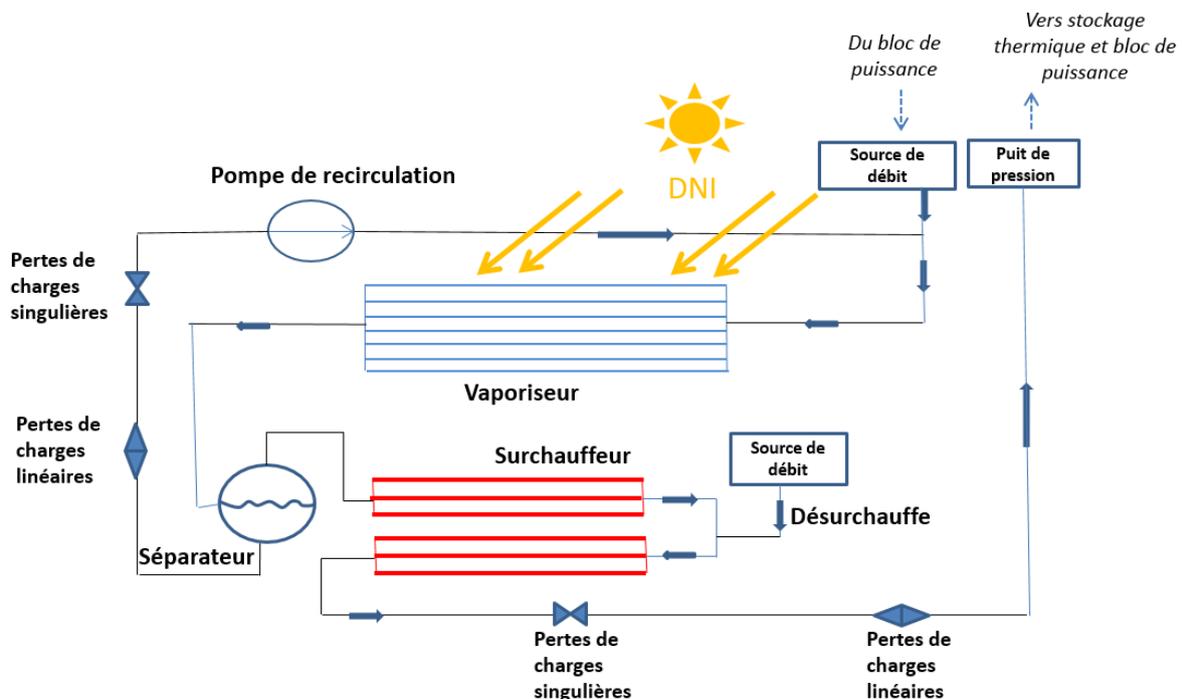


Figure 5-4 : Schématisation globale du modèle et de ses composants. Le surchauffeur

Le vaporiseur et le surchauffeur sont modélisés par la connexion d'un modèle optique connecté à un modèle de paroi et à un modèle d'écoulement diphasique. Nous ne détaillons pas ici le modèle de paroi et de l'écoulement diphasique, car cela est fait dans le chapitre 6 consacré à la modélisation d'un prototype cylindro-parabolique. Le modèle optique utilisé ici est celui d'un récepteur de type Fresnel.

Le séparateur diphasique est modélisé par un ballon dynamique de forme verticale et cylindrique. Il s'agit du modèle Modelica *DynamicDrum* (Bouskela, El-Hefni) du package WaterSteam/Volumes de ThermoSysPro. Les deux phases sont considérées de manière séparée, avec la phase liquide au fond du ballon. Chaque phase est modélisée par deux équations dynamiques de conservation de masse et d'énergie, en considérant les différents ports fluide du modèle et en considérant un échange de masse et d'énergie entre les deux phases. L'échange de masse entre les deux phases se fait par vaporisation du liquide vers la vapeur ou de la condensation de la vapeur vers le liquide, phénomènes décrits par deux équations. L'échange d'énergie, décrit par une équation supplémentaire, se fait via un simple transfert thermique lorsqu'un déséquilibre existe entre les deux phases. Ces deux phases échangent également chacune de l'énergie thermique avec la paroi du ballon, ce qui donne au modèle deux équations supplémentaires. Ces équations du modèle ne sont pas décrites ici, mais on pourra consulter le code Modelica au besoin, puisque la librairie est disponible sur demande en open-source.

Il est intéressant de noter que cette approche de modélisation pour le séparateur de phase est différente des autres études impliquant la modélisation d'un champ solaire DSG en recirculation [3]–[5]. En effet, ces études ne semblent pas modéliser l'interaction entre les phases dans le ballon, mais simplement la séparation des deux et une variation dynamique du volume. L'approche que nous avons utilisée ici décrit ces interactions et permet notamment de modéliser le phénomène de « flash », qui est la vaporisation d'eau saturée dans le ballon lors des chutes de pression.

La condition limite pour modéliser l'eau alimentaire en provenance du bloc de puissance et l'eau injectée pour la désurchauffe est une source de débit, à laquelle on impose une enthalpie spécifique. En sortie du champ solaire, la condition limite est une valeur de pression imposée. Le modèle optique utilise comme condition limite le DNI.

La figure ci-dessous montre la structure du modèle pour un récepteur :

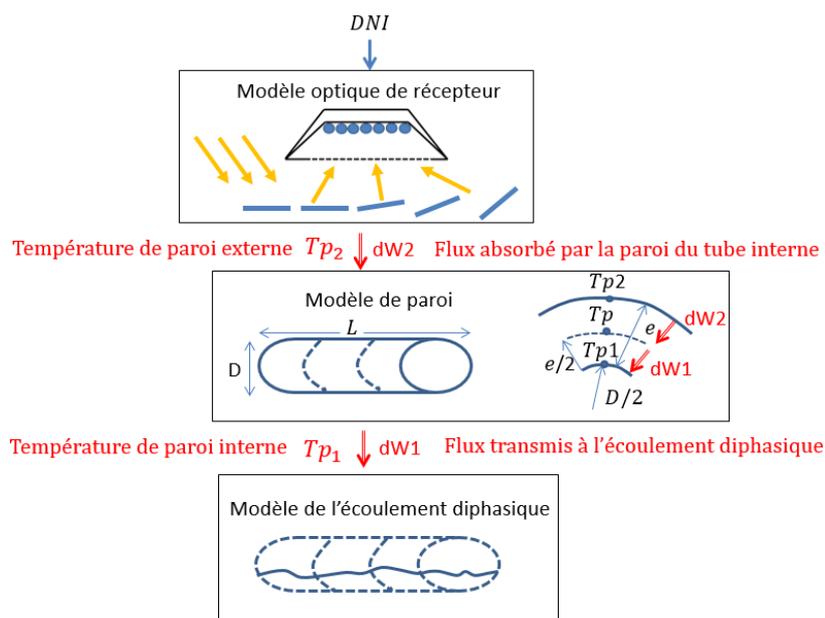


Figure 5-5 : Structure du modèle de récepteur Fresnel (ici pour le vaporiseur) et de tube absorbeur

5.2.2. Le modèle de récepteur

Le rôle du modèle de récepteur de Fresnel est de calculer la puissance thermique transmise à la paroi des tubes absorbeurs dans lesquels se trouve l'écoulement diphasique. Le modèle considère que le flux surfacique concentré par les réflecteurs est homogène tout le long de la ligne. La puissance thermique est calculée par l'équation suivante :

$$dW[i] = DNI \times FC \times S[i] \times \eta \quad (V-1)$$

Où FC est le facteur de concentration géométrique des réflecteurs vers le récepteur, η est le rendement global, et la $S[i]$ la surface d'échange thermique d'un segment de tube :

$$S[i] = \frac{\pi D_{ext,tube} L n_{tubes}}{N_s} \quad (V-2)$$

n_{tubes} est le nombre de tubes dans le récepteur modélisé, $D_{ext,tube}$ est le diamètre externe d'un tube, L la longueur de la ligne, et N_s le nombre de mailles discrétisant le récepteur.

On considère donc avec ce modèle une puissance thermique échangée aux parois extérieures des tubes et un rendement correspondant. Ce rendement est considéré homogène tout le long de la ligne du récepteur, et prend en compte un large panel de pertes d'énergie :

- Les pertes optiques liées à l'angle d'incidence du rayonnement direct : effet cosinus, IAM ;
- Les pertes optiques liées à l'efficacité des réflecteurs : réflectance des miroirs, facteur d'interception, pertes par ombrage, pertes de bout de ligne ;
- Les pertes optiques liées à l'efficacité du récepteur : réflectance, transmittance et facteur d'absorption de la vitre, rendement optique interne au récepteur ;
- Les pertes thermiques du récepteur : celui-ci échange de la chaleur avec l'air ambiant, notamment par convection et radiation de la vitre.

A la différence du modèle optique de collecteur cylindro-parabolique, les pertes thermiques ne sont pas calculées par le modèle, car elles nécessiteraient un dimensionnement trop précis et inutile pour mener les études dynamiques voulues. Le rendement global est défini par une valeur constante pour les simulations présentées ici. Le but premier étant d'étudier la dynamique rapide du champ solaire face à des perturbations de son fonctionnement, il n'a pas été jugé nécessaire de faire varier le rendement durant les simulations.

Comme le montre la Figure 5-4, les 4 lignes de vaporiseur ont été modélisées avec un seul modèle de récepteur, et la ligne de surchauffe a été modélisée par deux modèles distincts pour pouvoir intégrer une injection de désurchauffe. Le tableau ci-dessous résume les paramètres utilisés pour les modèles de récepteur :

	<i>Vaporiseur</i>	<i>Surchauffeur</i>	<i>Surchauffeur post-désurchauffe</i>
n_{tubes}	28	3	3
L	257 m	117 m	117 m
D_{tube}	22.5 mm	42.906 mm	42.906 mm
N_s	10	3	3
FC	40	40	40
η	35 %	60 %	60 %

Tableau 5-6 : Paramètres des modèles de récepteur

Les rendements utilisés proviennent d'itérations entre le modèle dynamique Modelica et le modèle simple Excel pour atteindre les valeurs de fonctionnement désirées et données par le Tableau 5-1, comme explicité plus loin dans la section 5.2.5

Le fait qu'un seul modèle soit utilisé pour le vaporiseur fait qu'on ne peut pas simuler le fonctionnement des lignes parallèles, notamment la répartition des débits où les effets d'un flux non homogène sur le champ. Les pertes de charges dues aux connexions entre les lignes sont cependant prises en compte dans la modélisation.

5.2.3. La modélisation des pertes de charge hors récepteurs

Les pertes sont modélisées par des composants de pertes de charge singulières et linéaires avec une approche monophasique. Les modèles calculent la perte de pression en fonction du débit de fluide Q , de sa masse volumique ρ et d'un coefficient K_f qu'il convient de définir.

5.2.3.1. Pertes par frottement dans les conduites

Le frottement du fluide sur les parois internes des conduites hors des récepteurs provoque une baisse de la pression au fur à et mesure de l'écoulement, d'autant que les longueurs de tuyauteries sont importantes (voir Tableau 5-5).

Ces pertes sont modélisées par un modèle *PipePressureLoss* du package *PressureLoss*. Le différentiel de pression est calculé par l'équation suivante :

$$\Delta P_f = K_f \frac{Q^2}{\rho} \quad (\text{V-3})$$

Le coefficient K_f est calculé en cherchant à obtenir un coefficient équivalent à l'expression de perte de charge recommandée par le manuel technique du GRETh [6] :

$$\Delta P_{f,Greth} = \frac{\lambda L}{D_H} \frac{Q^2}{2A^2\rho} \quad (\text{V-4})$$

Où L est la longueur de la conduite, D_H son diamètre hydraulique, A sa section, et λ le coefficient de frottement :

$$\lambda = \frac{1}{\left[2 \log\left(\frac{3.7}{\varepsilon/D}\right)\right]^2} \quad (\text{V-5})$$

ε/D est la rugosité relative, qui nécessite de connaître le diamètre des conduites. Pour les définir, on choisit de dimensionner le diamètre pour conserver une vitesse d'écoulement égale à celle dans les tubes des récepteurs. Les vitesses moyennes dans un tube unique de récepteur et dans la conduite rassemblant les débits sont calculées par les expressions suivantes :

$$V_{moy,tube} = \frac{4Q_{tube}}{\rho_{moy}\pi D_{tube}^2} \quad V_{moy} = \frac{4Q_{tube} n_{tubes}}{\rho_{moy}\pi D^2} \quad (\text{V-6-7})$$

En appliquant l'égalité entre les deux termes de vitesse, on obtient l'expression suivante pour le calcul du diamètre de conduite hors récepteur :

$$D = \sqrt{n_{tubes} D_{tube}^2} \quad (V-8)$$

Ce qui donne un diamètre de 11.9 cm pour les conduites liées au vaporiseur et de 7.43 cm pour celle liées au surchauffeur. Du point de vue des normes Européennes sur la tuyauterie sous pression, cela correspondrait respectivement à des tubes DN 125 et DN 80.

5.2.3.2. Pertes de charge singulière

Les pertes de charges dans les coudes, les jonctions en « T » et les collecteurs d'entrée/sortie de récepteurs sont modélisées par des modèles *SingularPressureLoss*. Ce modèle calcule la perte de charge avec l'équation (V-3) décrite précédemment.

Pour le coude, le coefficient K_f est calculé avec la formule de Weisbach, selon le GRETh [7] :

$$K_{f,coude} = \left[0.131 + 1.847 \left(\frac{D}{2R_{coude}} \right)^{7/2} \right] \frac{\theta_{coude}}{90^\circ} \quad (V-9)$$

Où R_{coude} est le rayon de courbure du coude, et θ_{coude} son angle. Ce coefficient doit être corrigé car il s'applique à la corrélation originale exprimée en fonction de la vitesse moyenne du fluide dans la conduite, et non du débit comme pour le modèle ThermoSysPro.

Pour les jonctions en T et les collecteurs d'entrée/sortie, les coefficients suivants sont utilisés :

$$K_{f,jonction T} = 1.5 \quad K_{f,collecteur} = 0.1 \quad (V-10-11)$$

5.2.4. Dimensionnement et modélisation de la pompe de recirculation

Le modèle *StaticCentrifugalPump* est utilisé pour la pompe de recirculation. Le modèle fonctionne en imposant les équations caractéristiques de débit/hauteur manométrique et de débit/rendement :

$$H_n = a_1 Q_v^2 + a_2 Q_v R + a_3 R^2 \quad (V-12)$$

$$R_h = b_1 \frac{Q_v^2}{R^2} + b_2 \frac{Q_v}{R} + b_3 \quad (V-13)$$

H_n est la hauteur manométrique (m), R_h le rendement hydraulique, Q_v le débit volumique (m^3/s) et R le rapport de la vitesse de rotation à sa valeur nominale.

