

N° d'ordre : / Faculté / UMBB / 2019

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie
Département Automatisation et électrification des procédés industriel

Mémoire de fin d'études En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Présenté par :

REZAZGUI MOHAMED YOUSRI

AZIZI ABDESAMIA

Filière : Hydrocarbures

Domaine : Sciences et Technologies

Option : Automatisation des procédés industriel : Commande automatique

Thème

Commande à régime glissant du niveau et de la température d'un système hydro-thermique soumis à des perturbations

Devant le jury :

M Med Said BOUMEDIENE	UMBB	Président
M ^{me} Fadhila KAHOUL	UMBB	Examineur
M Abdelmalek KHEBLI	UMBB	Examineur
M Tewfik YOUSSEF	UMBB	Encadreur

Remerciements

Avant tout, et en premier lieu, nous tenons à remercier Dieu, le Tout Puissant, de nous avoir accordé force et volonté afin survivre et poursuivre nos buts, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé à la faculté des Hydrocarbures et de la Chimie de l'université M'hamed Bougara de Boumerdès, sous l'encadrement et le bon vouloir de M. T. YOUSSEF, notre plus grande gratitude et profond respect vont à cet homme, pour la patience, le temps consacré et la confiance qu'il nous a accordés. Nous avons pu bénéficier tout le long de ce travail et à travers les nombreuses discussions de ses idées et orientations judicieuses. Nous aimerions également le remercier pour l'autonomie qu'il nous a accordée, et ses précieux conseils qui nous ont permis de mener à bien ce travail à terme.

Nous exprimons notre gratitude à tous ceux qui ont su être là depuis le début, nos professeurs du département Automatisation et Électrification Industrielle qui nous ont guidé pendant toutes ces années de spécialité et enrichi nos connaissances.

Enfin, nos derniers remerciements et non des moindres, vont à nos parents, nos douces mères et nos vaillant pères pour l'affection, l'amour, les conseils et la bienveillance qu'ils nous ont prodigués au cours de toute ces années ; Tous les mots du monde ne sauraient vous rendre grâce, merci. Sans oublier, nos chers frères et sœurs avec qui on a tant partagé.

À M. A. TAIBI, pour son aide inestimable dans la rédaction de ce modeste document et à tous nos amis sans exception, qui ont été avec nous dans cette période.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :
A mon très cher père REZAZGUI Salim, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir et à ma très chère mère KRIBET Lotfia, la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur.
Puisse Dieu, le tout puissant, vous préserver et vous accorder santé, longue vie et bonheur.

A mes grands-parents, ceux dont les prières et les bénédictions ont toujours béni ma route
A mes chères sœurs Rama et Hadil

Je dédie ce travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs conseils, aides, et encouragements.

A mon cher Binôme AZIZI Abdesamia
A tous mes chers amis : Walid, Abdenour, Abderraouf, Kacem, Abderrahmen

A tous mes professeurs qui m'ont enseigné,
A tous ceux qui me sont chers.
Et tous ceux que j'aime et tous ceux qui m'aiment.

REZAZGUI Mohamd Yousri

Dédicaces

C'est avec profonde gratitude et sincères mots,
que je dédie ce modeste travail de fin d'étude à mes très chers
parents Mon père *AZIZI Saleh*, et ma fameuse mère *AZIZI Fatima*,
qui ont sacrifié leur vie pour ma réussite et qui ont éclairé le
chemin par leurs conseils judicieux. J'espère qu'un jour, je puisse
leurs rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour moi, que dieu leur
prête bonheur et longue vie.

Je dédie aussi ce travail à mes chers frères et mes chères sœurs
qui me donnent que la joie dans ma vie.

A mon cher Binôme *REZAZGUI Mohamed Yousri*
A tous mes chers amis

A tous mes professeurs qui m'ont enseigné,
A tous ceux qui me sont chers.
Et tous ceux que j'aime et tous ceux qui m'aiment.

AZIZI Abdesamia

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Régulation et instrumentation industriel	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Généralité.....	4
I.3 Notion de base sur les systèmes.....	4
I.3.1 Notion de système.....	4
I.3.1.1 Linéarité et non linéarité.....	5
I.3.1.1.1 Système linéaire.....	5
I.3.1.1.2 Système non linéaire.....	5
I.3.2 Théorie de la commande.....	5
I.3.2.1 Terme commande.....	5
I.3.2.2 Commande automatique.....	6
I.3.2.3 Commande en boucle ouverte.....	6
I.3.2.4 Commande en boucle fermée.....	6
I.3.3 Régulation.....	6
I.3.3.1 Comportement en régulation.....	7
I.3.3.2 Comportement en asservissement.....	8
I.3.4 Systèmes invariants.....	8
I.3.5 Systèmes multivariable.....	9
I.3.6 Observabilité et Commandabilité.....	9
I.3.6.1 Commandabilité.....	10
I.3.6.2 Observabilité.....	10
I.4 Instrumentation.....	11
I.4.1 Signale de mesure.....	11
I.4.1.1 Signal analogique.....	11
I.4.1.2 Signal numérique.....	11
I.4.2 Technologie générale d'un capteur/transmetteur.....	12
I.4.3 Instruments de mesure et de contrôle du système hydrothermique.....	13
I.4.3.1 Instruments de mesures.....	13
I.4.3.1.1 Mesure et capteur de niveau.....	13
I.4.3.1.1.1 Mesure de niveau.....	13
I.4.3.1.1.2 Types de capteurs de niveau.....	14
I.4.3.1.2 Mesure et capteur de température.....	16
I.4.3.1.2.1 Mesure de température.....	16

Sommaire

I.4.3.1.2.2	Types de capteurs de température Thermomètres à dilatation.....	16
I.4.3.2	Instruments de contrôle.....	18
I.4.3.2.1	Vanne de régulation.....	18
I.4.3.2.2	Pompes centrifuges.....	19
I.5	Conclusion.....	20

Chapitre II : Description et modélisation du système hydro-thermique

II.1	Introduction.....	23
II.2	Description du système hydro-thermique.....	23
II.2.1	Présentation du banc d'essai.....	23
II.2.2	Principe de fonctionnement.....	24
II.3	Modélisation du système.....	25
II.3.1	Système non linéaire.....	25
II.3.1.1	Bilan massique.....	25
II.3.1.2	Bilan énergétique.....	26
II.3.1.3	Représentation d'état du système.....	28
II.3.2	Linéarisation.....	29
II.3.2.1	Choix du point de fonctionnement.....	31
II.4	Validation des modèles du système hydro-thermique sous Matlab.....	33
II.4.1	Introduction au logiciel MATLAB/Simulink.....	33
II.4.2	Schémas blocs des Modèles sous MATLAB/Simulink.....	34
II.4.2.1	Résultat de simulation sans effets des perturbations.....	34
II.4.2.2	Interprétation des résultats.....	37
II.4.2.3	Simulation avec application des perturbations.....	38
II.4.2.4	Interprétation des résultats.....	39
II.5	Conclusion.....	40

Chapitre III :Commande par régime glissant

III.1	Introduction.....	42
III.2	Système à structure variable.....	42
III.3	Principe de la commande à structure variable à régime glissant.....	42
III.3.1	Fonction de commutation.....	43
III.3.2	Hyperplan de commutation.....	43
III.3.3	Régime glissant.....	43
III.3.4	Surface de glissement.....	43
III.3.4.1	Mode de convergence (MC).....	44

Sommaire

III.3.4.2	Mode de glissement (MG).....	44
III.3.4.3	Mode du régime permanent (MRP).....	44
III.3.5	Conditions d'existence et de convergence du régime glissant.....	44
III.3.5.1	Fonction discontinue de commutation.....	44
III.3.5.2	Fonction de Lyapunov :.....	45
III.3.6	Surface glissante linéaire.....	45
III.3.7	Détermination de la loi de commande.....	48
III.3.7.1	Commande en cas de stabilisation.....	48
III.3.7.1.1	Commande équivalente.....	48
III.3.7.1.2	Commande discontinue.....	48
III.3.7.2	Commande en cas de poursuite.....	49
III.3.7.2.1	Commande équivalente.....	49
III.3.7.2.2	Commande discontinue.....	49
III.3.7.3	Etude de stabilité du système sur la base de la fonction de Lyapunov.....	49
III.3.8	Phénomène du broutement.....	50
III.3.9	Suppression du phénomène de réticence.....	51
III.3.9.1	Commande avec seuil.....	51
III.3.9.2	Commande SAT.....	51
III.3.9.3	Commande Smooth.....	52
III.3.9.4	Commande th (tangente hyperbolique).....	52
III.3.10	Commande à régime glissant du système hydro-thermique.....	53
III.3.10.1	Schémas bloc de la commande à régime glissant du système hydro-thermique.....	53
III.3.10.2	Résultats de simulation.....	54
III.3.10.2.1	Etude en stabilisation.....	54
III.3.10.2.2	Etude en poursuite.....	56
III.3.10.2.3	Elimination de l'effet du broutement.....	59
III.3.10.2.3.1	Utilisation de la commande discontinue sign :.....	60
III.3.10.2.3.2	Utilisation de la commande continue smooth :.....	61
III.3.10.2.3.3	Utilisation de la commande continue th.....	63
III.3.10.2.3.4	Utilisation de bloc de saturation.....	65
III.3.10.3	Interprétation des résultats.....	68
III.4	Conclusion.....	70