Dimensionner la pompe revient à choisir les coefficients a et b des équations ci-dessus. Il est pour cela nécessaire de connaître la caractéristique interne du vaporiseur et de son circuit. Nous avons donc mené des simulations sur le modèle en ne simulant que le fonctionnement de la partie vaporiseur. La pompe est remplacée par une simple source de débit, et différentes valeurs de débit de recirculation ont été imposées afin de mesurer les pertes de charge correspondantes. Les simulations ont été menées pour différents niveau de flux incident sur le champ solaire, puisque la perte de charge varie avec la puissance thermique reçue par le fluide. Il est important de noter que le débit délivré par la pompe de recirculation n'est qu'une partie du débit total dans le circuit de vaporiseur, puisqu'un débit important provient de l'eau alimentaire « froide » (voir la Figure 5-1 et la Figure 5-4). Ce débit a été gardé constant pour ces simulations, et fixé à la valeur du point de dimensionnement détaillé par le Tableau 5-2. La perte de charge calculée pour la caractéristique de pompe et du circuit correspond donc au débit total qui traverse le vaporiseur.

La Figure 5-6 montre la caractéristique du circuit du vaporiseur (les récepteurs et la tuyauterie externe) et celle de la pompe pour différentes vitesses de rotation, avec la configuration choisie pour les équations caractéristiques. On peut noter une très légère inflexion dans la croissance des courbes pour les caractéristiques du vaporiseur, ce qui correspond à la forme en « N » décrite à la section 2.3.4 du chapitre 2. On voit que la variation de la vitesse de rotation de la pompe permet d'assurer une importante gamme de débits dans un intervalle de fonctionnement raisonnable pour une pompe centrifuge.

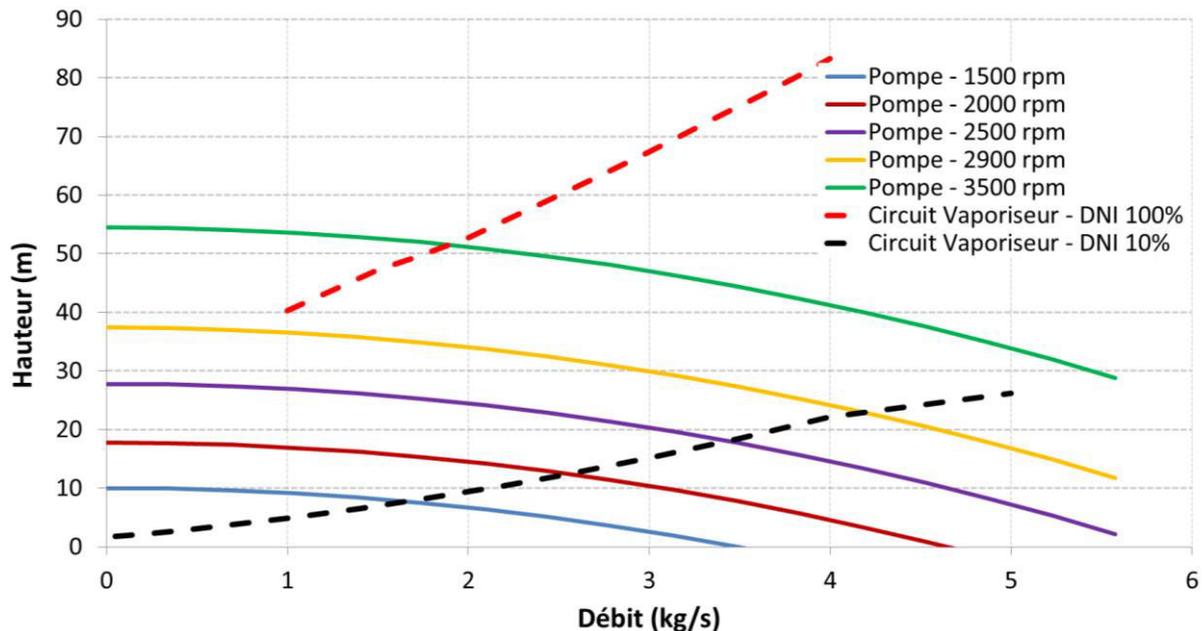


Figure 5-6 : Caractéristique du circuit de vaporiseur

Le Tableau 5-7 résume les paramètres de fonctionnement utilisés pour le modèle de pompe.

<i>Vitesse de rotation nominale</i>	1500 rpm	<i>Vitesse de rotation – 100% du DNI</i>	3500 rpm
a_1	-400000	b_1	-100000
a_2	0	b_2	500
a_3	10	b_3	0

Tableau 5-7 : paramètres de la pompe de recirculation du modèle de champ solaire

Avec les paramètres de ce tableau, on voit avec la Figure 5-6 que le point de fonctionnement du circuit sera autour de 1.8 kg/s pour le débit de la pompe, et une hauteur manométrique de 50m environ.

5.2.5. Détermination d'un point de fonctionnement sans régulation

Une fois un premier modèle global réalisé, des simulations sont menés en imposant la vitesse de pompe et les débits d'alimentation et d'injection de désurchauffe, ce qui revient à se substituer à la régulation du système. Le but de ces simulations est d'atteindre le point de dimensionnement voulu, détaillé par le Tableau 5-1. Ces simulations permettent le choix d'une combinaison incluant le débit des conditions limites (alimentation, injection de désurchauffe), la vitesse de rotation de la pompe, et le rendement des récepteurs. Le tableau ci-dessous résume les paramètres et les conditions limites déterminés par ces simulations, en reprenant également les valeurs initiales du dimensionnement grossier :

	<i>Valeur finale</i>	<i>Dimensionnement grossier</i>
<i>Pompe de recirculation – vitesse de rotation</i>	3500 rpm	-
<i>Débit de recirculation</i>	1.412 kg/s	1.31 kg/s
<i>Débit d'alimentation</i>	3.12 kg/s	3.06 kg/s

<i>Vaporiseur – titre sortie</i>	0.7	0.7
<i>Surchauffeur – température de sortie</i>	451.6 °C	450 °C
<i>Surchauffeur – pression de sortie</i>	85 bar	85 bar
<i>Vaporiseur – rendement récepteur</i>	35%	-
<i>Surchauffeur – rendement récepteur</i>	60%	-
<i>Injection désurchauffe – débit</i>	0.201 kg/s	-

Tableau 5-8 : Conditions limites et paramètres de fonctionnement finaux du champ solaire

On observe que le débit de recirculation du point de fonctionnement final est inférieur à celui déduit du tracé de la caractéristique interne du circuit et de la pompe de recirculation. Cela s'explique par le fait que le modèle utilisé pour le calcul de la caractéristique ne prend en compte que le vaporiseur, et que les pertes de charge aient été légèrement modifiées dans les simulations du champ complet pour déterminer un point de fonctionnement.

5.2.6. Etude dynamique du vaporiseur non régulé

Cette première partie du travail de modélisation et de simulation est consacrée à l'étude de la dynamique du vaporiseur, qui est le coeur de la génération de vapeur dans le champ solaire. Le but est d'étudier son comportement, notamment au niveau des débits, lorsque celui-ci est soumis à des transitoires. Une comparaison est faite avec l'étude de Eck & Hirsch [4] sur un modèle de champ solaire cylindro-parabolique.

5.2.6.1. Simulation d'une marche de débit d'alimentation

Le modèle utilisé pour déterminer la caractéristique interne du vaporiseur est utilisé également pour ce travail. L'objectif de cette simulation est d'étudier la réponse du débit de sortie du vaporiseur à une modification soudaine du débit d'eau alimentaire, pour deux débits de recirculation différents. La Figure 5-7 ci-dessous montre les résultats de l'étude de Eck & Hirsch du DLR. Une marche de débit d'alimentation de 1.2 à 1.5 kg/s est imposé en entrée du vaporiseur, et le résultat est comparé pour deux valeurs de débits de recirculation, ce qui permet de montrer l'influence de ce débit sur la dynamique de la génération de vapeur. Le Tableau 5-9 compare les paramètres de l'étude des chercheurs du DLR et celles du travail présenté ici. On voit que les grandeurs géométriques ne sont pas les mêmes, c'est pourquoi on cherche ici à les ramener au temps caractéristique que met l'écoulement à traverser le récepteur (ou temps de présence). Pour déterminer celui de l'étude de Eck & Hirsch, il est nécessaire d'évaluer la masse volumique et le titre massique en sortie de vaporiseur.

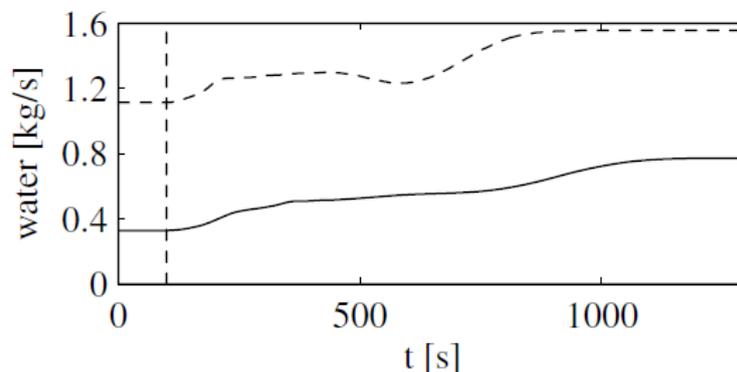


Figure 5-7 : Débit d'eau liquide en sortie du vaporiseur à la suite d'une marche de débit d'eau alimentaire de 1.2 à 1.5 kg/s, pour un débit de recirculation de 0.25 kg/s (-) et de 1 kg/s (- -), extrait de [4]

	Eck & Hirsch	Etude
Valeur du DNI	850 W/m ²	1000 W/m ²

Longueur du vaporiseur	800 m	257 m
Nombre de tubes	1	28
Diamètre de tube	5,5 cm	2,25 cm
Épaisseur de tube	7.5 mm	2.87 mm
Débit de recirculation	0.25 et 1.0 kg/s	1.412 et 5.648 kg/s
Débit alimentaire et température	1.2 kg/s – 125°C	3.12 kg/s – 100°C

Tableau 5-9 : Comparaison des paramètres de l'étude avec celle de Eck & Hirsch

Le titre massique de sortie pour cette étude est évalué avec l'expression suivante :

$$x = 1 - \frac{Q_l}{Q_{total}} \quad (V-14)$$

où Q_l est le débit liquide montré sur la Figure 5-7, et Q_{total} le débit total calculé en entrée. La masse volumique de sortie peut ensuite être calculée en supposant un mélange homogène des phases :

$$\rho = \left[\frac{1}{\rho_l} + x \left(\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_l} \right) \right]^{-1} \quad (V-15)$$

La connaissance des masses volumiques d'entrée et de sortie permet de calculer une vitesse moyenne d'écoulement dans le vaporiseur, et le temps caractéristique d'écoulement :

$$V_{moy} = \frac{4Q}{\rho_{moy}\pi D} \quad \tau_e = \frac{L}{V_{moy}} \quad (V-16-17)$$

La Figure 5-8 montre le débit d'eau liquide de sortie simulé avec notre modèle. Le débit d'eau alimentaire est augmenté par une marche avec la même proportion que l'étude de référence (25%) et les deux débits de recirculation pour lesquels la simulation est réalisée ont le même facteur 4 entre leurs valeurs. Le vaporiseur est amené à fonctionnement stationnaire par des simulations préalables, avant d'appliquer la modification de débit d'alimentation.

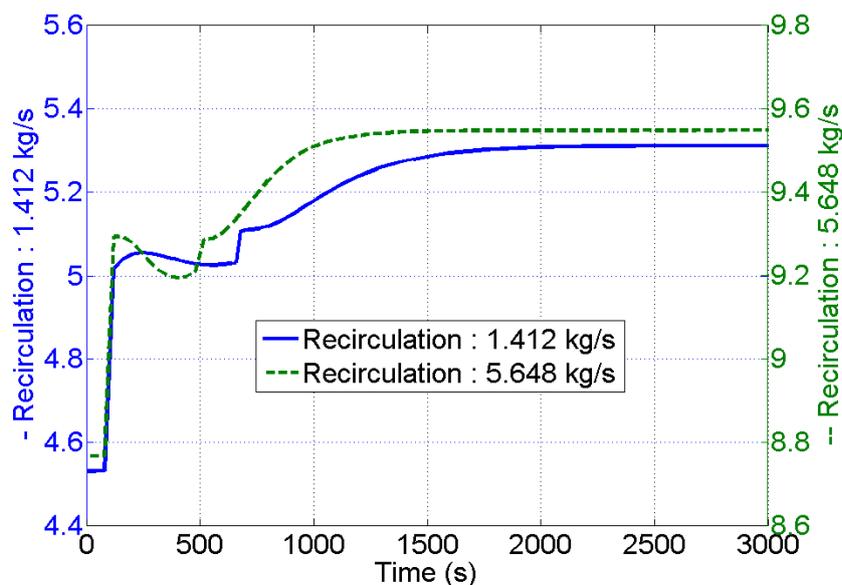


Figure 5-8 : Débit d'eau liquide en sortie de vaporiseur pour le vaporiseur Fresnel modélisé

Le tableau suivant résume les paramètres et observations découlant de cette comparaison :

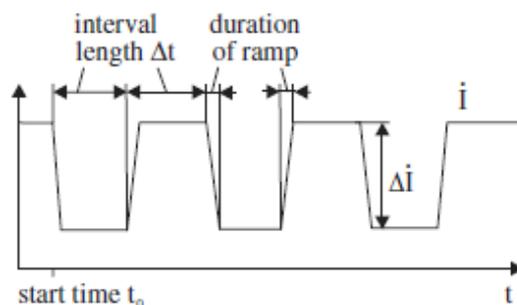
	Eck & Hirsch		Modèle ThermoSysPro	
Marche de débit d'alimentation	1.2 à 1.5 kg/s (+25%)		3.12 à 3.9 kg/s (+25%)	
Débit de recirculation	0.25 kg/s	1.0 kg/s	1.412 kg/s	5.648 kg/s
Vitesse moyenne du fluide estimée	1.5 m/s	2.17 m/s	0.96 m/s	1.76 m/s
Temps de séjour estimé	534 s	368 s	268 s	146 s
Temps d'établissement du débit de sortie	1075 s	775 s	2660 s	1780 s
Influence sur le temps d'établissement	100%	-28%	100%	-33%

Tableau 5-10 : Simulation de la marche de débit d'alimentation, paramètres et analyse

La variation de débit d'alimentation modifie l'équilibre établi par les simulations préalables. Dans l'étude de Eck & Hirsch, on voit qu'il faut environ deux fois le temps de séjour du fluide pour atteindre un nouvel équilibre en sortie de vaporiseur, et ce temps d'établissement est réduit de 28% si on augmente de débit de recirculation par un facteur 4. Avec notre modèle ThermoSysPro, la durée d'établissement est d'environ 10 fois le temps de séjour du fluide, ce qui indique que les phénomènes dynamiques mis en jeu dans le récepteur de Fresnel ont des temps caractéristiques plus importants. L'inertie apparaît donc plus importante avec cette configuration. En effet, en faisant l'hypothèse de tubes en acier inox pour les tubes des collecteurs cylindro-paraboliques et des récepteurs Fresnel, et en utilisant les données du Tableau 5-9, on peut calculer la masse d'acier liée aux tubes des deux champs solaires. Celle des récepteurs Fresnel est évaluée à 13.2 tonnes, tandis qu'elle est d'environ 9.4 tonnes pour les collecteurs cylindro-paraboliques, soit 29% de moins. Cela participe donc des constantes de temps plus élevées dans la dynamique des phénomènes dans les récepteurs Fresnel modélisés. On voit toutefois qu'un résultat concordant entre les deux champs solaires est que l'augmentation par un facteur 4 du débit de recirculation diminue d'environ 30% le temps d'établissement des débits.

5.2.6.2. Simulation d'une perturbation d'ensoleillement

L'étude de Eck & Hirsch simule une triple perturbation d'ensoleillement sur le champ solaire avec le signal suivant :



La même perturbation de DNI est simulée avec notre modèle de vaporiseur, en adaptant les paramètres des échelons (durée, amplitude) au temps de séjour identifié pour le récepteur Fresnel :

	Eck & Hirsch			ThermoSysPro		
Débit d'alimentation (kg/s)	1.2	1.2	1.2	3.12	3.12	3.12
Débit de recirculation (kg/s)	0.25	0.25	0.25	1.412	1.412	1.412
Δt (s)	30	120	240	12	48	96
% du temps de séjour	4.6 %	18.4 %	36.8 %	4.6 %	18.4 %	36.8 %
Durée de la rampe (s)	5 s	5 s	5 s	5 s	5 s	5 s
ΔI (W/m²)	-875	-600	-600	-1000	-700	-700
% de perte de DNI	-100 %	-70 %	-70 %	-100 %	-70 %	-70 %

Tableau 5-11 : Paramètres de simulation des perturbations d'ensoleillement sur le vaporiseur

Une bonne comparaison entre les études nécessite en effet d'avoir une durée également proportionnelle au temps de séjour du fluide. Les durées des rampes sont en revanche laissées identiques entre les deux études, car on suppose une même durée d'établissement pour les perturbations. La figure suivante montre les résultats de l'étude du DLR :

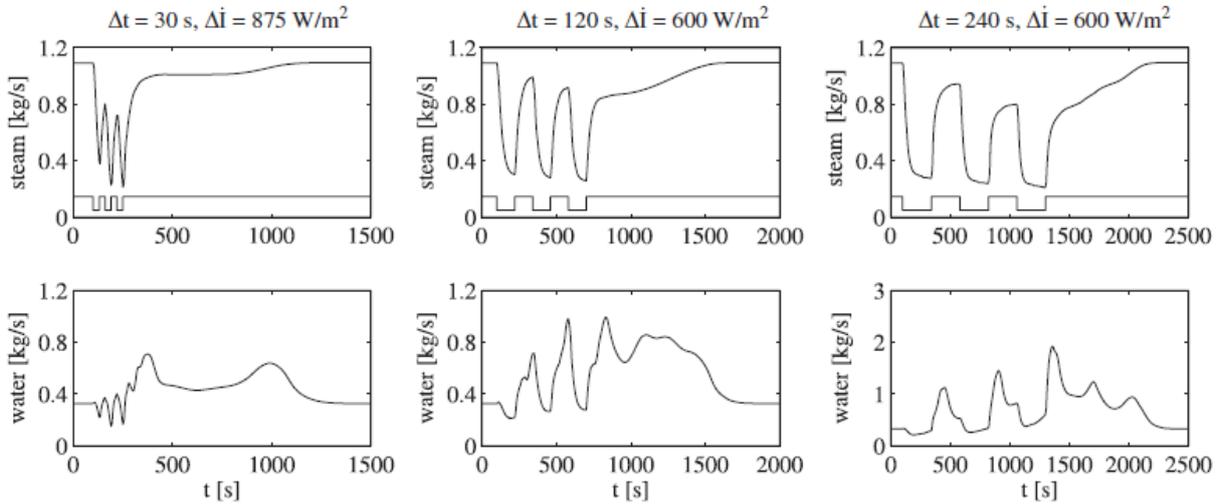
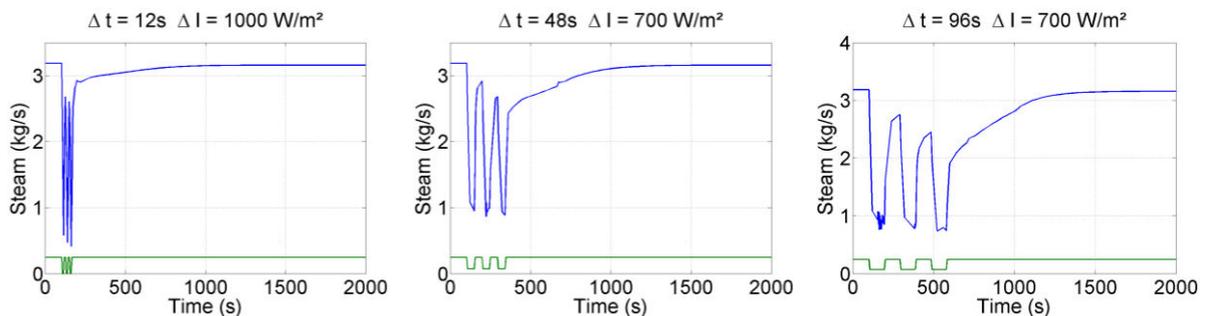


Figure 5-9 : Débits en sortie de vaporiseur pour les simulations de Eck & Hirsch [4]

L'influence des perturbations du flux est nettement visible sur les débits d'eau liquide et de vapeur en sortie du champ. Chaque perturbation de DNI génère notamment deux pics liquides : le premier est dû à l'arrêt soudain de la génération de vapeur et le second se produit lorsque l'irradiation reprend et que la génération de vapeur vient chasser brutalement l'eau liquide accumulée durant la perturbation. Les pics liquides visibles sur la Figure 5-8, et en particulier pour les perturbations à $\Delta t = 120\text{ s}$ et $\Delta t = 240\text{ s}$ sont le résultat de la superposition des effets des trois chutes de DNI consécutives. La perte de débit vapeur est également clairement visible sur la figure, et le rétablissement de la production nominale est plus long pour les perturbations longues.

La figure ci-dessous montre les résultats pour la simulation de la même triple perturbation avec le modèle Fresnel :



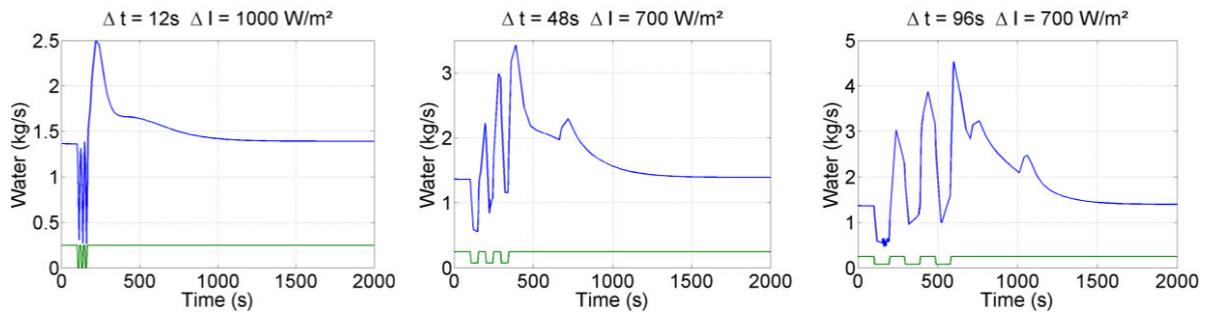


Figure 5-10 : Débits de sortie de vaporiseur pour les simulations du modèle de Fresnel

Une bonne concordance générale est trouvée entre notre étude et celle du DLR. Les pics liquides les plus élevés dans notre étude sont autour de 4.5 kg/s, soit environ 3 fois la valeur nominale. On note que c'est moins que dans l'étude du DLR, où les pics observés sont d'environ 8 fois la valeur nominale. Pour les perturbations les plus courtes, le deuxième pic liquide produit par la reprise de l'ensoleillement est moins marqué dans notre étude, ce qui indique que les échelons de DNI sont plus « absorbés » par notre modèle. Ces deux dernières remarques sont cohérentes avec l'observation précédente que le champ solaire modélisé en Fresnel a plus d'inertie thermique.

5.2.7. Simulation du champ solaire complet et proposition d'un système de régulation

5.2.7.1. Système de régulation par régulation Proportionnelle-Intégrale

Le débit de recirculation est maintenu constant par la régulation de la vitesse de rotation de la pompe. Cette régulation est nécessaire car la perte de charge du circuit de vaporisation varie au cours de son fonctionnement, la puissance de pompage nécessaire pour assurer un même débit varie donc également. Cette boucle de régulation est similaire à celle mise en œuvre expérimentalement avec la boucle DISS, ainsi qu'expliqué au chapitre 3 de ce manuscrit.

Une autre boucle de régulation est utilisée pour assurer un titre massique constant en sortie du vaporiseur, en régulant le débit d'alimentation du vaporiseur. Etant donné que le débit de recirculation est maintenu constant, réguler le débit d'alimentation permet un contrôle direct sur le titre de sortie, selon les équations détaillées au début du chapitre 2. Les installations de génération de vapeur évitent en pratique la mesure directe du titre massique car, bien que plus simple à mettre en œuvre que la mesure du taux de vide, elle reste relativement difficile et peu fiable. Le titre est néanmoins estimable par une mesure de l'irradiation incidence et un bilan d'énergie. Cette méthode de régulation est choisie ici car le contrôle du titre permet de maintenir une marge par rapport à la surchauffe dans le vaporiseur (que l'on cherche à éviter) tout en s'assurant d'une bonne production de vapeur.

Une troisième boucle de régulation, aussi similaire à celle de l'installation DISS, permet de contrôler la température de vapeur en sortie du surchauffeur en régulant le débit d'injection.

Les deux figures suivantes schématisent l'installation et la structure de contrôle en diagramme-blocs :

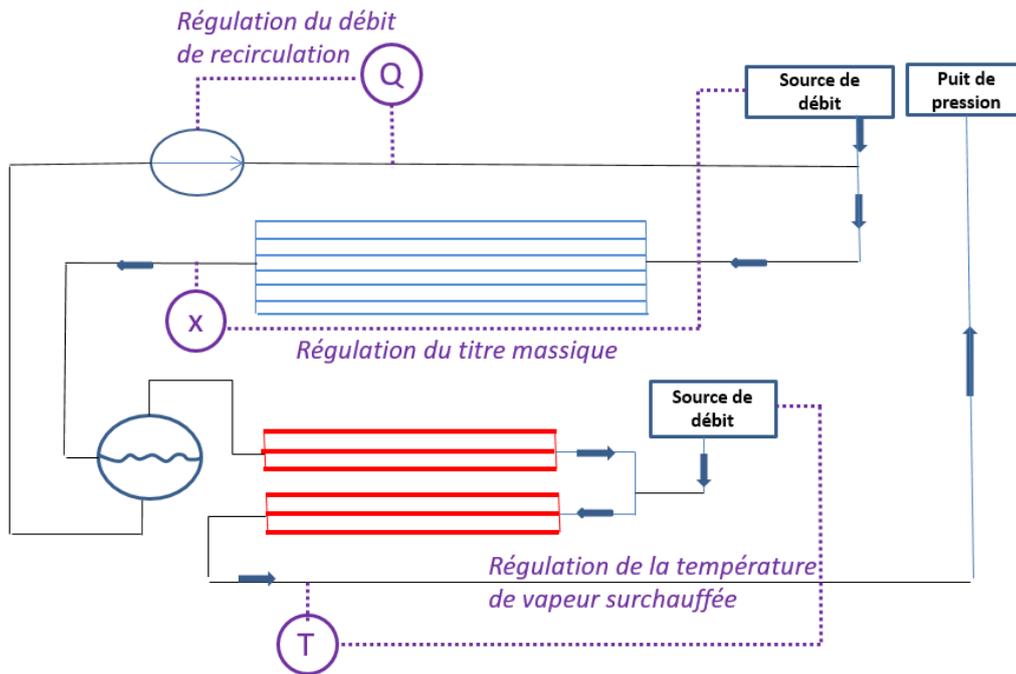


Figure 5-11 : Schématisation du champ solaire et de ses boucles de régulation

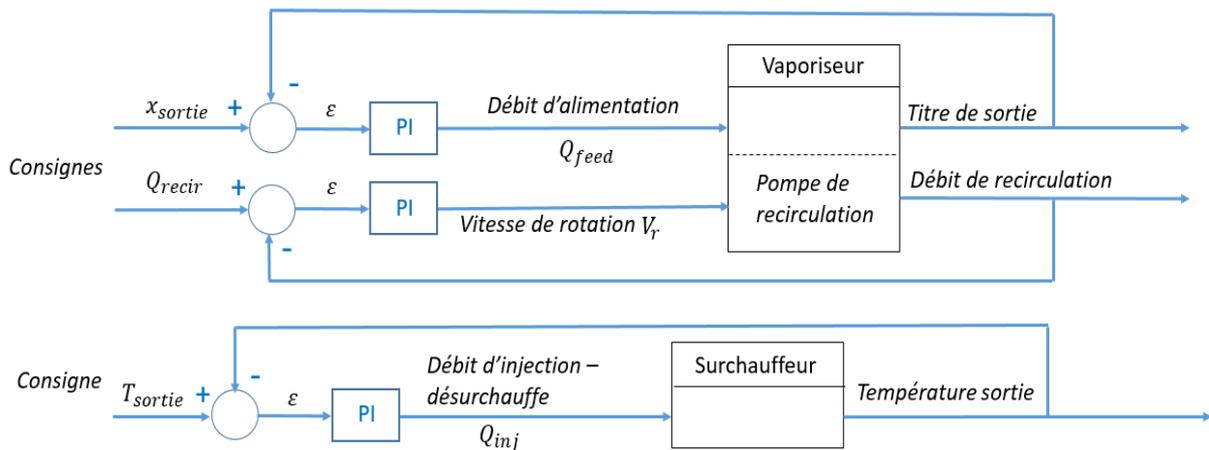


Figure 5-12 : Diagramme bloc du système de régulation proposé pour le modèle de champ solaire

Comme montré sur le diagramme bloc, les boucles de régulation utilisent un correcteur PI pour calculer les débits et la vitesse de rotation du système. Le PI dispose d'une boucle antiwindup pour corriger les effets de la saturation des actionneurs (limites pour le débit et la vitesse de rotation de la pompe), ainsi qu'expliqué à la section 3.1.1.1 du chapitre 3. Les paramètres du contrôleur PI sont calculés en utilisant la méthode des réactions en boucle ouverte et par identification de modèle, également explicitée au chapitre 3.