Chapitre IV : Synthèse de l'observateur

IV.1	Introduction.....	72
IV.2	Définition.....	72
IV.3	Types d'observateurs	73
IV.3.1	Observateurs non linéaires	73
IV.3.2	Observateurs linéaires	73
IV.3.2.1	Observateur de Luenberger	74
IV.3.2.1.1	Calcul du gain de l'approche modale.....	76
IV.4	Schéma bloc de l'observateur des états du système hydro-thermique	77
IV.4.1	Validation de l'observateur	77
IV.4.2	Résultats de simulations	77
IV.4.3	Interprétation des résultats.....	80
IV.5	Conclusion	80
Chapitre V : Association de la commande à régime glissant de l'observateur sans et avec action intégrale		
V.1	Introduction.....	82
V.2	Association de l'observateur avec la commande à régime glissant sans action intégrale	82
V.2.1	Schémas bloc du système linéaire et non linéaire de la commande à régime glissant à base d'observateur.....	82
V.2.2	Résultats de simulation.....	83
V.2.2.1	Sur la base de la sortie du modèle linéaire	83
V.2.2.2	Sur la base de la sortie du modèle non linéaire	87
V.2.3	Interprétation des résultats.....	90
V.2.4	Comparaison entre les résultats obtenu par la commande à régime glissant associé à l'observateur d'état basé sur la sortie du modèle linéaire et non linéaire du système hydro-thermique :	91
V.3	Commande en régime glissant avec action intégrale.....	93
V.3.1	Calcul de la commande équivalente.....	95
V.3.2	Calcul de la commande discontinue	96
V.3.3	Schémas blocs des systèmes linéaire et non linéaire contrôlées par une commande à régime glissant avec action intégrale	97
V.3.4	Résultats de la simulation.....	98
V.3.5	Interprétation des résultats.....	101
V.4	Conclusion	103
Conclusion générale.....		104

Liste des figures

Figure I-1: Schéma de principe de la chaine de régulation	7
Figure I-2: Réponse indicielle en régulation d'un procédé	8
Figure I-3: Réponse indicielle en asservissement d'un procédé	8
Figure I-4: Système invariant	9
Figure I-5: Représentation des systèmes multivariable.....	9
Figure I-6: Représentation graphique des signaux	12
Figure I-7: Schématisation d'un capteur transmetteur	13
Figure I-8: Mesure d'un niveau	14
Figure I-9: Mesure de niveau par un capteur de pression différentielle.....	15
Figure I-10: Transmetteur de niveau à plongeur.	15
Figure I-11: Convertisseur I/P	16
Figure I-12: Vanne de réglage de débit.....	18
Figure I-13: Une pompe centrifuge	20
Figure II-1: Processus Hydro-thermique.....	23
Figure II-2 : Système dynamique multivariable.....	25
Figure II-3: Interface de Simulink.....	34
Figure II-4: Bloc de simulation du modèle linéaire et non-linéaire en boucle ouverte.	34
Figure II-5: Comparaison du modèle linéaire et non linéaire –niveau- sans variation sur les entrées en boucle ouverte.	35
Figure II-6: Comparaison de modèle linéaire et non linéaire – température-sans variations sur les entrées en boucle ouverte	35
Figure II-7: Comparaison du modèle linéaire et non linéaire – niveau - avec variation sur les entrées en boucle ouverte.	36
Figure II-8 : Comparaison de modèle linéaire et non linéaire – température – avec variation sur les entrées en boucle ouverte.	37
Figure II-9: Comparaison du modelé linéaire et non linéaire de H2avec variations sur les entrées et avec perturbations en boucle ouverte.	38
Figure II-10: Comparaison de modèle linéaire et non linéaire T2 avec variations sur les entrées et avec perturbations en boucle ouverte.	39
Figure III- 1: Les différents modes pour la trajectoire dans le plan de Phase.....	44
Figure III- 2: Phénomène de broutement.	50
Figure III- 3: Fonction signe de la commande avec un seul seuil.....	51
Figure III- 4: Fonction SAT.	52
Figure III- 5: Fonction Smouth	52
Figure III- 6: Fonction th	53
Figure III- 7: Simulation du modèle linéaire et non linéaire avec correcteur pour étudier la stabilisation.....	53
Figure III- 8: Simulation du modèle linéaire et non linéaire avec correcteur pour la commande glissante.....	54
Figure III- 9: Simulation de la commande u1et u2	54
Figure III- 10: Trajectoire d'état $x_4 = f(x_2)$	55
Figure III- 11: Simulation des états.....	55
Figure III- 12: Simulation du modèle L et NL de H2 avec correcteur sans perturbations	56
Figure III- 13: Simulation du modèle L et NL de T2 avec correcteur sans perturbations.	57
Figure III- 14: Simulation de la variation de la surface de glissement	57

Liste des figures

Figure III- 15: simulation de la commande u_1 et u_2 de correcteur.....	58
Figure III- 16: Simulation du modèle L et NL de H2 avec correcteur avec perturbations .	58
Figure III- 17: Simulation du modèle L et NL de T2 avec correcteur avec perturbations .	59
Figure III- 18: simulation de la commande discontinue de commutation u_1 et u_2 de correcteur.....	59
Figure III- 19: Les surfaces de glissement S1 et S2.....	60
Figure III- 20: simulation de la commande u_1 et u_2 de correcteur.....	60
Figure III- 21: Les surfaces de glissement S1 et S2.....	61
Figure III- 22: simulation de la commande u_1 et u_2 de correcteur.....	61
Figure III- 23 : Simulation du modèle L et NL de H2 avec correcteur avec perturbations	62
Figure III- 24: Simulation du modèle L et NL de T2 avec correcteur avec perturbations .	62
Figure III- 25: simulation de la commande continue Smooth u_1 et u_2 de correcteur.....	63
Figure III- 26 : Simulation du modèle L et NL de H2 avec correcteur avec perturbations	63
Figure III- 27: Simulation du modèle L et NL de T2 avec correcteur avec perturbations..	64
Figure III- 28: Simulation de la commande continue intégrale u_1 et u_2 de correcteur.....	64
Figure III- 29: Simulation du modèle L et NL de H2 avec correcteur avec perturbations avant saturation.....	65
Figure III- 30: Simulation du modèle L et NL de T2 avec correcteur avec perturbations avant saturation.....	65
Figure III- 31 : Simulation de la commande u_1 et u_2 avant saturation.....	66
Figure III- 32: Simulation du modèle L et NL de H2 avec correcteur avec perturbations après saturation.....	66
Figure III- 33: Simulation du modèle L et NL de T2 avec correcteur avec perturbations après saturation.....	67
Figure III- 34: Simulation de la commande u_1 et u_2 après saturation.....	67
Figure IV-1: Schéma fonctionnel d'un observateur non linéaire.....	73
Figure IV-2 : Schéma fonctionnel d'un observateur linéaire.....	74
Figure IV-3: Schéma structural de l'observateur de Luenberger.....	75
Figure IV-4: Bloc de simulation d'un observateur linéaire et d'un modèle linéaire en boucle ouvert.....	77
Figure IV-5: Simulation de δx_1 et son estimé $\delta \hat{x}_1$	78
Figure IV-6: Simulation de δx_2 et son estimé $\delta \hat{x}_2$	78
Figure IV-7: Simulation de δx_3 et son estimé $\delta \hat{x}_3$	79
Figure IV-8: Simulation de δx_4 et son estimé $\delta \hat{x}_4$	79
Figure V-1 : Bloc de simulation d'un observateur linéaire sur la base de $(y_L - y)$ en boucle fermée.....	82
Figure V-2: Bloc de simulation d'un observateur linéaire sur la base de $y_{NL} - y$ en boucle fermée.....	83
Figure V-3: Résultat de simulation de l'évolution du niveau H2.....	83
Figure V-4 : Résultat de simulation de l'évolution de la température T2.....	84
Figure V-5: Simulation de la commande u_1 et u_2	84
Figure V-6: Simulation de la surface S1 et S2.....	85
Figure V-7: Résultat de simulation de l'évolution du niveau H2 a la présence de la perturbation.....	85
Figure V-8: Résultat de simulation de l'évolution du température T2 a la présence de la perturbation.....	86