Les figures ci-dessous illustrent cette méthode de réglage des contrôleurs PI.

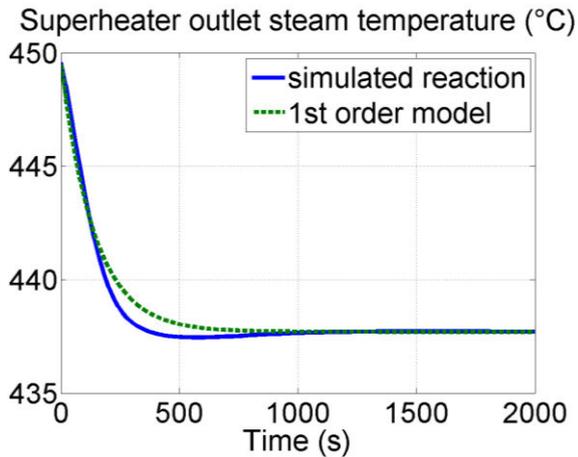


Figure 5-13 : Température de sortie de vapeur surchauffée en réaction à une marche de 20% du débit d'injection de désurchauffe

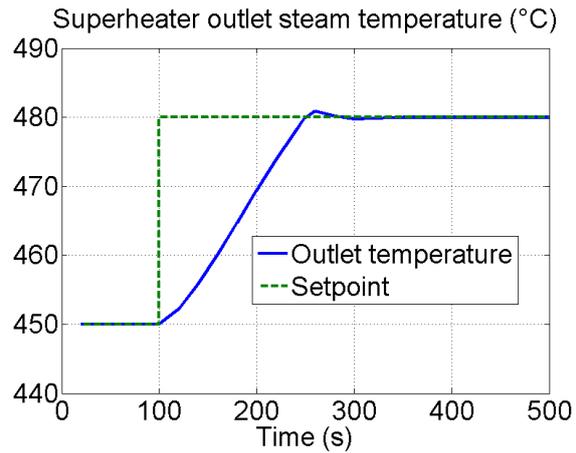


Figure 5-14 : Température de sortie de vapeur surchauffée en réaction à une modification de la consigne.

La figure de gauche montre la réaction en boucle ouverte de la température de vapeur en sortie du surchauffeur, lorsque le débit d'injection de désurchauffe est augmentée de 20%. Le modèle identifié (1^{er} ordre) est également tracé. Pour évaluer les performances de la boucle de régulation paramétrée à partir du modèle identifié, la figure de droite montre la température de vapeur en sortie de surchauffeur en réaction à une modification de la consigne. On voit sur cette figure que le réglage est satisfaisant pour une modification de la consigne.

Le Tableau 5-12 ci-dessous résume les paramètres des boucles de régulation.

Boucle de régulation	Modèle identifié	Paramètres du PI	Consigne
Débit de recirculation	Gain simple $k=588$	$K_C = 588, T_i = 60$	1.412 kg/s
Titre massique - sortie vaporiseur	1er ordre, $\frac{-0.72}{1+840s}$	$K_C = -936, T_i = 840$	0.7
Température – sortie surchauffeur	1er ordre, $\frac{-295}{1+140s}$	$K_C = -0.38, T_i = 140$	450 °C

Tableau 5-12 : Paramètres des boucles de régulation

Le système débit d'alimentation-titre massique se comporte comme un système du premier ordre, ainsi que le système injection de désurchauffe – température de sortie. A partir de ces deux modèles identifiés, le gain et la constante de temps des régulateurs PI pour ces deux boucles sont déterminés par une corrélation empirique. Cette corrélation est explicitée dans l'ouvrage de Ogunnaïke & Harmon Ray [8] (§15.4.2) et provient des travaux de Rivera, Morari et al. (références dans l'ouvrage cité) sur les méthodes de contrôle par modèle interne (IMC, on pourra consulter le chapitre 3 pour plus d'explications). On remarque que le gain est négatif pour les deux modèles de type premier ordre identifiés, puis qu'une action d'augmentation du débit alimentaire ou désurchauffe provoque respectivement une baisse du titre ou de la température de sortie.

5.2.7.2. Simulation de la triple perturbation de DNI

La figure ci-dessus montre l'évolution simulée des principaux indicateurs du champ solaire lorsque celui-ci est soumis à une triple perturbation d'ensoleillement. Une deuxième simulation avec la régulation désactivée a été réalisée, afin de comparer les résultats et de mettre en évidence le rôle du système de contrôle. La perturbation appliquée est celle avec la plus longue perte d'ensoleillement ($\Delta t = 96 \text{ s}, \Delta I = -700 \text{ W/m}^2$).

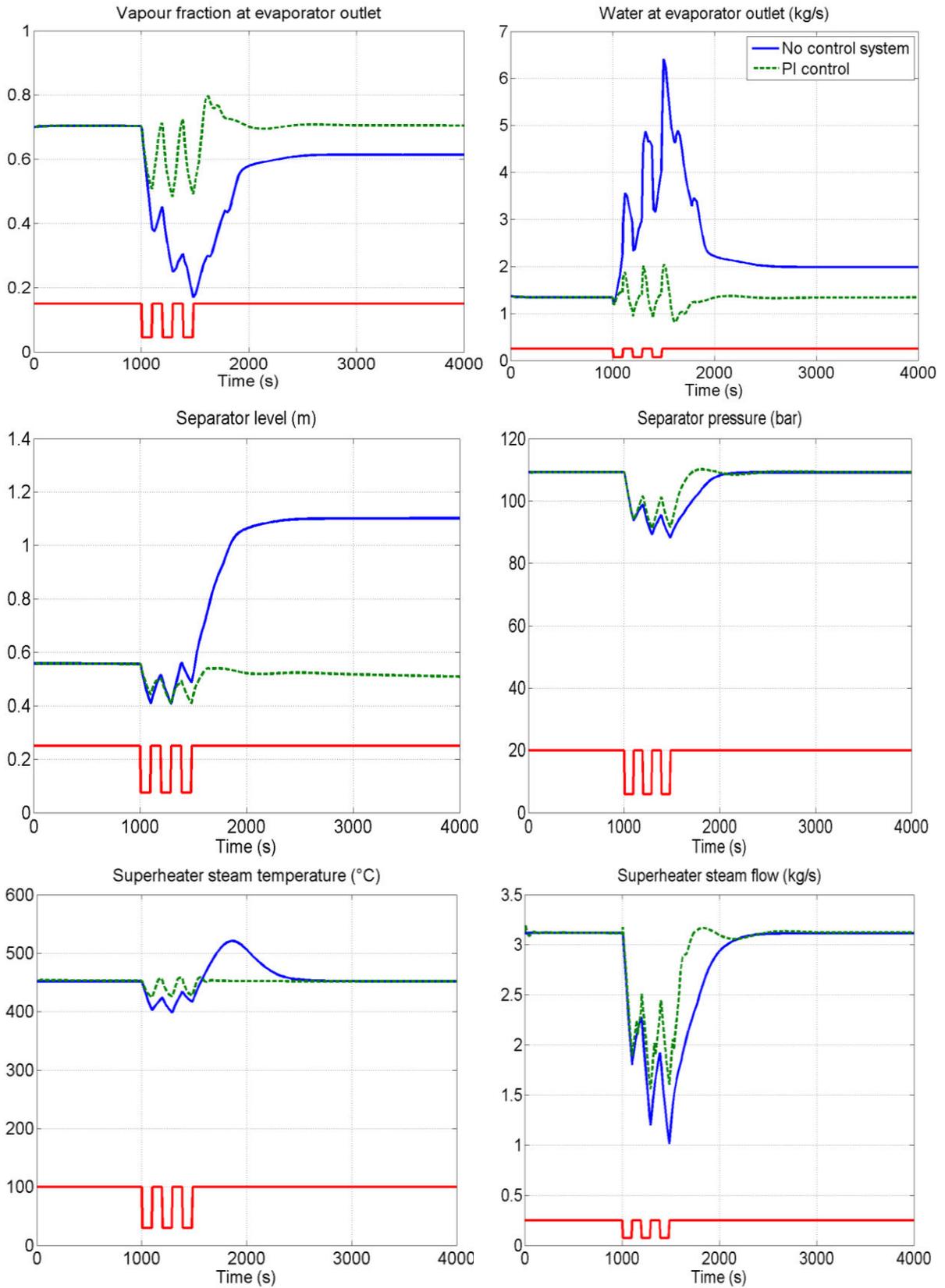


Figure 5-15 : Evolution des principales variables du champ solaire modélisée, avec (vert) et sans régulation (bleu). Titre massique et débit liquide (sortie de vaporiseur), niveau de liquide et pression (ballon séparateur), température et débit de vapeur surchauffée (sortie de surchauffeur).

On observe tout d'abord que la simulation de la perturbation sur le champ solaire non régulé provoque un changement du point de fonctionnement du vaporiseur. Le tracé du titre massique en sortie montre en effet que celui-ci a diminué après la perturbation et que le débit d'eau liquide (courbe de droite) disponible est donc plus élevé. L'effet est que le ballon (3è figure) se stabilise sur un niveau liquide plus élevé. En s'intéressant au fonctionnement de la pompe de recirculation, on s'aperçoit que la raison à ce changement dans le fonctionnement est que celle-ci ne fournit plus le même débit malgré la vitesse de rotation identique. Cela indique que le point de fonctionnement a changé. La figure ci-dessous montre un effet un débit pompe et une différence de pression supérieurs après la perturbation. Il est intéressant de noter que le débit atteint est proche de celui du point de fonctionnement identifié par les caractéristiques de la pompe et du circuit vaporiseur (Figure 5-6).

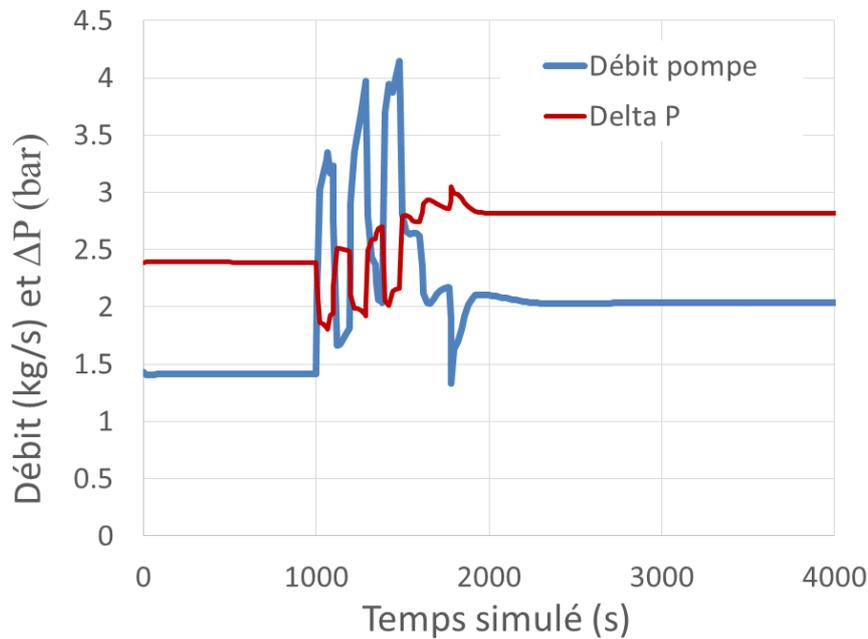


Tableau 5-13 : Fonctionnement de la pompe de recirculation durant la simulation de perturbation sur le champ solaire non régulé.

Cela peut vouloir dire que le point de fonctionnement choisi pour le dimensionnement (Tableau 5-8) est en effet instable, et que la perturbation a rétabli le fonctionnement sur un point stable.

Outre la stabilisation sur un nouveau point de fonctionnement, on observe également que la perturbation mène à une chute importante du titre massique en sortie de vaporiseur et du débit envoyé à la surchauffe. Les deux boucles de régulation du vaporiseur, pour maintenir constant le débit de recirculation et le titre de sortie, permettent d'éviter le changement du point de fonctionnement. On voit également qu'elles réduisent nettement le pic de débit liquide observé en sortie ou la chute du titre massique.