Liste des figures

Figure V-9: Résultat de simulation de la commande $u1$ et $u2$ a la présence de la perturbation.....	86
Figure V-10: Résultat de simulation de l'évolution du niveau $H2$ sans perturbation	87
Figure V-11: Résultat de simulation de l'évolution du température $T2$ sans perturbation	87
Figure V-12: Simulation de la commande $u1$ et $u2$	88
Figure V-13: Résultat de simulation de l'évolution du niveau $H2$ a la présence de la perturbation.....	88
Figure V-14: Résultat de simulation de l'évolution du température $T2$ a la présence de la perturbation.....	89
Figure V-15: Simulation de la commande $u1$ et $u2$	89
Figure V-16: Résultat de comparaison de $H2$ NL.....	91
Figure V-17: Résultat de comparaison de $T2$ NL.....	92
Figure V-18: Résultat de comparaison de $H2$ L.....	92
Figure V-19: Résultat de comparaison de $T2$ L	93
Figure V-20 : Schéma fonctionnelle présente l'ajout de l'action intégrale.....	94
Figure V-21: Bloc de simulation du système régulier par régime glissant a action intégrale sur la base de $e = yr - yl$ plus observateur	97
Figure V-22: Bloc de simulation du système régulier par régime glissant a action intégrale sur la base de $e = yr - ynl$ plus observateur.....	97
Figure V-23 : Résultat de simulation de l'évolution du niveau $H2$ a la présence de la perturbation.....	98
Figure V-24 : Résultat de simulation de l'évolution du température $T2$ a la présence de la perturbation.....	98
Figure V-25 : Simulation de la commande $u1$ et $u2$	99
Figure V-26: Résultat de simulation de l'évolution du niveau $H2$ a la présence de la perturbation.....	99
Figure V-27: Résultat de simulation de l'évolution du température $T2$ a la présence de la perturbation.....	100
Figure V-28: Simulation de la commande $u1$ et $u2$	100

Liste des tableaux

Tableau II-1 : Paramètres du système hydro-thermique	28
Tableau II-2 : Les erreurs en régime permanent entre SNL et SL	37
Tableau II-3 : L'effet des perturbations sur le model linéaire et non linéaire	39
Tableau III-1 : Temps de réponse du modèle non linéaire avant et après correction	68
Tableau III-2 : Effet des perturbations sur le modèle linéaire et non linéaire avant et après la correction.	68
Tableau III-3 :Effet des perturbations sur le modèle linéaire et non linéaire avant et après la correction en utilisant la forme Smouth.	69
Tableau III-4 : Effet des perturbations sur le modèle linéaire et non linéaire avant et après la correction en utilisant la forme th.....	69
Tableau V-1 : Comparaison de l'effet de perturbation sur le système entre la correction avec observateur et sans observateur	90
Tableau V-2 :comparaison de l'erreur statique du système entre la correction avec observateur et sans observateur	90
Tableau V-3 : Comparaison l'effets de perturbation sur le système L et NL pour $e = yr - ynl$ et $e = yr - yl$	101
Tableau V-4 : Comparaison l'erreur statique et temps de Réponse pour $e = yr - ynl$ et $e = yr - yl$	101
Tableau V-5 : Comparaison les résultats obtenus avant et après l'ajout de l'action intégrale pour l'effet de perturbation.	102
Tableau V-6 : Comparaison les résultats obtenus avant et après l'ajout de l'action intégrale pour l'écart statique et le temps de réponse.....	102

Abréviations

LTI : Linéaire à temps invariant.

SL : Système linéaire.

SMC : Sliding mode controler.

SNL: Système non linéaire.

Introduction générale

L'automatisation est définie comme étant : la substitution d'une ou de plusieurs machines à l'homme pour réaliser de manière automatique un programme déterminé d'opérations. De nos jours, l'automatisation fait partie intégrante de notre vie, et de façon encore plus explicite dans l'industrie de production.

A la base des processus industriels on rencontre deux parties distinctes néanmoins largement liées : l'Instrumentation et la Régulation. L'instrumentation seul représente un domaine très diversifié, elle regroupe tout ce qui est équipements de terrain et dispositifs de contrôles (exemple : une pompe, une vanne, des capteurs, ... etc.) qui permettent de garder sous contrôle le processus dans son intégralité. Cependant, la majorité de est sensible et nécessite une supervision constante, et c'est là qu'intervient la régulation, qui permet un maintien constant des exigences de production, et des consignes selon les besoins de notre système.

En ce qui suit, nous procéderons par une modélisation mathématique du système dynamique ; dans cette démarche, nous élaborons sur la base d'un outil mathématique représentatif du système dynamique, qui nous permettra de développer notre étude sur des variables choisies aux préalables. Nous entendons par un système dynamique une structure physique prise de manière isolée (exemple : un cristalliseur, un réacteur chimique, des réservoirs, ... etc.). Ses entrées sont les grandeurs qui agissent sur son comportement. Elles peuvent être contrôlées ou non. Ses sorties sont les grandeurs résultantes ou les réponses à des valeurs données aux grandeurs d'entrées.

Dans cette étude, nous nous consacrons à un système hydro-thermique décrit par un modèle mathématique non linéaire multivariable, où nous chercherons à développer une commande dans le domaine temporel, nécessaire au contrôle de la température et du niveau du réservoir du système considéré.

La commande utilisée dans le réglage du système hydro-thermique est une commande à régime glissant qui fait partie de la famille des contrôleurs à structure variable. Ce type de contrôleur comporte deux composantes : une continue appelée commande équivalente qui correspond au régime glissant idéal, et une discontinue qui est source du caractère discontinu de la commande. Ainsi, quand la condition de glissement est vérifiée, le point de fonctionnement atteint la surface de commutation ou de glissement, et le comportement dynamique du système bouclé par cette loi de commande devient celui d'un système réduit correspondant à la surface de glissement.

une commande qui est reconnue pour sa grande robustesse vis-à-vis des incertitudes paramétriques et des perturbations externes , d'autant plus qu'elle est simple à implémenter.

Cependant, même si cette méthode semble très efficace, son implémentation peut mener à la détérioration de l'actionneur dû aux effets de broutement « *Chattering* : en anglais ». Ce phénomène peut être éliminé par l'usage de commande continue qui remplace le terme discontinu de la commande à régime glissant, ce qui rend ce type de commande réalisable en l'industrie. Cette stratégie de commande fera l'objet de notre travail de ce mémoire.

Introduction générale

La conception d'un observateur linéaire en absence de variables non accessibles ou non mesurables est également abordée dans ce mémoire. L'observateur ou l'estimateur d'état est un concept très important en automatique. Ce dispositif est un développement mathématique qui permet de reconstruire les états internes d'un système, uniquement à partir des données accessibles, c'est-à-dire des entrées imposées et des sorties mesurées.

La synthèse de commande à régime glissant dans ce travail passe par l'utilisation de deux surfaces de glissements, l'une dépend des états du système et l'autre fait intervenir en plus un état supplémentaire ou augmenté qui dépend de l'intégrale de l'erreur de sortie. Ce qui permet par conséquent, de développer deux commandes à régime glissant, l'une proportionnelle et l'autre proportionnelle intégrale en état ou en erreur de poursuite.

Les chapitres développés dans ce travail de mémoire sont structurés comme suit :

Nous présentons dans le premier chapitre, des notions introductives au système hydro-thermique ainsi que la régulation de niveau et de température dans un réservoir de manière générale.

Dans le deuxième chapitre, nous décrivons le système physique hydro-thermique et sa modélisation. Le modèle mathématique non linéaire obtenu est par la suite linéarisé autour d'un point de fonctionnement.

La synthèse de deux lois de commande à régime glissant est développée dans le troisième chapitre. Ces lois de commande seront appliquées en simulation sur les modèles linéaire et non linéaire en vue d'une comparaison.

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons le principe de fonctionnement et la conception de l'observateur, afin d'estimer les états non mesurables à l'aide des mesures disponibles.

Nous reprenons dans le dernier chapitre, les deux lois de commande à régime glissant mais cette fois associées à l'observateur développé, puis nous comparons les résultats obtenus.

Nous terminons notre étude par une conclusion générale et quelques perspectives dans les travaux futurs.

Chapitre I :

Régulation et instrumentation industriel

I.1 Introduction

Le socle élémentaire qui constitue la base de chaque processus industriel se subdivise en deux parties distinctes néanmoins largement liées : l'Instrumentation et la Régulation. Rien que l'instrumentation constitue un vaste domaine, elle regroupe principalement les équipements de terrain et les dispositifs de contrôles (exemple : pompe, vanne...etc.) qui permettent de mesurer et de contrôler différents paramètres physiques (pression, débit, température...etc.). Cependant, la majorité des processus industriels sont sensibles et nécessite une supervision constante, et c'est là qu'intervient la régulation, qui permet le maintien des niveaux prédéterminés des paramètres qui régissent le fonctionnement du processus.

Ce chapitre est divisé en deux parties : une partie qui parle de la régulation et l'autre de l'instrumentation, donc nous allons discuter des notions fondamentales et générales de l'automatique comme les notions de système et de commande ainsi que quelques généralités sur l'instrumentation industrielle avec quelques définitions des instruments utilisés dans notre système.

I.2 Généralité

Un procédé est une opération ou une suite d'opérations accomplies dans un but déterminé, il peut être défini comme une série d'opérations apportant des modifications physiques ou chimiques à un produit. La fabrication du papier, du ciment, le traitement de pétrole brut, liquéfaction du gaz naturel, sont des exemples des procédés industriels.

La régulation automatique est la technique des méthodes et les outils nécessaires à la prise de contrôle d'une ou plusieurs grandeurs physiques (vitesse, température, pression, courant, etc.) d'un procédé en vue d'en imposer le comportement bien déterminé. Les grandeurs physiques, ou signaux, doivent être mesurés afin de vérifier leurs états pour ensuite déterminer à l'aide d'un traitement approprié l'action à entreprendre sur le système pour qu'ils se comportent comme souhaité. Avec le qualificatif automatique, on admet qu'aucune intervention manuelle n'est nécessaire le procédé doit s'exécuter de lui-même, sans qu'un opérateur humain intervienne dans le processus. Un tel projet implique nécessairement la participation de moyens mécaniques et électroniques.

On souhaite qu'une certaine grandeur physique (vitesse, courant, température) ait une valeur moyenne donnée en régime permanent, malgré l'influence de l'environnement (perturbations). Les méthodes de la régulation automatique ont donc la possibilité de modifier le comportement statique et dynamique d'une ou plusieurs grandeurs physiques d'un système, afin qu'elles évoluent conformément aux exigences de l'application [1].

I.3 Notion de base sur les systèmes

I.3.1 Notion de système

En automatique, la notion de système est incontournable. La définition que donne l'automaticien se rapproche de celle classique empruntée à la physique. Généralement, le

système est un dispositif qui fonctionne en interaction avec son environnement générant un ensemble de phénomènes. Certaines grandeurs physiques de l'environnement agissent sur le système. Elles sont appelées entrées, d'autres émanent du système et agissent sur l'extérieur. Elles sont appelées sorties. Les entrées d'un système peuvent a priori être modifiées. Il peut généralement exister des entrées qui échappent au contrôle et qui ne peuvent être modifiées, elles sont appelées perturbations.

Dans la pratique, un système peut correspondre à un dispositif mécanique, électrique, chimique..., et il est facile de le différencier de l'extérieur de même que de choisir quelles sont les entrées ou les sorties.

I.3.1.1 Linéarité et non linéarité

I.3.1.1.1 Système linéaire

Un système est dit linéaire si la réponse de ce système à une combinaison linéaire des signaux d'entrée est égale à la combinaison linéaire des réponses [2].

Cela est expliqué par le principe de superposition [2] :

Soit deux signaux d'entrées x_1 et x_2 engendrant deux signaux de sorties y_1 et y_2 , la réponse à la somme des entrées est la somme des réponses individuelles. Si on applique une entrée :

$$x = \alpha \cdot x_1 + \beta \cdot x_2 \quad (\text{I.1})$$

On obtiendra en sortie :

$$y = \alpha \cdot y_1 + \beta \cdot y_2 \quad (\text{I.2})$$

Où α et β sont deux signaux quelconques.

I.3.1.1.2 Système non linéaire

Ce sont tous les systèmes qui ne sont pas régis par des équations différentielles linéaires, à coefficients constants et d'ordre fini et où le principe de superposition ne peut être appliqué.

Cette définition explique la complexité des systèmes non linéaires et des méthodes qui s'y appliquent. Il n'y a pas une théorie générale pour ces systèmes, mais plusieurs méthodes adaptées à certaines classes de systèmes non linéaires [2].

I.3.2 Théorie de la commande

I.3.2.1 Terme commande

Le terme commande peut être défini de la manière suivante : une action délibérée sur le système (par les signaux d'entrée) qui fait que l'état du système s'approche dans un sens (les sorties) d'un état désiré (des trajectoires désirées). Alors, commander un système veut dire plutôt commander les variables de sortie [3].

I.3.2.2 Commande automatique

On parle de commande automatique dans les cas où, les signaux de commande sont générés par un autre système, ne nécessitant pas l'intervention immédiate de l'homme.

L'interconnexion du système commandé avec le système qui génère les signaux de commande, appelé régulateur, contrôleur, compensateur, correcteur, et qui dans presque tous les cas, implémente aussi la fonction de comparateur forme un système qu'on appelle système de commande.

De structures différentes des systèmes de commande, respectivement de principes différents qui ont à la base de l'élaboration des signaux de commande existent. Un système, dont le régulateur génère les signaux de commande en se basant sur la déviation du comportement actuel du système par rapport au comportement désiré donc, sur l'écart entre les trajectoires désirées des sorties et celles qui se réalisent effectivement, est appelé un système asservi.

L'utilisation d'un retour par la sortie représente le principe sur lequel est basé le fonctionnement de presque tous les systèmes de commande. D'autres chaînes supplémentaires peuvent être introduites dans la structure du système de commande [3].

I.3.2.3 Commande en boucle ouverte

L'observation n'est pas celle de la grandeur à maîtriser mais celle d'une grandeur incidente. La réflexion est l'étape où la commande prend en compte une relation préétablie entre la grandeur observée et la grandeur réglant. L'action modifie alors la grandeur à maîtriser. Cette régulation forme une chaîne ouverte car l'action ne modifie pas la grandeur mesurée [4].

I.3.2.4 Commande en boucle fermée

L'observation se porte sur la grandeur à maîtriser. L'étape de réflexion détermine l'écart entre la consigne et la grandeur à maîtriser. En fonction de cet écart et des règles d'évolution fixées, on en déduit l'action à entreprendre. L'action modifie la grandeur réglante et finalement la grandeur à maîtriser [4].

I.3.3 Régulation

La majorité des processus industriels nécessitent de contrôler un certain nombre de paramètres : température, pression, débit, niveau, pH, concentration d'O₂, etc....

Il appartient à la chaîne de régulation (et plus généralement à la chaîne d'asservissement) de maintenir à des niveaux prédéterminés les paramètres qui régissent le fonctionnement du processus.

Toute chaîne de régulation (ou d'asservissement) comprend quatre maillons indispensables : le capteur et son transmetteur, l'actionneur (vanne de régulation, variateur de vitesse, etc...), le régulateur et le procédé industriel (échangeur thermique, colonne de distillation, etc..).

Il faut donc commencer par mesurer les principales grandeurs servant à contrôler le procédé. Le régulateur récupère ces mesures et les compare aux valeurs souhaitées par l'opérateur, plus communément appelées « valeurs de consigne ».

En cas de non concordance des valeurs de mesure et des valeurs de consigne, le régulateur envoie un signal de commande à l'actionneur, afin que celui-ci agisse sur le procédé. Les paramètres qui régissent le procédé sont ainsi stabilisés en permanence à des niveaux souhaités.

Le choix des éléments de la chaîne de régulation est dicté par les caractéristiques du processus industriel à contrôler, ce qui nécessite de bien connaître le processus et son comportement.

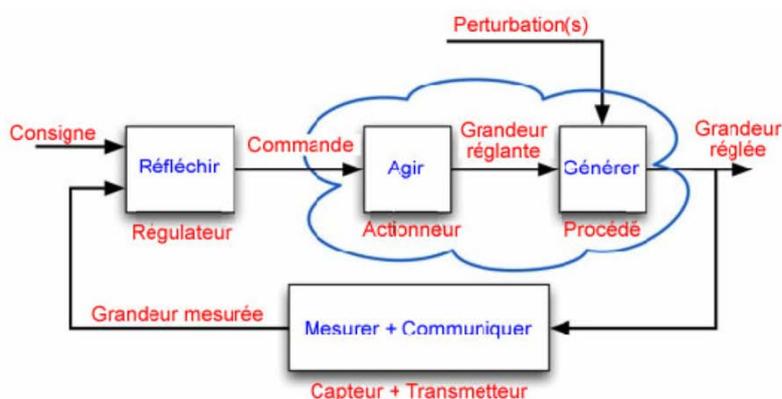


Figure I-1: Schéma de principe de la chaîne de régulation

Dans la chaîne de régulation, les 3 organes que nous avons cités précédemment constituent le système réglant, tandis que le procédé constitue le système réglé.

Après action du régulateur, deux comportements peuvent être obtenus en automatique :

I.3.3.1 Comportement en régulation

La consigne est maintenue constante et il se produit sur le procédé une modification (ou une variation) d'une des entrées perturbatrices.

L'aspect régulation est considéré comme le plus important dans le milieu industriel, car les valeurs de consigne sont très souvent fixes. Néanmoins, pour tester les performances et la qualité d'une boucle de régulation, l'instrumentiste s'intéresse à l'aspect asservissement.

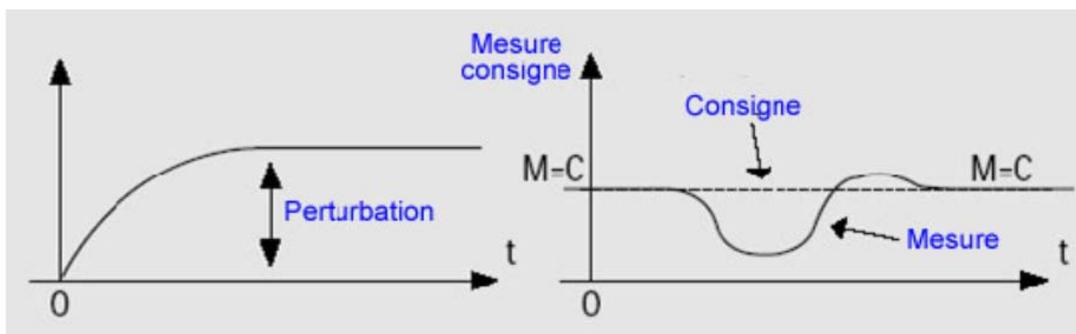


Figure I-2: Réponse indicielle en régulation d'un procédé

I.3.3.2 Comportement en asservissement

L'opérateur effectue un changement de la valeur de la consigne, ce qui correspond à une modification du point de fonctionnement du processus. Si le comportement en asservissement est correct, on démontre que la « boucle de régulation » réagit bien, même lorsqu'une perturbation se produit[5].