Un important dépassement (environ 70°C) consécutif à la reprise de l'ensoleillement nominal est observable sur la courbe de température en sortie du surchauffeur. La régulation agissant sur le débit d'injection de désurchauffe permet d'éviter ce dépassement, et de réduire la chute de température pendant les perturbations. On voit en revanche que les transitoires sont trop rapides, même avec la régulation, pour correspondre aux normes évoquées au chapitre 2 (section 2.5). On voit en effet que la température de vapeur chute de 27°C en moins de 100 secondes, ce qui correspond à un gradient d'environ 16°C par minute, bien au-dessus de la valeur de 5°C/min recommandée par l'étude de Birnbaum et al. [9]. Outre le gradient, la chute de température de 27°C est également très importante et à la limite de la valeur absolue à ne pas dépasser (28°C) selon les normes. On peut donc raisonnablement

penser que si ce champ solaire était connecté à une turbine à vapeur, celle-ci devrait être bypassée pour éviter un endommagement des aubages. Cette boucle de régulation de la température de sortie est similaire à celle mise en œuvre expérimentalement dans le prototype DISS original (voir chapitre 3), et est jugée satisfaisante pour la gestion de transitoires « rapides » d'ensoleillement par l'étude de Valenzuela et al. [10]. Les transitoires de DNI de l'étude en question sont cependant moins forts que ceux simulés ici, où l'irradiation chute de 70% en 5 secondes. La figure ci-dessous montre l'évolution de l'actionneur de la boucle de régulation de notre modèle, le débit d'injection de désurchauffe :

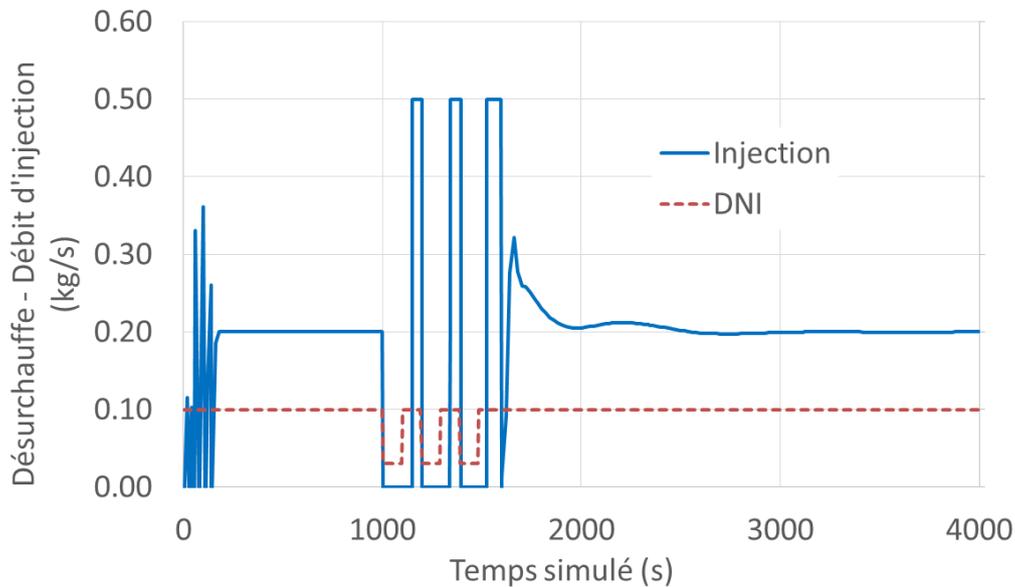


Figure 5-16 : Débit injecté en désurchauffe pour le modèle simulé avec régulation

On voit que lors de la perturbation, le débit de désurchauffe chute et devient nul, empêchant donc de compenser davantage la baisse du rayonnement. On peut imaginer un dimensionnement différent pour le surchauffeur et sa désurchauffe, avec lequel la longueur de la ligne serait augmentée et le débit nécessaire de désurchauffe par conséquent plus important en fonctionnement nominal.

5.2.7.3. Régulation de la désurchauffe par commande feedforward

Afin d'améliorer la performance de la régulation de température, une méthode feedforward est utilisée dans un autre modèle de la même configuration, avec lequel est simulée la perturbation sur le champ solaire. Cette approche de régulation est également appelée contrôle prédictif, et est abordée dans le chapitre 3. Elle est en effet utilisée (entre autres) pour la régulation du débit d'entrée du prototype cylindro-parabolique DISS. Il s'agit d'utiliser la mesure des propriétés de l'écoulement avant l'injection de désurchauffe (pression, température) et la mesure de l'irradiation directe pour calculer le débit à injecter en désurchauffe pour maintenir la vapeur à température de consigne. Le schéma bloc de la régulation globale est présenté sur la figure ci-dessous :

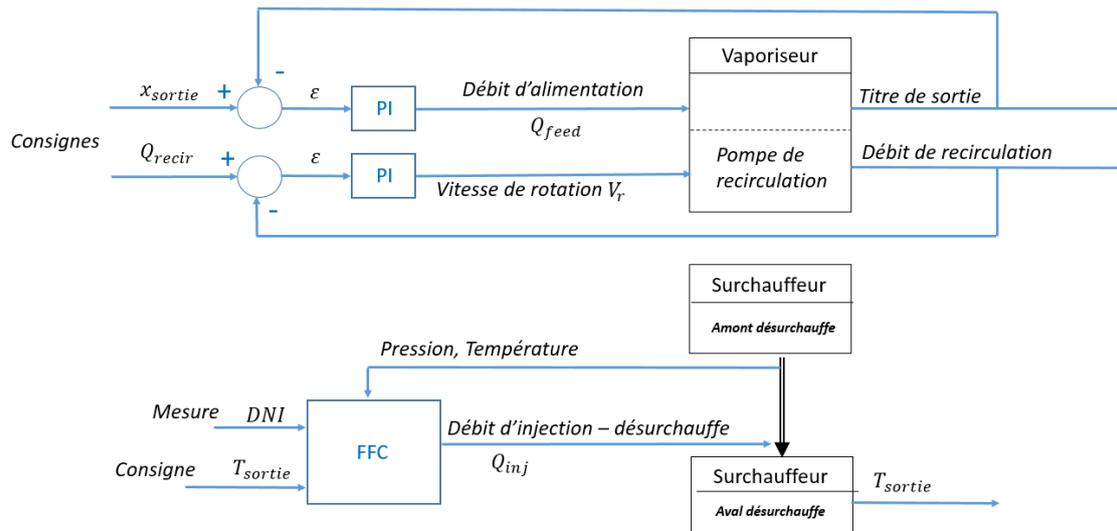


Figure 5-17 : Schéma bloc pour le système de régulation proposé, utilisant une méthode feedforward pour la désurchauffe

Un modèle de contrôleur feedforward, dénommé « FFC » sur la Figure 5-17 ci-dessus, a été développé et ajouté à la librairie ThermoSysPro. C'est un modèle de type block à entrées multiples (mesures de pression, température, et rayonnement direct, consigne de température) et qui calcule le débit à injecter en désurchauffe avec un bilan énergétique :

$$Q_{inj,desur} = \frac{Q_{vap,amont} \times h_{consigne} - Q_{vap,amont} \times h_{amont} - P_{th,surch}}{h_{inj,desur} - h_{consigne}} \quad (V-18)$$

Avec :

$Q_{inj,desur}$	Débit d'injection de désurchauffe	Sortie du modèle
$Q_{vap,amont}$	Débit de vapeur avant désurchauffe (en amont)	Mesure
$h_{consigne}$	Consigne d'enthalpie pour la vapeur de sortie	Consigne de régulation
h_{amont}	Enthalpie spécifique de l'écoulement avant la désurchauffe (en amont)	Calculée à partir des mesures de température et de pression
$h_{inj,desur}$	Enthalpie de l'eau de désurchauffe	Mesure
$P_{th,surch}$	Puissance thermique à la paroi des tubes	Mesure, sortie du modèle de récepteur

Tableau 5-14 : Termes du modèle de feedforward utilisé pour le calcul du débit de désurchauffe

La figure ci-dessous montre l'évolution de la température de vapeur en sortie de désurchauffe lorsque le champ solaire est soumis à la même perturbation d'ensoleillement étudiée à la section 5.2.7.2, et la compare à la température simulée de la régulation PI-feedback :

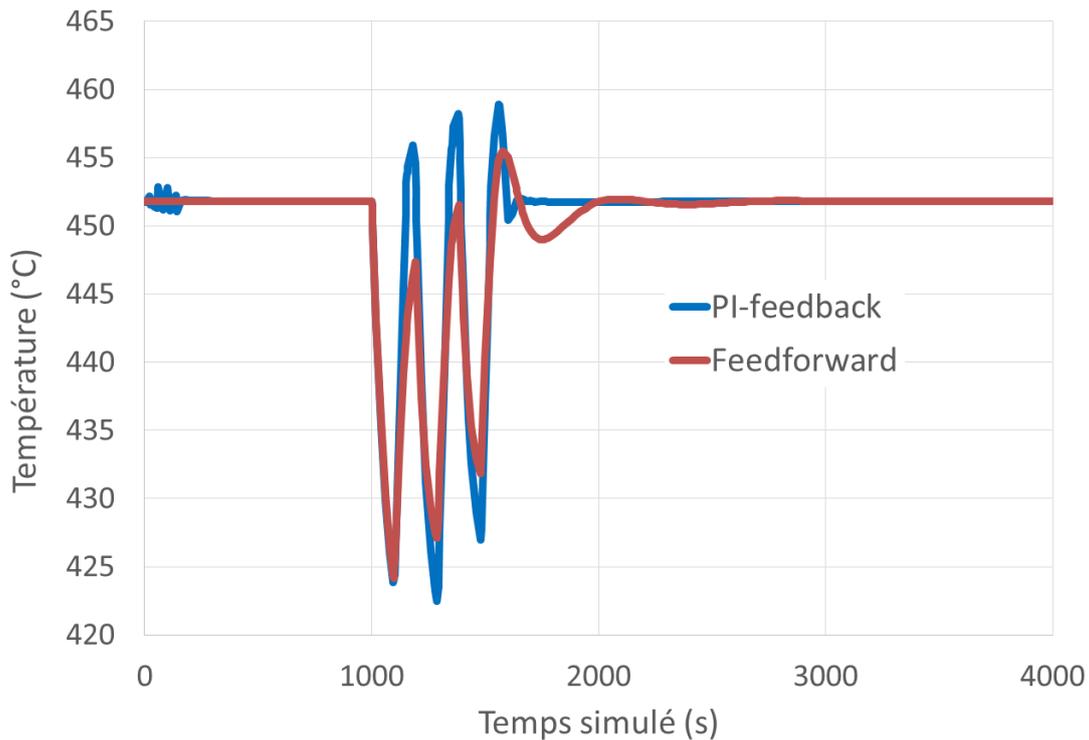


Figure 5-18 : Température de vapeur en sortie du surchauffeur, comparaison des deux boucles de régulation

On observe qu'avec la méthode feedforward, l'amplitude des variations de la température dues aux créneaux du signal de rayonnement est réduite. La chute de température est moins importante pour la seconde et troisième perturbation, et il n'y a pas de dépassement de la consigne pour les deux premières. On remarque par contre que le retour à la valeur de consigne est plus long avec la régulation feedforward. Cette approche apporte donc une meilleure stabilité à la régulation de température et une meilleure performance au rejet des perturbations, mais cela se fait au détriment du temps de convergence vers la consigne. De façon générale, il est important de garder à l'esprit que cette comparaison est valable pour le réglage du régulateur PI proposé ici, qui est un réglage suggéré par une corrélation. Il faudrait dans l'idéal mener cette comparaison pour différents réglages du correcteur, adaptés à d'autres conditions de fonctionnement.

5.3. Améliorations du modèle de récepteur et étude d'un nouveau champ solaire

5.3.1. Le modèle de récepteur amélioré

Ainsi qu'expliqué à la section 5.2.2, le premier modèle développé pour le récepteur Fresnel calcule la puissance thermique échangée en se basant sur la surface totale extérieure des tubes absorbeurs, et en considérant un rendement global par rapport à cette puissance. Dans un récepteur réel, l'irradiation absorbée par les tubes passe dans un premier temps par la fenêtre (ou vitre) située sur le bas. On choisit donc avec ce modèle de considérer un rendement entre le flux reçu à la vitre et le flux effectivement absorbé par les tubes. Cette approche de modélisation permet de simuler une installation réelle, pour laquelle on peut imaginer un dispositif permettant de déterminer expérimentalement les rendements thermique et optique du récepteur, pour différentes conditions de fonctionnement.

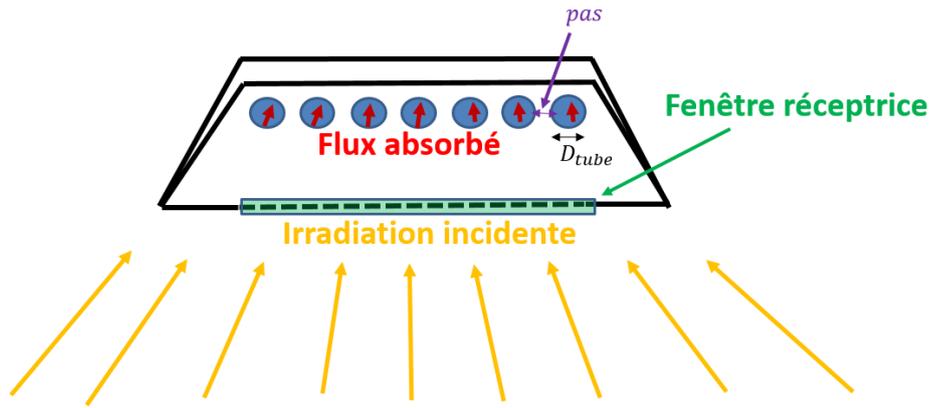


Figure 5-19 : Schéma du récepteur modélisé avec la seconde approche

Le flux absorbé est calculé par la formule suivante :

$$dW[i] = DNI \times FC \times S_f[i] \times \eta_g \quad (V-19)$$

où $S_f[i]$ est la surface de la fenêtre recevant le rayonnement concentré, et qui est calculé à partir du diamètres des tubes absorbants et du pas d'écart défini entre eux :

$$S_f[i] = \frac{L[n_{tubes}D_{tube} + (n_{tubes} + 1) \times pas]}{N_s} \quad (V-20)$$

A partir de la surface de la fenêtre, on peut en déduire la surface des réflecteurs correspondante en utilisant le facteur de concentration, et déterminer un nombre de miroirs et leur largeur unitaire :

$$S_{miroir} = FC \times N_s \times S_f[i] \quad (V-21)$$

En considérant le rendement uniquement entre la puissance incidente à la fenêtre et celle absorbée par les tubes, on fait l'hypothèse que le rendement optique des réflecteurs est de 100% et que l'angle d'incidence n'a pas d'effet (cosinus égal à 1). Cependant, prendre en compte l'effet de l'incidence et de pertes réflecteurs revient simplement à multiplier le terme $DNI \times FC$ par un facteur, on peut donc au besoin scinder le rendement global en différents termes, représentant la totalité des pertes :

$$\eta_g = \cos \theta \times IAM(\theta) \times \eta_{refl} \times \eta_{recep} \quad (V-22)$$

Avec θ l'angle d'incidence, η_{refl} et η_{recep} les rendements respectifs des réflecteurs et du récepteur.