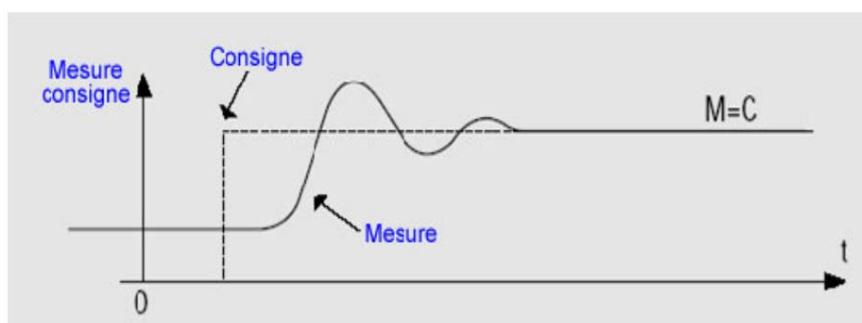


Figure I-3: Réponse indicielle en asservissement d'un procédé

I.3.4 Systèmes invariants

Un système dynamique est dit invariant ou stationnaire si sa dynamique ne dépend pas explicitement du temps. L'adjectif invariant est en fait un raccourci d'écriture pour un terme plus exact qui devrait être invariant par rapport au temps (en anglais Time Invariant) [6].

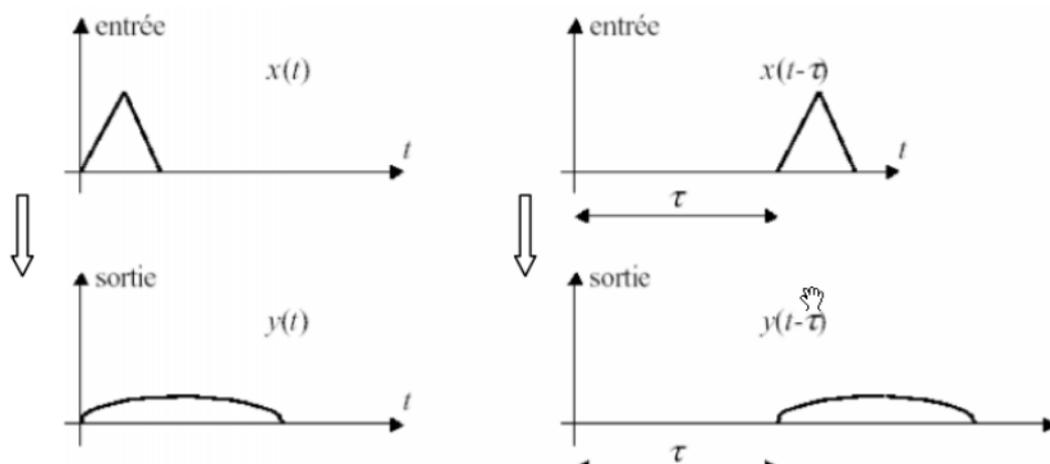


Figure I-4: Système invariant

I.3.5 Systèmes multivariable

Toutes les méthodes étudiées jusqu'à présent de l'asservissement linéaire restent valables et efficaces jusqu'à ce que ces systèmes atteignent une complexité telle que l'on ne puisse plus se satisfaire de l'unique relation entrée – sortie (c'est-à-dire les systèmes monovariables SISO : Single Input Single Output) pour les commander correctement. De même, ces modèles deviennent difficiles à mettre en œuvre lorsque les systèmes étudiés possèdent plusieurs entrées et plusieurs sorties cas d'un système multivariable (MIMO : Multi Input Multi Output). Les théories de commande avancées sont basées complètement sur les modélisations modernes sous la forme des variables d'état. La représentation d'état des systèmes est un outil puissant permettant de modéliser le fonctionnement de systèmes linéaires, en temps continu ou en temps discret et qui possède en outre, l'avantage de conserver la représentation temporelle des phénomènes [7].

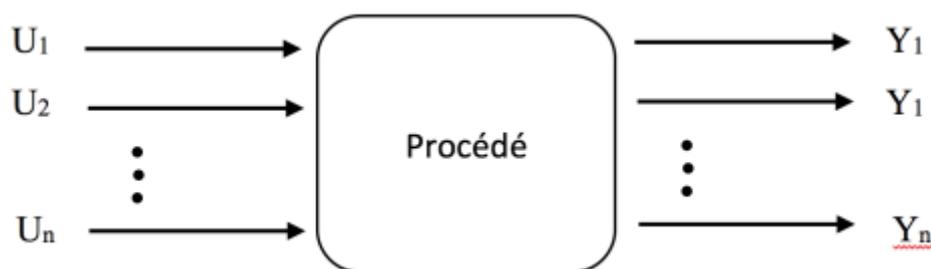


Figure I-5: Représentation des systèmes multivariable

I.3.6 Observabilité et Commandabilité

Les concepts de commandabilité et d'observabilité sont des concepts fondamentaux pour l'étude des systèmes. Ils décrivent respectivement comment les états d'un système sont influencés par les entrées et quelle information les sorties mesurées donnent sur les états du système [7].

I.3.6.1 Commandabilité

Considérons un système LTI représenté par un vecteur d'état x , et une équation d'évolution de l'état :

$$\dot{x}(t) = A.x(t) + B.u(t) \quad (I.3)$$

Où $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times l}$, est commandable si et seulement si la matrice de commandabilité, (C_0) est de rang n , (avec (C_0) est la matrice de commandabilité)

$$Rang(C_0) = rang[B \ A \ B \ \dots \ A^{n-1} \cdot B] = n \quad (I.4)$$

Un système est commandable si $Rang(C_0) = n$. On définit plus généralement le degré de commandabilité d'un système comme le rang de la matrice de commandabilité. Si $Rang(C_0) < n$, alors le système est partiellement commandable.

Remarque

La commandabilité a pour objet de caractériser la capacité d'un système à voir ses caractéristiques dynamiques modifiées par les entrées. Il est souvent intéressant de s'assurer de la commandabilité d'un système avant de chercher à mettre en œuvre la commande proprement dite. En d'autres termes, on demande de disposer d'une condition nécessaire et suffisante de commandabilité [7].

I.3.6.2 Observabilité

Considérons un système LTI représenté par un vecteur d'état x , et une équation d'évolution de l'état :

$$\dot{x}(t) = A.x(t) + B.u(t)$$

Et les sorties :

$$y(t) = C.x(t) + D.u(t) \quad (I.5)$$

Où $A \in R^{n \times n}$, $C \in R^{m \times n}$ est observable si et seulement si la matrice la matrice la matrice d'observabilité O_b est de rang n :

$$Rang(O_b) = rang \begin{bmatrix} C \\ C.A \\ C.A^2 \\ \dots \\ C.A^{n-1} \end{bmatrix} = n \quad (I.6)$$

Remarque

La notion d'observabilité est importante pour les systèmes où le vecteur d'état complet n'est pas accessible à la mesure doit être reconstruit, estimé ou filtré à partir des données fournies par la sortie [7].

I.4 Instrumentation

L'instrumentation est un domaine comprenant les méthodes d'implantation, de réglages et d'exploitation de tous les appareils de mesure, de calcul et d'action nécessaires à la maîtrise du processus industriel, y compris les aspects de protection et de sécurité.

L'instrumentation liée à l'observation est assurée par les capteurs et transmetteurs qui fournissent les mesures continues et les détecteurs délivrant une information binaire. L'instrumentation permettant l'action concerne les organes de réglage tels que les vannes régulatrices, les ventilateurs, les pompes, les résistances de puissance électrique, et les pré-actionneurs comme les convertisseurs de signaux, les positionneurs, et les variateurs de vitesse.

Toutes les cartes d'entrées et de sorties des régulateurs et des automates programmables industriels (API) font partie de l'instrumentation.

I.4.1 Signale de mesure

I.4.1.1 Signal analogique

Un signal est dit analogique si l'amplitude de la grandeur physique le représentant peut prendre une infinité de valeurs dans un intervalle donné.

Signal continu : C'est un signal qui varie 'lentement' dans le temps : température, débit, niveau, température.

Forme : C'est la forme de ce signal qui est importante : pression cardiaque, chromatographie, impact.

Fréquentiel : C'est le spectre fréquentiel qui transporte l'information désirée : analyse vocale, sonar, spectrographie.

I.4.1.2 Signal numérique

Un signal est dit numérique si l'amplitude de la grandeur physique le représentant ne peut prendre qu'un nombre fini de valeurs.

En général ce nombre fini de valeurs est une puissance de 2.

Tout ou rien (TOR) : Il informe sur un l'état bivalent d'un système.

Exemple : une vanne ouverte ou fermée.

Train d'impulsion : Chaque impulsion est l'image d'un changement d'état.

Exemple : un codeur incrémental donne un nombre fini et connu d'impulsion par tour.

Echantillonnage : C'est l'image numérique d'un signal analogique.

Exemple : température, débit, niveau [5].