5.3.2. Dimensionnement des récepteurs et du champ solaire

Afin de mettre en application le modèle, un champ solaire est dimensionné sur la base du premier modèle présenté à la section 5.2 de chapitre, mais comportant des différences et des évolutions.

Le tableau suivant résume les paramètres utilisées pour les modèles de récepteurs du vaporiseur et du surchauffeur :

	<i>Vaporiseur</i>	<i>Surchauffeur</i>
<i>Facteur de concentration - FC</i>	40	40
<i>Nombre de tubes - n_{tubes}</i>	28 (4 lignes de 7)	3
<i>Diamètre (externe) des tubes - D_{tube}</i>	2.66 cm	5.56 cm
<i>Ecart entre les tubes du récepteur - pas</i>	2 mm	8 mm
<i>Nombre de segments - N_s</i>	50	30
<i>Longueur - L</i>	257 m	300 m

<i>Largeur de la fenêtre</i>	20.27 cm	19.88 cm
<i>Surface totale de la fenêtre - S_f</i>	208.3 m ²	59.6 m ²
<i>Surface des réflecteurs</i>	8333 m ²	2386 m ²
<i>Rendement global η</i>	85 %	85 %

Tableau 5-15 : Dimensionnement et paramètres des modèles de récepteurs

Ce dimensionnement correspondant au point de fonctionnement atteint pour le champ solaire, dont les caractéristiques sont données par le tableau ci-dessous. Comme pour le dimensionnement du premier champ solaire, ce point de fonctionnement et les paramètres sont les résultats d'une itération entre un modèle Excel simplifié utilisant la macro XSteam et le modèle dynamique ThermoSysPro.

<i>DNI</i>	1000 W/m ²
<i>Vaporiseur – titre massique de sortie</i>	79 %
<i>Surchauffeur – température et pression de sortie</i>	450°C – 80 bars
<i>Débit de recirculation</i>	0.876 kg/s
<i>Vaporiseur – débit total</i>	4.1 kg/s
<i>Débit d'alimentation</i>	3.23 kg/s
<i>Surchauffeur – débit de vapeur</i>	3.23 kg/s
<i>Désurchauffe – débit d'injection</i>	0.085 kg/s

Tableau 5-16 : Point de fonctionnement du champ solaire

On note que le rendement global des récepteurs est largement supérieur à ceux utilisés pour le premier modèle du champ. Cela est dû au fait que la surface d'échange utilisée pour l'échange thermique est nettement moins importante qu'avec le premier modèle de récepteur (de par la méthode de calcul utilisée), et le rendement est donc augmenté pour atteindre le point de fonctionnement. Celui-ci est fixé à 85% pour les deux récepteurs, une valeur réaliste en considérant une efficacité optique parfaite pour les réflecteurs et un effet nul pour l'angle d'incidence.

Une autre conséquence de la surface d'échange thermique plus faible pour ce modèle est que la longueur du surchauffeur a été augmentée, afin d'atteindre la température voulue en sortie tout en ayant un débit de désurchauffe non nul.

La modélisation des pertes de charge pour ce modèle est identique à celle mise en œuvre pour le premier champ solaire, détaillée dans la section 5.2.3.

5.3.3. Définition d'un système de régulation

Le système de contrôle proposé pour le champ solaire est semblable à celui mis en œuvre avec le premier modèle, sauf pour le débit d'alimentation qui sert à réguler le niveau liquide du séparateur diphasique. Si un débit de recirculation constant est assuré par une boucle de régulation indépendante, maintenir le niveau d'eau dans le ballon permet d'assurer un fonctionnement stable du vaporiseur. La figure ci-dessous schématise les trois boucles de régulation :

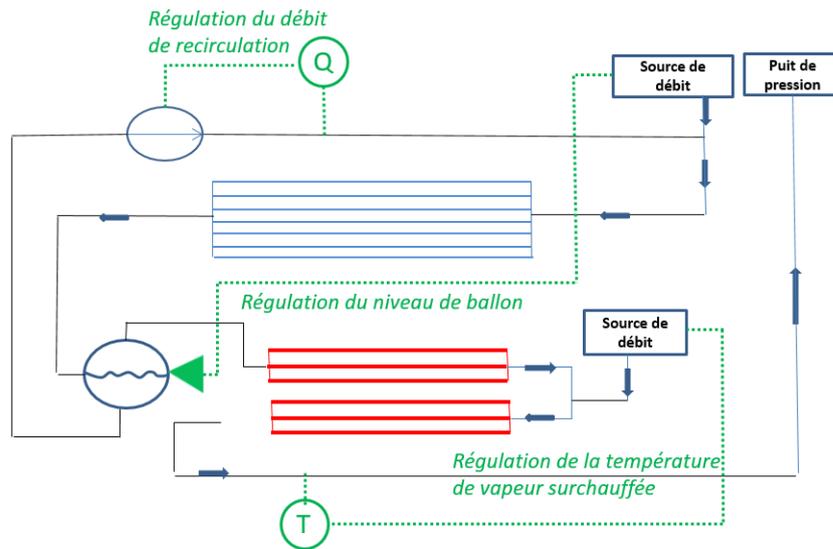


Figure 5-20 : Schématisation du deuxième champ solaire modélisé et de ses boucles de régulation

Les deux autres boucles de régulation sont identiques au premier modèle (utilisant les boucles PI-feedback), mais leurs paramètres sont différents. La figure ci-dessous montre la structure du système global en diagramme-bloc :

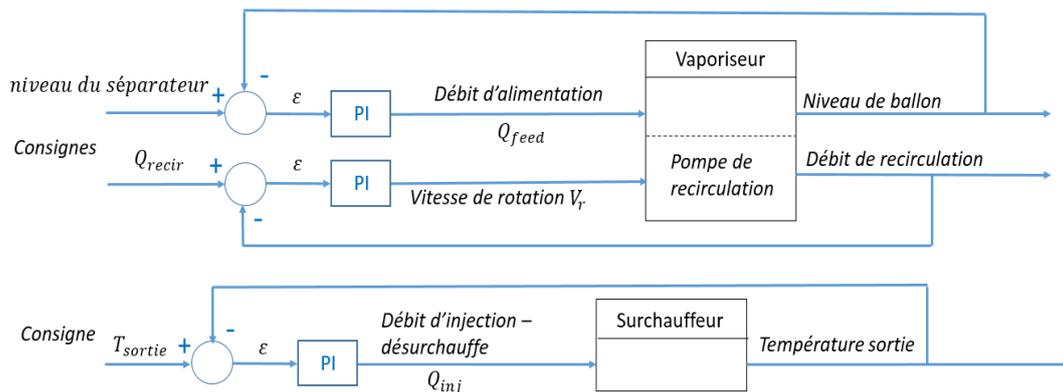


Figure 5-21 : Diagramme bloc du système de régulation proposé pour le second modèle de champ solaire

5.3.3.1. Influence du maillage du surchauffeur sur la détermination de sa dynamique

Dans cette section, nous présentons les résultats d'une étude sur le modèle de surchauffeur du champ solaire, qui consiste à étudier l'influence de la discrétisation du récepteur sur la modélisation de son comportement dynamique. En effet, étant donné que la configuration des boucles de régulation utilise la mesure de la réaction de la grandeur régulée à la modification de l'actionneur, il est important de savoir si le nombre de mailles utilisé impacte cette réaction. Nous avons choisi d'étudier ici la boucle de régulation du débit de désurchauffe, servant à maintenir constante la température de sortie. Une marche sur la température de vapeur (condition limite d'enthalpie) est simulée en entrée du surchauffeur, et on étudie la réaction sur la température de sortie. La Figure 5-22 ci-dessous montre le résultat de ces simulations pour plusieurs discrétisations. Les paramètres du surchauffeur sont ceux décrits dans le Tableau 5-15. La marche d'enthalpie appliquée à la vapeur est de 3250 kJ/kg à 3550 kJ/kg, soit de 441 °C à 562 °C à une pression de 80 bars. Ces températures sont élevées car elles correspondent à un

fonctionnement du surchauffeur sous l'ensoleillement maximal du point de dimensionnement et sans injection de désurchauffe.

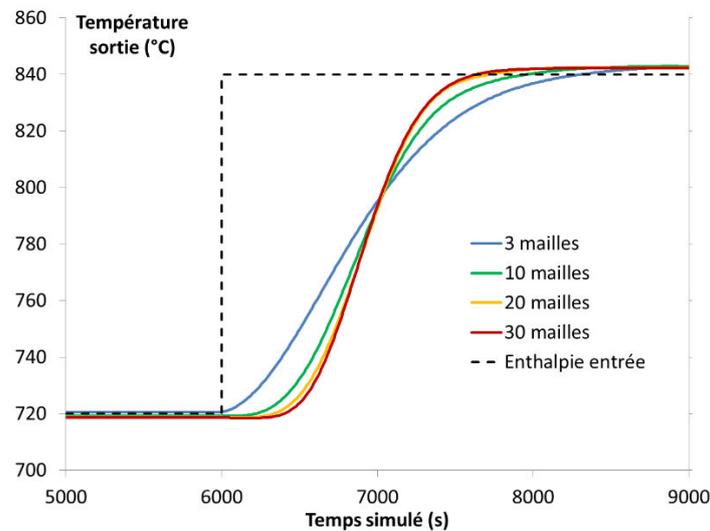


Figure 5-22 : Simulation d'une marche de l'enthalpie de vapeur en entrée du surchauffeur, et mesure de la température de sortie. Débit : 3.0 kg/s, DNI : 1000 W/m², rendement récepteur : 85%, pression de sortie : 80 bars.

On observe que la réponse de la température de sortie change avec le nombre de mailles utilisé pour discrétiser le récepteur. Plus celui-ci est important, plus le retard de la montée en température est important et plus celle-ci se stabilise vite. On note une « convergence » du maillage à la valeur de 30 mailles, puisque la variation entre les courbes pour 20 et 30 mailles est faible. C'est donc une discrétisation à 30 mailles qui est utilisée dans les simulations.

5.3.3.2. Configuration des boucles de régulation

5.3.3.2.1. Débit d'injection de désurchauffe, régulation de la température

Comme pour le système de régulation abordé précédemment, la méthode de réaction est utilisée en boucle ouverte pour dimensionner la régulation.

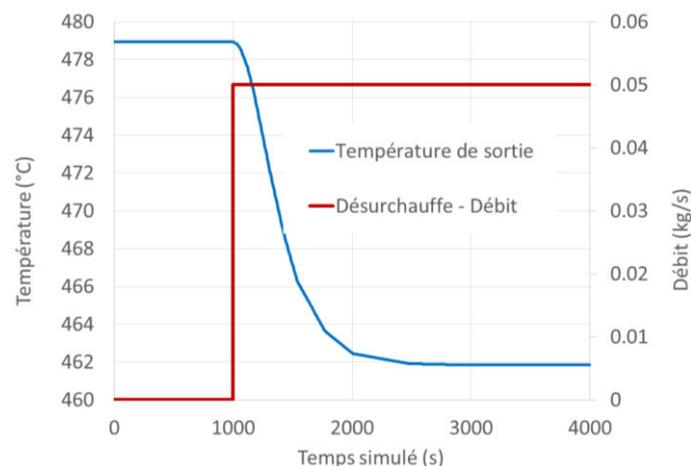


Figure 5-23 : Réaction en boucle ouverte de la température de sortie de surchauffeur

La Figure 5-23 montre la simulation de la température en sortie de surchauffeur lorsqu'on applique une marche sur le débit d'injection de désurchauffe. On observe un comportement dynamique analogue à

un système du premier ordre avec retard. On utilise ensuite un algorithme pour identifier les paramètres de ce système sur lequel on veut calquer l'évolution de température. La figure ci-dessous montre les constructions utilisées sur la courbe pour identifier ces paramètres. L'échelle en abscisse est en temps relatif par rapport au temps de démarrage de la marche.

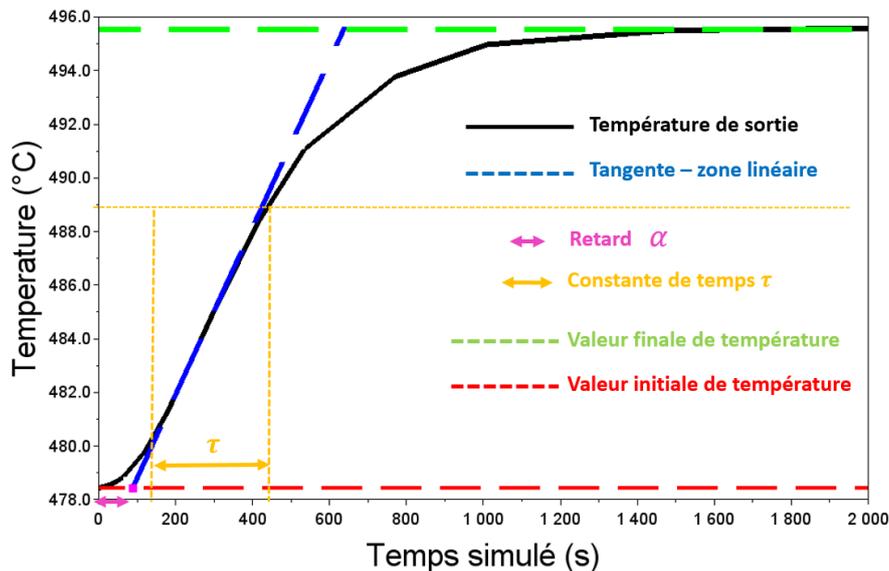


Figure 5-24 : Constructions utilisées pour l'identification des paramètres du système premier ordre retardé. Le temps simulé est relatif par rapport au démarrage de la marche de débit

La courbe de température a été inversée pour faciliter l'identification des paramètres. Celle-ci montre une zone de croissance linéaire dont on trace la tangente, ce qui permet de déterminer le temps du retard du modèle en utilisant l'intersection avec la valeur initiale. La constante du temps du modèle est elle déterminée avec la règle des 63%. Le modèle auquel cette approche a abouti donne la fonction de transfert suivante entre la température de sortie et le débit injecté en désurchauffe :

$$\frac{T_{surch}}{\Delta Q_{inj}}(s) = \frac{K e^{-\alpha s}}{\tau s + 1} = \frac{-342 e^{-88s}}{368s + 1} \quad (V-23)$$

τ est la constante de temps du système, et α le retard.