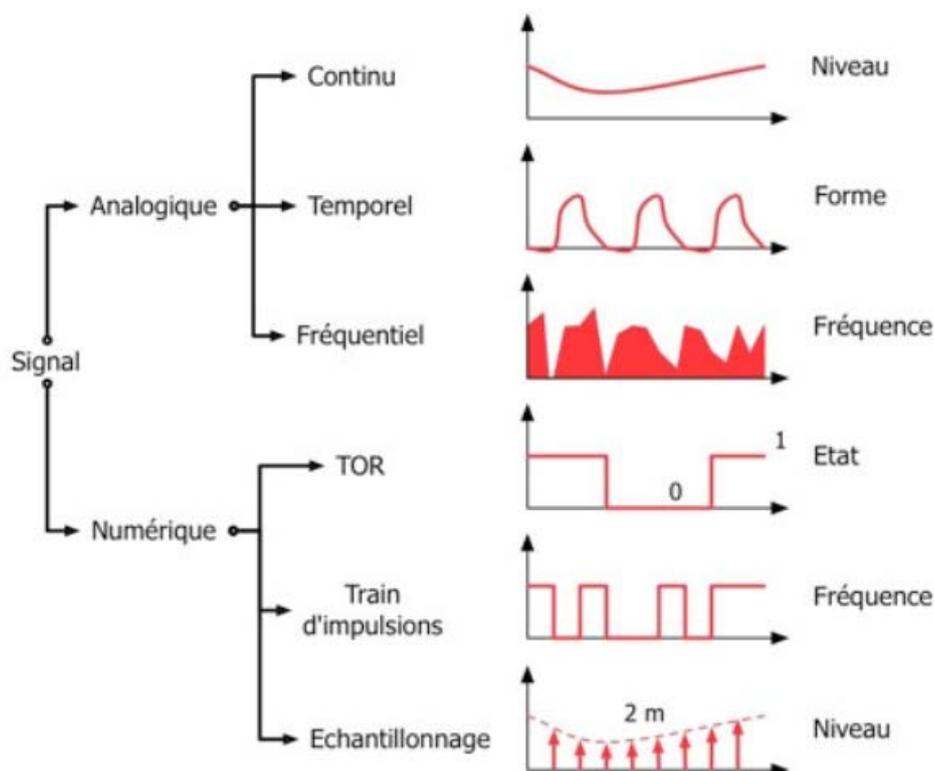


Figure I-6: Représentation graphique des signaux

I.4.2 Technologie générale d'un capteur/transmetteur

Le capteur transmetteur est constitué de trois éléments principaux :

Le corps d'épreuve : élément mécanique qui réagit par déformation ou déplacement.

L'élément de transduction : élément sensible lié au corps d'épreuve. Il traduit les réactions du corps d'épreuve en une grandeur électrique ou pneumatique.

Le Convertisseur : Son rôle est de transformer le déplacement mécanique (ou la déformation) en une grandeur pneumatique, électrique ou numérique standardisée pouvant être transmise à un récepteur (exemple : DCS ou régulateur local pneumatique).

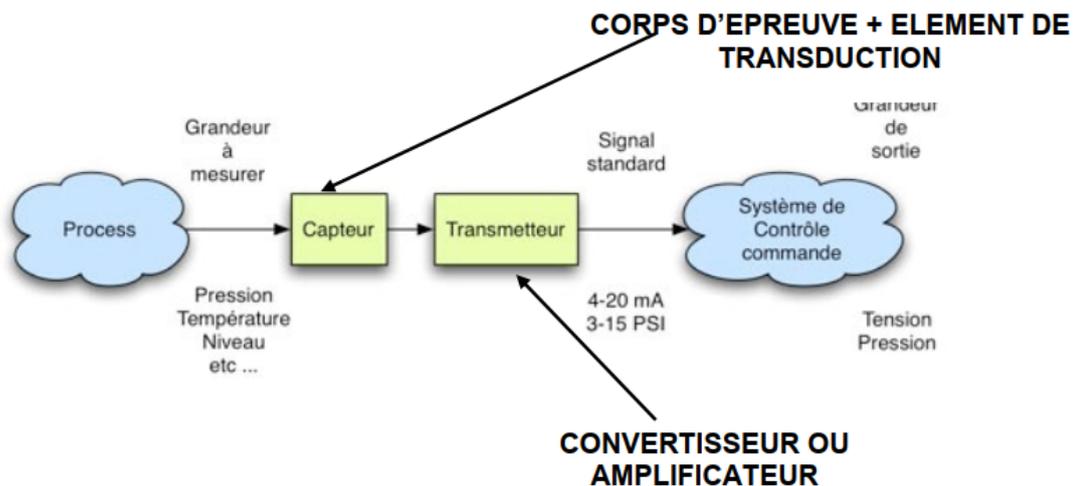


Figure I-7: Schématisation d'un capteur transmetteur

Comme tout instrument de mesure un capteur transmetteur doit présenter certaines qualités :

La précision : Elle définit l'écart entre la valeur réelle et la mesure.

La fidélité : Plusieurs mesures d'une même grandeur doivent donner la même Indication.

La sensibilité : Plus la variation de l'indication est importante pour une variation faible de la grandeur mesurée, meilleure est la sensibilité.

L'échelle de mesure : Les indications minimales et maximales du capteur doivent correspondre aux valeurs minimales et maximales de la grandeur à mesurer [8].

I.4.3 Instruments de mesure et de contrôle du système hydrothermique

Dans cette partie on va lister tous les instruments nécessaires pour effectuer notre étude, on commence par :

I.4.3.1 Instruments de mesures

Ce sont les capteurs qui sont les éléments d'un appareil de mesure servant à la prise d'informations relatives à la grandeur à mesurer.

I.4.3.1.1 Mesure et capteur de niveau

I.4.3.1.1.1 Mesure de niveau

Un niveau est une hauteur de liquide mesurée par rapport au fond du réservoir, soit H . La mesure du niveau est donc une mesure de longueur. Mais assez souvent on s'intéresse d'avantage aux variations de cette hauteur H , que nous noterons DH , plutôt qu'à la hauteur H proprement dite. Il s'agit donc d'une mesure de déplacement. Il peut être plus facile de mesurer la "hauteur de creux" H_c plutôt que la "hauteur de plein" H . On déduit alors H de la hauteur H_c à condition de connaître la hauteur du réservoir H_r .

donc

$$H = H_r - H_c \quad (I. 7)$$



Figure I-8: Mesure d'un niveau

I.4.3.1.1.2 Types de capteurs de niveau

- Capteurs de niveau à palettes :

Utilisé pour mesurer le niveau de solide pulvérulents ou liquides de forte viscosité.

Principe de fonctionnement : couple d'une palette rotative.

- Capteurs de niveau à lames vibrantes :

Pour tout type de solide ou de liquide.

Principe de fonctionnement : variation de la fréquence d'oscillation d'un diapason.

- Capteurs de niveau capacitifs :

Principalement pour les produits non conducteurs (pétrole, huile...etc.)

Principe de fonctionnement : variation de la capacité électrique (par l'intermédiaire de la constante diélectrique).

- Capteurs de niveau à ultrason :

Pour tous produits solides, liquides ou pâteux à toutes températures et jusqu'à des pressions de 40 bars.

Principe de fonctionnement : émission et réception d'une onde ultrasonore qui se réfléchit sur la surface du produit. [7]

- Capteur de pression différentielle

On place un capteur de pression différentielle à la base du réservoir figure I-9. La pression mesurée par le capteur est égale à [8] :

$$P = P_0 + \rho \cdot g \cdot h \quad (\text{I. 8})$$

Avec :

P_0 : Pression au sommet du réservoir

$\rho \cdot g \cdot h$: pression hydrostatique

h : hauteur du liquide

ρ : densité du liquide

g : accélération de la pesanteur

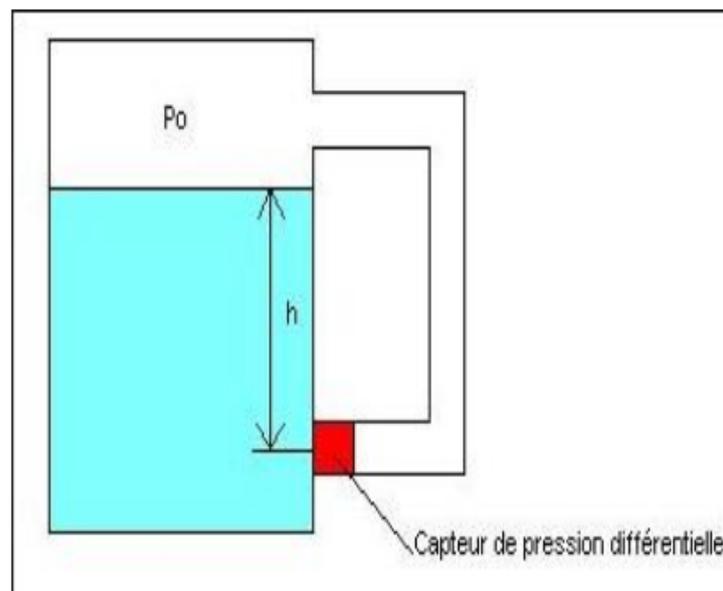


Figure I-9: Mesure de niveau par un capteur de pression différentielle

- Transmetteur de niveau

Le rôle de ce dispositif est de convertir le signal de sortie du capteur en un signal de mesure standard il fait le lien entre le capteur et le système de control (régulateur) le couple capteur et transmetteur réalise la relation linéaire entre la grandeur mesurée et son signal de sortie un transmetteur de niveau est présenté dans la figure I-10, [6].



Figure I-10: Transmetteur de niveau à plongeur.

- Convertisseur pneumatique-électrique

Un convertisseur est destiné à transformer un signal électrique en un signal proportionnel pneumatique standard 0.2 ... 1.0 bar.

Principe de conversion avec système BUSE/PALETTE :

Un signal électrique attaque une bobine, crée un champ magnétique, une palette reliée à la bobine fait varier le signal de sortie pneumatique figure I-6, [7].



Figure I-11: Convertisseur I/P

I.4.3.1.2 Mesure et capteur de température

I.4.3.1.2.1 Mesure de température

La température est une mesure très importante dans l'industrie et dans de nombreux d'autre domaine car elle conditionne les réactions chimiques et biologiques et elle affecte la plupart des propriétés physico-chimiques comme la masse volumique, la viscosité, la résistivité, la pression...etc [9].

Méthodes de mesure

Du nombre très important de propriétés de la matière et de phénomènes physiques sensibles à la température résulte aujourd'hui une grande diversité de méthodes de mesure, et de ce fait de capteurs de température :

- Méthodes optiques (rayonnement spectral).
- Méthodes mécaniques (dilatation d'un solide, d'un liquide, ou d'un gaz).
- Méthodes électriques (résistivité, f.é.m. à la jonction de matériaux de natures différentes, fréquence de résonance d'un quartz).

Les méthodes optiques ou mécaniques, qui s'appuient sur l'observation extérieure d'une propriété du milieu dont on mesure la température, ont un domaine d'emploi limité.

Les méthodes électriques par contre, sont d'une grande généralité [10].

I.4.3.1.2.2 Types de capteurs de température Thermomètres à dilatation

Dans ce type, c'est la dilatation des corps qui sera le phénomène image de la grandeur thermométrique. On constate en effet que le volume d'un corps augmente en général, lorsque

sa température s'élève (sans qu'il y ait de changement d'état physique). Il existe 4 types de thermomètres de dilatation[10] :

- Thermomètres à dilatation de liquide
- Thermomètres à dilatation de gaz
- Thermomètres à dilatation de solide
- Thermomètres à dilatation de de vapeur

Les thermomètres électriques

Thermocouple

Un thermocouple est un circuit électrique fermé, constitué par deux métaux différents A et B, dont les jonctions sont soumises à un gradient de température. La conversion d'énergie thermique crée un déplacement d'électrons et génère une force électromotrice (f.é.m.) de Seebeck, qui dépend de la nature des deux métaux et de la différence des températures au niveau des jonctions[10].

Principe de fonctionnement

Un thermocouple est un montage exploitant l'effet Seebeck pour la détermination de la température. Celui-ci est constitué de deux fils de métaux différents, soudés à l'une de leurs extrémités. Cette jonction porte le nom usuel de « soudure chaude » et sera installé dans le milieu dont la température est à mesurer. Les deux autres extrémités sont à relier aux bornes d'un voltmètre. Les deux jonctions formées aux bornes du voltmètre portent le nom usuel de « soudures de référence » ou « soudures froides ».

La tension mesurée par le voltmètre est fonction de la température de la « soudure chaude » et de la température des « soudures froides » et peut être calculée à partir de l'expression suivante :

$$\Delta v = Se. \Delta T \quad (\text{I. 9})$$

ΔV : Variation de la tension.

Se : Coefficient de Seebeck.

ΔT : Variation de température

Pour chaque thermocouple, il existe des tables de référence reliant la f.é.m. à la température de la jonction de mesure. La plage de température d'un thermocouple est 40°C à + 1700°C, selon le type de thermocouple.

On traite notre système en mesurant la température à l'aide d'un thermocouple de type 'E' de nature Nickel Cuivre-Nickel avec un usage continu de température de 0 °C à 800 °C [10].

I.4.3.2 Instruments de contrôle

Ce sont les outils qui reçoivent l'ordre de régulateur et le traduit en une réalisation en pourcentage d'action pour agir sur la variable replante et influencer le système dans le but de ramener la mesure a la consigne voulue ou désiré.

I.4.3.2.1 Vanne de régulation

Une vanne est un dispositif pour arrêter ou modifier le débit d'un fluide liquide, gazeux, pulvérulent ou multiphasique, en milieu libre (canal) ou en milieu fermé (canalisation).

La vanne de réglage devra être conçue et fabriquée de manière à fonctionner correctement, et avec un minimum d'entretien, malgré un certain nombre de problèmes posés par le fluide et par son environnement [11].

Éléments constituant la vanne de réglage

La vanne représentée dans la figure I-12 est constituée de deux éléments principaux :

- Le servomoteur : c'est l'élément qui assure la conversion du signal de commande en mouvement de la vanne.
- Le corps de vanne : c'est l'élément qui assure le réglage de débit.

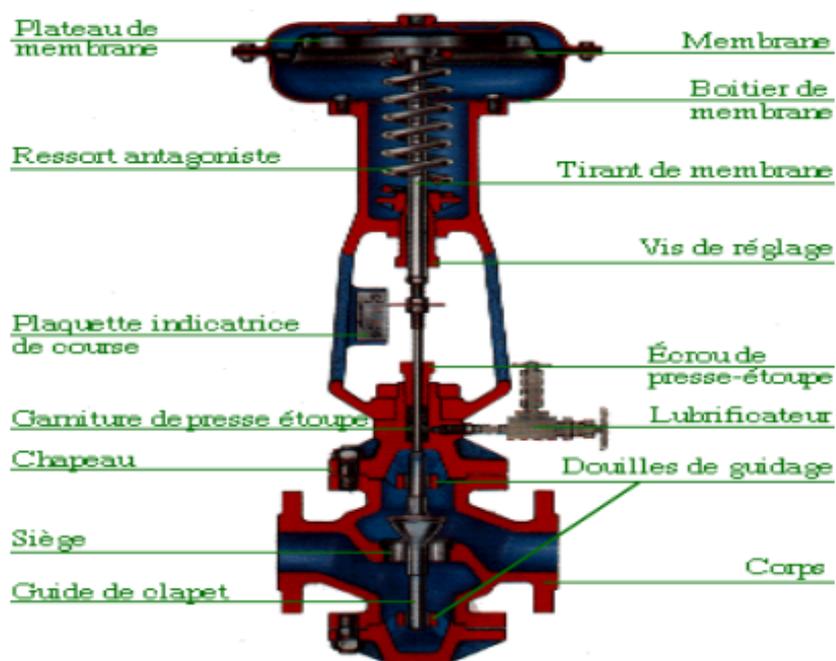


Figure I-12: Vanne de réglage de débit

C_v du corps de vanne

Le coefficient de débit C_v , utilisé pour la première fois par Masoneilan en 1944, est devenu rapidement l'étalon universel de mesure du débit de fluide qui s'écoule dans une vanne. Ce coefficient est en effet si pratique qu'il est maintenant presque toujours employé

dans les calculs qui conduisent au dimensionnement des vannes ou à la détermination des débits qui les traversent.

Par définition, le coefficient C_v est le nombre de gallons U.S. d'eau à 15°C, traversant en une minute une restriction lorsque la chute de pression au passage de cette restriction est de 1 PSI. On a :

$$Q_v = C_v \cdot \sqrt{d \cdot \Delta P} \quad (\text{I. 10})$$

avec :

ΔP : pression en PSI (1PSI = 0,069 bar).

d : densité (par rapport à l'eau).

Q_v : en gallon/min (3,785 l/min).

Le signal pneumatique normalisé varie de (3 à 15) PSI ou bien (0.2 à 1) bar.

Le C_v est un repère de grandeur au moyen duquel le technicien peut déterminer rapidement et avec précision la dimension d'une restriction connaissant les conditions de débit, de pression éventuellement d'autres paramètres annexes et ceci pour n'importe quel fluide.

Le C_v est proportionnel à la section de passage entre le siège et le clapet.

$C_v = 0$, Lorsque la vanne est fermée ;

$C_v = C_v \text{ max}$, Lorsque la vanne est complètement ouverte.

Le C_v dépend aussi du profil interne de la vanne et du type d'écoulement dans la vanne [11].

Caractéristiques de la vanne de régulation :

C'est la loi représentant le débit en fonction de la course du clapet (ou obturateur), à ΔP constante.

Il existe trois caractéristiques fondamentales :

- La caractéristique linéaire
- La caractéristique égal pourcentage (égal %),
- La caractéristique à ouverture rapide[11].

I.4.3.2.2 Pompes centrifuges

Les pompes sont des appareils permettant un transfert d'énergie entre le fluide et un dispositif mécanique convenable. Elles sont capables d'aspirer et de refouler un fluide. Devant la grande diversité de situation, il existe divers groupes de machines, dans notre cas on s'intéresse à une pompe centrifuge qui utilise la force centrifuge.

Une pompe centrifuge est une machine tournante destinée à communiquer au liquide pompe une énergie suffisante pour provoquer son déplacement dans un réseau hydraulique comportant en général une hauteur géométrique d'élévation de niveau, une augmentation de pression et toujours des pertes de charges [12].