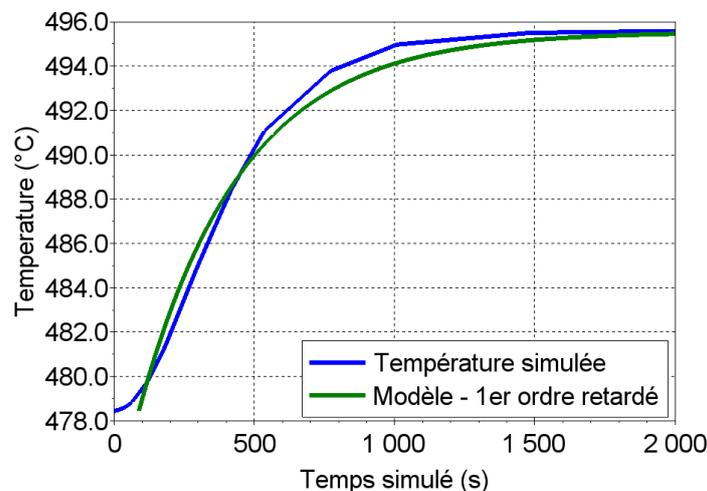


Figure 5-25 : Température en sortie de surchauffe simulée (après inversion) et modèle identifié

A partir de ce modèle, plusieurs configurations sont identifiées pour le régulateur PI, à partir de corrélations de la littérature. Le tableau ci-dessous synthétise les corrélations et les valeurs calculées pour la boucle de régulation de la température :

	<i>Corrélation</i>		<i>Valeur</i>	
	<i>Gain K_c</i>	<i>Constante de temps T_i</i>	<i>Gain K_c</i>	<i>Constante de temps T_i</i>
<i>Ziegler & Nichols</i>	$\frac{0.9}{K} \left(\frac{\tau}{\alpha}\right)$	3.33α	-0.011	293
<i>Cohen & Coon</i>	$\frac{1}{K} \left(\frac{\tau}{\alpha}\right) \left[0.9 + \frac{1}{12} \left(\frac{\alpha}{\tau}\right)\right]$	$\alpha \left[\frac{30 + 3 \frac{\alpha}{\tau}}{9 + 20 \frac{\alpha}{\tau}} \right]$	-0.012	196
<i>ITAE minimal – changement de consigne (Smith, Murrill et al.)</i>	$\frac{0.586}{K} \left(\frac{\tau}{\alpha}\right)^{0.916}$	$\frac{\tau}{\left[1.03 - 0.165 \frac{\alpha}{\tau}\right]}$	-0.0063	371
<i>ITAE minimal – rejet de perturbation (Smith, Murrill et al.)</i>	$\frac{0.859}{K} \left(\frac{\tau}{\alpha}\right)^{0.977}$	$\frac{\tau}{\left[0.796 - 0.147 \frac{\alpha}{\tau}\right]}$	-0.0102	206

Tableau 5-17 : Paramètres du régulateur PI, selon les corrélations de la littérature

On voit que les quatre corrélations donnent des valeurs relativement proches pour les paramètres des régulateurs PI. Les corrélations utilisant la méthode ITAE (pour *Integral Time-weighted Absolute Error*) consistent à minimiser l'erreur de la variable à réguler par rapport à une consigne donnée, et proposent un réglage des paramètres des régulateurs dans ce sens. Elles ont la particularité de distinguer la régulation consistant à rejeter les perturbations sur le système de la régulation dédiée spécifiquement au suivi des consignes lorsqu'elles sont modifiées.

Ces différentes valeurs de paramètres du régulateur PI ont été utilisées dans le modèle et des simulations de fonctionnement du champ solaire durant une journée normale d'ensoleillement ont été menées. Il s'avère que ces valeurs donnent à la boucle de régulation un comportement instable, ou bien que les calculs Dymola ne parviennent pas à converger. Un réglage optimal du PI a donc été recherché « manuellement », en étudiant différentes combinaisons entre les valeurs du gain et de la constante de temps. Les valeurs sont données dans le tableau plus loin résumant toutes les boucles. La corrélation donnant les valeurs de réglage les plus proches de celles atteintes manuellement est celle de la méthode ITAE (changement de consigne). On constate qu'en modifiant légèrement la zone linéaire identifiée sur la courbe de réponse en boucle ouverte (Figure 5-24), les paramètres du modèle identifié (constante de temps et retard) changent, et le réglage conseillé par la méthode ITAE change également, et se rapproche davantage du réglage utilisé.

5.3.3.2.2. Débit d'alimentation, régulation du niveau du ballon séparateur

Afin d'évaluer l'influence du débit d'eau alimentaire sur le ballon, on utilise à nouveau la méthode de la réaction à une marche d'entrée en boucle ouverte. Il s'agit donc ici de simuler avec notre modèle l'évolution du niveau de ballon lorsqu'on impose une marche soudaine de débit d'alimentation. La Figure 5-26 ci-dessous l'évolution simulée de la hauteur dans le ballon. Comme pour les autres simulations en boucle ouverte, celle-ci démarre avec les conditions initiales représentant le point de fonctionnement stabilisé sans régulation.

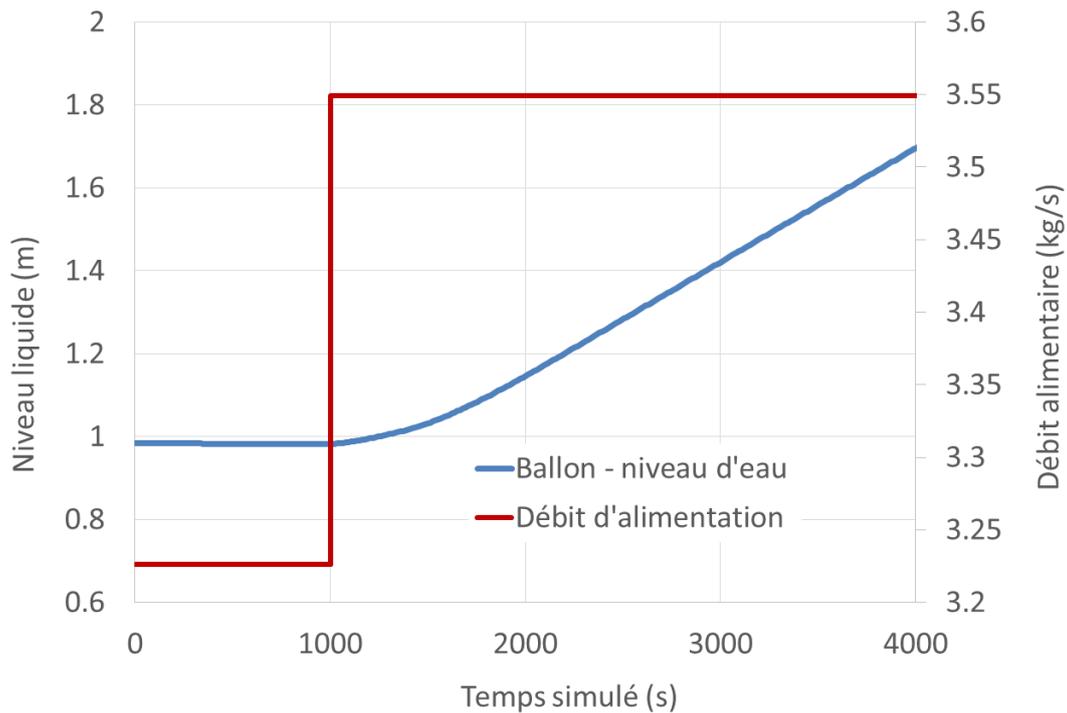


Figure 5-26 : Réaction en boucle ouverte du niveau d'eau du ballon séparateur à une marche de débit d'alimentation. DNI : 1000 W/m², débit recirculation : 0.876 kg/s.

On constate que le système a un comportement intégrateur instable, c'est-à-dire que la variable régulée augmente continuellement suite à la marche modifiant la valeur de l'actionneur. On constate également un léger temps mort avant l'augmentation du niveau liquide. La fonction de transfert d'un système retardé de ce type prend la forme suivante :

$$F_i(s) = \frac{K_i e^{-\tau_i s}}{s} \quad (V-24)$$

Où K_i est le gain du système et τ_i son retard. Ces paramètres sont calculés à partir des résultats de simulation (Figure 5-26). Comme pour un modèle du premier ordre, des corrélations existantes dans la littérature proposent des règles de calcul pour paramétrer les régulateurs PI à partir de ce modèle intégrateur. Ces corrélations ne donnant pas de résultat intéressant dans le modèle, nous avons donc privilégié un réglage « manuel » des paramètres pour cette boucle de régulation également.

5.3.3.2.3. Résumé des boucles de régulation

<i>Boucle de régulation</i>	<i>Modèle identifié</i>	<i>Paramètres du PI</i>	<i>Consigne</i>
<i>Débit de recirculation</i>	Simple gain, $k=333$	$K_C = 500, T_i = 60$	1.386 kg/s
<i>Niveau du séparateur</i>	$\frac{8.27 \times 10^{-4} e^{-440s}}{s}$	$K_C = 2.0, T_i = 2000$	1.12 m
<i>Température – sortie surchauffeur</i>	$\frac{-342e^{-88s}}{368s + 1}$	$K_C = -0.005, T_i = 1000$	450 °C

Tableau 5-18 : Paramètres des boucles de régulation proposées pour le second modèle de champ solaire.

On remarque que la consigne pour le débit de recirculation est différente de la valeur au point de dimensionnement. La raison est que la configuration présentée ici est celle utilisé pour réguler le champ solaire durant une journée de fonctionnement normale, c'est-à-dire avec un ensoleillement constamment

variable. Les simulations préliminaires utilisées pour « démarrer » le champ solaire sont donc différentes et n'aboutissent pas au même fonctionnement stabilisé que celles pour atteindre le point de dimensionnement détaillé précédemment. Concernant la régulation de vitesse de pompe, des simulations en boucle ouverte montrent que le débit réagit instantanément à un changement de vitesse de rotation dans le modèle. La fonction de transfert du modèle identifié est donc un gain simple. En pratique, le vaporiseur ayant une longueur importante, le changement de débit a un léger retard et on choisit donc une constante de temps d'une minute pour le régulateur PI. Le temps de séjour de fluide dans le vaporiseur a été calculé avec le premier champ solaire modélisé à la section 5.2.6.1 (Tableau 5-10), sa valeur étant de 268 secondes pour un débit total de 4.5 kg/s environ. On peut supposer ici une valeur similaire pour le temps de séjour dans le vaporiseur puisque le débit est proche. On a donc une constante de temps d'environ 20% du temps de séjour pour la régulation du débit de recirculation.

5.3.4. Simulation d'une journée de fonctionnement

Les figures suivantes montrent l'évolution simulée des principales variables du champ solaire, soumis à l'ensoleillement direct d'une journée sans perturbation. La simulation utilise la mesure du DNI du 12 juillet 2012 à Cadarache, provenant du pyréliomètre du prototype Alsolen. Les données démarrent à 05h44 du matin, mais la simulation présentée ici démarre à 05h52 lorsque le DNI est de 436 W/m². Des simulations préliminaires sont réalisées afin d'amener le champ solaire à fonctionnement avec cette valeur, mais plus lentement qu'avec la mesure car la montée est trop brutale pour que le calcul Dymola soit stable.

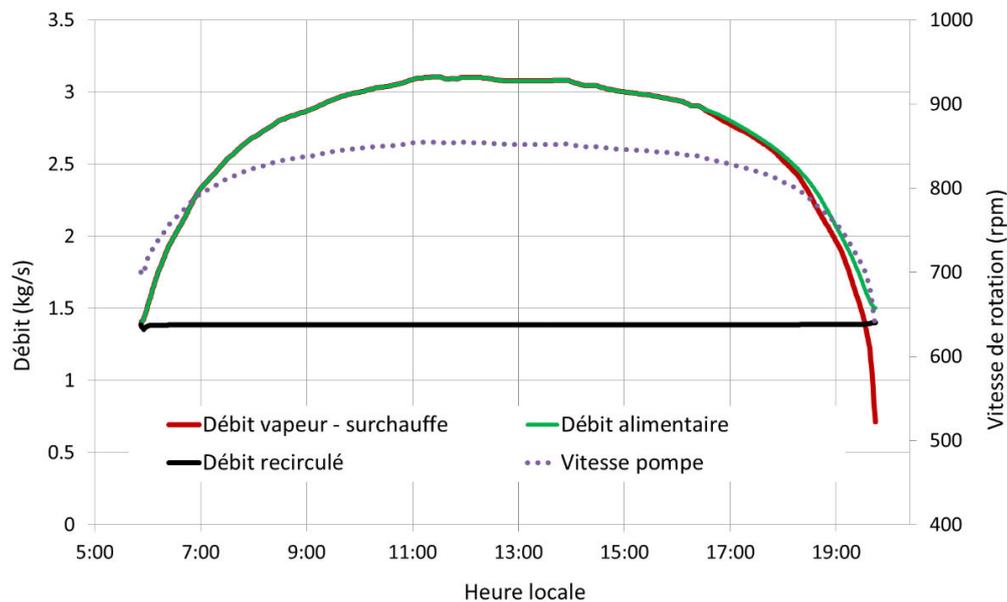


Figure 5-27 : Evolution des débits du champ solaire et de la vitesse de la pompe de recirculation

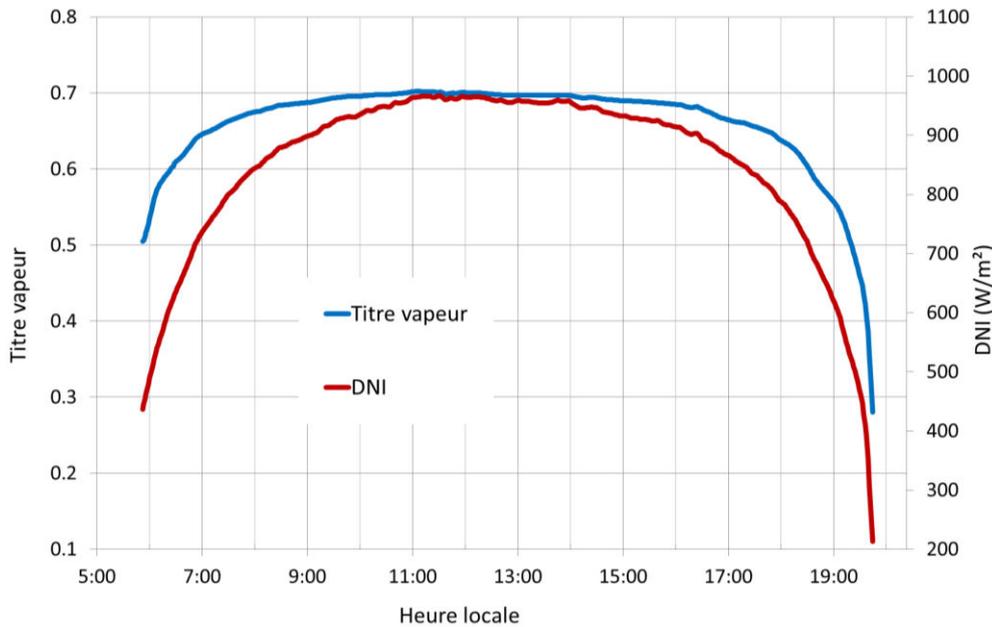


Figure 5-28 : Evolution du DNI et du titre vapeur en sortie de vaporiseur

On voit sur la Figure 5-27 et la Figure 5-28 que le débit de vapeur générée et le titre massique augmente de la même façon que le rayonnement reçu. Avec la génération de vapeur, la perte de charge dans le vaporiseur augmente et la pompe doit donc tourner plus vite pour maintenir le débit. C'est l'objectif de la boucle de régulation proposée, et on voit sur la Figure 5-27 que celle-ci fonctionne correctement puisque le débit de recirculation est stable et la vitesse de rotation suit la courbe de DNI. La vitesse diminue en effet lorsque le rayonnement et la génération de vapeur baissent à nouveau. On voit également que le débit d'alimentation suit la génération de vapeur puisque la boucle de régulation du ballon séparateur fait en sorte que le niveau soit stable. Lorsque que le débit et le titre massique de la vapeur générée augmentent, la hauteur d'eau va avoir tendance à baisser puisque la vapeur vient progressivement remplacer l'eau liquide dans le ballon. La régulation vient alors augmenter le débit d'alimentation d'eau « froide » pour compenser cette baisse. On note sur la Figure 5-29 que le niveau liquide du ballon est stable jusqu'à environ 17h, puis celui-ci augmente lorsque la régulation n'abaisse plus assez le débit d'eau alimentaire. Ce constat s'observe également sur les courbes de débit, puisqu'on voit que les valeurs des débits d'alimentation et de vapeur générée s'écartent à partir de 17h, alors qu'elles restaient très proches depuis le début de la journée. La raison à cela est la limite de saturation du régulateur de débit alimentaire, qui fixe une valeur minimale sous laquelle il ne doit pas descendre. L'augmentation du niveau en fin de journée ne paraît pas problématique puisque le champ solaire cesse de fonctionner vers 19h45, temps où la simulation s'arrête (à ce moment, le DNI est d'environ 200 W/m² et le débit de vapeur surchauffée de 0.7 kg/s). Il paraît même intéressant d'augmenter le niveau d'eau liquide dans le ballon en prévision d'une nouvelle journée de fonctionnement, car on pourrait ainsi disposer d'une réserve d'eau à saturation qui permettrait de créer rapidement de la vapeur en « flashant » le ballon, c'est-à-dire en vaporisant l'eau saturée par ouverture des vannes vers le surchauffeur et par dépressurisation. Cela permettrait notamment le préchauffage du surchauffeur et de la turbine dans une centrale réelle.

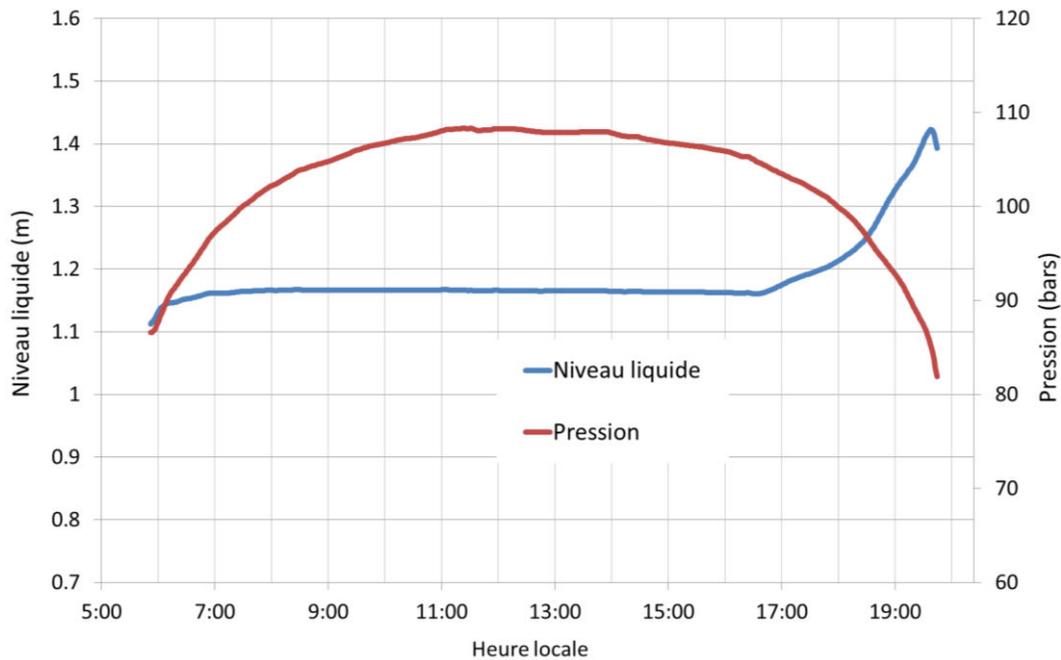


Figure 5-29 : Niveau liquide et pression dans le ballon séparateur, journée simulée du 12 juillet 2012 à Cadarache

On voit sur la Figure 5-30 ci-dessous qu’au moment du démarrage de la simulation, la température de vapeur surchauffée est à 450°C et que le débit délivré est de 1.4 kg/s. Les simulations préliminaires menées ont en effet amené le champ solaire à ce point de fonctionnement, et le rayonnement direct est suffisant pour l’atteindre. On observe que la température de vapeur dépasse la consigne de 450°C en début de simulation, car celle-ci démarre sur un état stabilisé de fonctionnement. L’augmentation du DNI dès le début du calcul mène donc à un nouveau calcul des actions de régulation, d’où le dépassement et la stabilisation de la température en sortie de surchauffe. On voit en effet que le débit injecté en désurchauffe chute au tout début de la simulation, puis augmente à nouveau rapidement. C’est donc un « artifice » lié à la simulation précédente servant à démarrer le calcul.

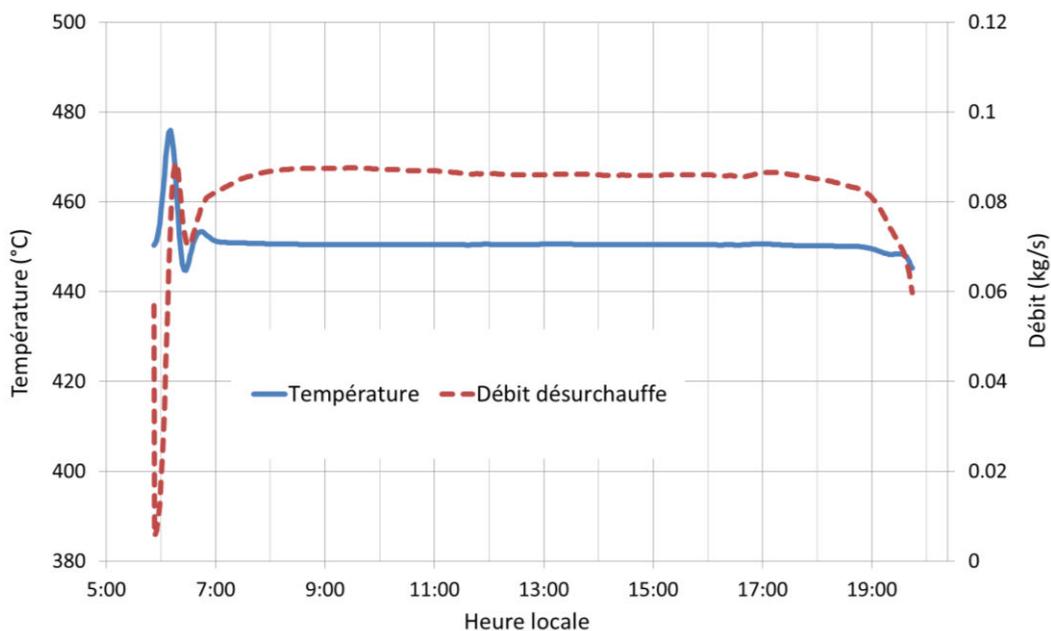


Figure 5-30 : Température de sortie et débit d'injection dans le surchauffeur

En fin de journée, la température ne baisse sous la consigne qu'à partir de 19h, la diminution du débit de vapeur et d'injection de désurchauffé permettant de palier à la baisse de l'ensoleillement direct.

5.4. Conclusion sur les modèles et la régulation développés, et perspectives d'amélioration

Dans ce chapitre, nous avons présenté deux modèles de champ solaire différents, en proposant pour chacun de ces modèles une régulation adaptée. Les deux modèles de champ utilisent chacun un modèle optique de récepteur Fresnel développé durant ce travail de thèse.

Les simulations réalisées avec le premier modèle ont permis d'étudier la dynamique de la partie vaporiseur du champ solaire sans régulation, lorsqu'il est soumis à des perturbations des débits d'entrée et du rayonnement reçu. Nous avons observé une bonne concordance entre nos résultats et ceux d'une étude de référence du DLR modélisant un champ solaire cylindro-parabolique, notre modèle semblant toutefois montrer une plus grande inertie thermique. Une régulation basée sur des boucles PI-feedback a ensuite été proposée pour le champ solaire entier, et sa performance a été évaluée en simulant une perte brutale d'ensoleillement. La régulation permet de diminuer fortement les transitoires de débit, température, et pression tout en limitant la chute de génération de vapeur. Les gradients de température observés en sortie de surchauffeur paraissent toutefois encore trop élevés pour continuer à alimenter directement une turbine à vapeur en condition réelle de fonctionnement. Une régulation de type feedforward a été modélisée pour le contrôle de la température de sortie, et la simulation montre qu'elle permet de réduire l'amplitude des variations de température, mais que les gradients observés restent globalement les mêmes. Le temps de retour de consigne est aussi plus long avec cette méthode. Une amélioration immédiate de cette régulation serait de coupler la boucle feedforward à une boucle PI-feedback classique utilisant la mesure de la température de sortie effective.

Le deuxième modèle de champ solaire utilise un modèle optique de récepteur amélioré, qui semble plus réaliste dans sa façon de calculer la surface d'échange thermique recevant le flux concentré, et permettant ainsi de définir un rendement plus réaliste. Cette approche de modélisation permet d'appliquer plus facilement ce modèle à des installations réelles, avec lesquelles le rendement est mesurable expérimentalement. Une régulation du champ solaire est également modélisée, et le modèle global est utilisé pour simuler le fonctionnement de l'installation sous l'ensoleillement d'une belle journée d'été à Cadarache. Les résultats montrent que la régulation est satisfaisante pour la journée en question. Une suite immédiate à ce travail serait évidemment d'évaluer les performances de cette régulation pour le rejet de perturbations brutales d'ensoleillement.

Concernant les boucles de régulation utilisant une approche feedback et un régulateur PI, l'exercice de réglage des paramètres du PI consistant à identifier un modèle de comportement en boucle ouverte et à l'utiliser pour déterminer un réglage adapté (via des corrélations) a été mené. Ces méthodes paraissent utiles pour déterminer les ordres de grandeur des paramètres, mais les simulations avec les valeurs précises suggérées par ces corrélations ne sont pas stables. Une approche de réglage manuel a été donc été privilégiée pour les paramètres du PI, tout en restant dans le bon ordre de grandeur.

5.5. Références

- [1] “<http://xsteam.sourceforge.net/>.” .
- [2] J. F. Feldhoff, M. Eickhoff, L. Keller, J. L. Alonso, M. Meyer-Grünefeldt, L. Valenzuela, J. Pernpeintner, and T. Hirsch, “Status and First Results of the DUKE Project – Component Qualification of New Receivers and Collectors,” *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 1766–1776, 2014.
- [3] L. Valenzuela, E. Zarza, and J. León, “APPROACHES FOR CONTROLLING THE LEVEL IN WATER / STEAM SEPARATORS OF A DSG SOLAR FIELD CONFIGURED IN RECIRCULATION MODE,” in *SolarPACES2006*, 2006, pp. 1–8.
- [4] M. Eck and T. Hirsch, “Dynamics and control of parabolic trough collector loops with direct steam generation,” *Sol. Energy*, vol. 81, pp. 268–279, 2007.
- [5] T. Hirsch, W. Steinmann, and M. Eck, “Simulation of transient two-phase flow in parabolic trough collectors using Modelica,” 2005.
- [6] “Manuel Technique du GRETh (CEA); Fiche TM1 : Perte de pression régulière dans les conduites rectilignes de section uniforme.”
- [7] “Manuel Technique du GRETh (CEA); Fiche TM8 : Perte de pression régulière dans les conduites rectilignes de section uniforme.”
- [8] B. A. Ogunnaike and W. Harmon Ray, *Process Dynamics, Modeling, and Control*. Oxford University Press, 1994.
- [9] J. Birnbaum, J. F. Feldhoff, M. Fichtner, T. Hirsch, M. Jocker, R. Pitz-paal, and G. Zimmermann, “Steam temperature stability in a direct steam generation solar power plant,” *Sol. Energy*, vol. 85, pp. 660–668, 2011.
- [10] L. Valenzuela, E. Zarza, M. Berenguel, and E. F. Camacho, “Control scheme for direct steam generation in parabolic troughs under recirculation operation mode,” *Sol. Energy*, vol. 80, pp. 1–17, 2006.