Principe de fonctionnement :

On peut décomposer le fonctionnement en deux étapes :

- L'aspiration :

Le liquide est aspiré au centre du rotor par une ouverture appelée distributeur dont le rôle est de conduire le fluide depuis la conduite d'aspiration jusqu'à la section d'entrée du rotor.

La pompe étant amorcée, c'est à dire pleine de liquide, la vitesse du fluide qui entre dans la roue augmente et par conséquent la pression dans l'ouïe diminue et engendre ainsi une aspiration et maintient l'amorçage.

- L'accélération

Le rotor transforme l'énergie mécanique appliquée à l'arbre de la machine en énergie cinétique. A la sortie du rotor, le fluide se trouve projeté dans la volute dont le but est de collecter le fluide et de le ramener dans la section de sortie. La section offerte au liquide étant de plus en plus grande, son énergie cinétique se transforme en énergie de pression [12].

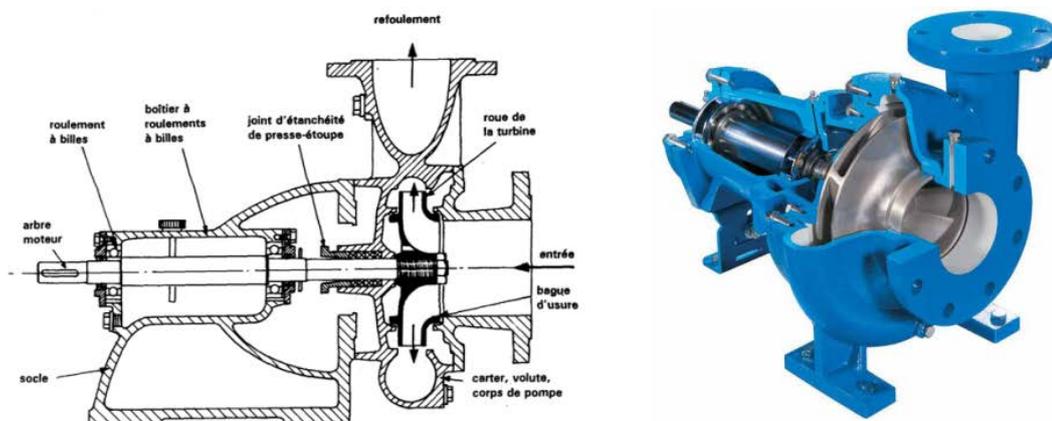


Figure I-13: Une pompe centrifuge

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu quelques notions introductives de système et de commande on a également vu des notions liées à la régulation et la chaîne de régulation ainsi ses constituants.

On a parlé aussi des instruments de mesure et de régulation d'un système hydro-thermique parce que notre système est destiné à la régulation de niveau et de température d'un système hydro-thermique.

Dans le prochain chapitre on va présenter notre système HYDRO-THERMIQUE Système et modéliser ce dernier.

L'objectif de ce chapitre est d'exposer les instruments utilisés dans le contrôle automatique des procédés, en se concentrant sur les instruments liés au processus considéré qui est dans notre cas le système hydro-thermique, ainsi que de donner des définitions sur les systèmes linéaires, non linéaire et les systèmes multivariables.

A travers ce chapitre nous avons tenté de montrer l'intérêt de la régulation dans une chaîne de commande industrielle.

Chapitre II :

Description et modélisation du système hydro-thermique

II.1 Introduction

La modélisation est une démarche qui permet, à partir de faits expérimentaux, de construire un outil mathématique reliant les sorties d'un système à ses entrées. On entend par système une structure physique prise de manière isolée ; un cristalliseur, un réacteur chimique, des réservoirs... représentent autant d'exemples. Ses entrées sont les paramètres qui agissent sur son comportement. Elles peuvent être contrôlées ou non. Ses sorties sont les paramètres résultants des valeurs données aux entrées.

Dans ce chapitre nous allons montrer la démarche utilisée pour modéliser le système hydro-thermique trois lors de cette étude.

Nous présentons également dans ce chapitre une description détaillée des équations, conduisant au développement du modèle de simulation du processus.

II.2 Description du système hydro-thermique

II.2.1 Présentation du banc d'essai

Dans ce projet on s'intéresse à étudier un système qu'on peut placer dans la catégorie des circuits de transport de liquide, il s'agit de faire passer le fluide d'un réservoir à un autre tout en gardant la température et le niveau constants à tout instant selon les variations des débits d'entrées.

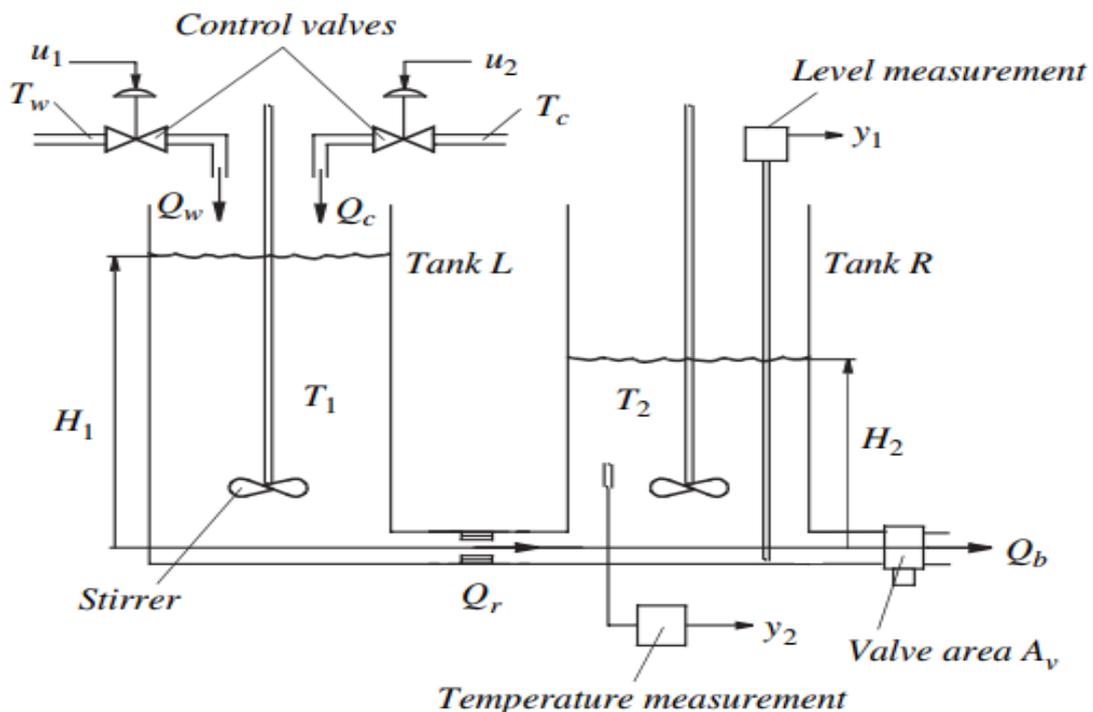


Figure II-1: Processus Hydro-thermique

Les principales composantes du système hydro-thermique présentées par la figure II-1 sont présentées par deux réservoirs, deux contrôleurs de débit, un ensemble d'instruments de mesure de contrôle, dans ce qui suit, nous présentons les éléments principaux.

Les Deux réservoirs notés L et R sont connectés comme indiqué et dans le réservoir gauche peut être pompé de l'eau chaude et froide à travers des vannes de régulation à deux entrées les signaux U_1 et U_2 . Les températures et les débits sont de T_f , T_c , Q_c et Q_f . Les niveaux d'eau dans les deux réservoirs sont respectivement H_1 et H_2 et les réservoirs ont la même surface en coupe S . Le débit entre les réservoirs est Q_c et le débit sortant de la vanne de sortie du réservoir R est Q_b . Cette dernière valve a la variable zone d'ouverture A_n . L'eau est rapidement agitée dans les deux bassins et donc la température est supposée constante sur tout le volume de chacun des réservoirs. Les principales composantes du système hydro-thermique présentée par la figure II-1 sont présentées par deux réservoirs, deux contrôleurs de débit, un ensemble d'instruments de mesure de contrôle.

Dans ce qui suit, nous présentons les éléments principaux. Les deux réservoirs sont connectés comme indiqué dans la figure II-1 et dans le réservoir gauche peut être pompée de l'eau chaude et froide par des vannes de contrôle avec les deux signaux d'entrées u_1 et u_2 . Les températures et les débits volumiques sont T_f et T_c , q_c et q_f . Les niveaux d'eau dans les deux réservoirs sont H_1 et H_2 respectivement et les réservoirs ont le même air en coupe transversale S [13].

Le débit d'écoulement entre les réservoirs est q_1 et le débit de la vanne de sortie du deuxième réservoir est q_2 . Cette dernière vanne présente une surface d'ouverture variable A_p . Donc, deux quantités peuvent être mesurées sur le réservoir : le niveau et la température.

II.2.2 Principe de fonctionnement

Les réservoirs ont une configuration géométrique cylindrique, le réservoir principal est alimenté par deux arrivées d'eaux contrôlées par deux pompes : une pour contrôler le débit d'eau chaude et l'autre pour contrôler le débit d'eau froide, les débits livrés par ces deux entrées sont contrôlés par deux vannes indépendantes. C'est en agissant sur ces deux éléments du système que l'on va réaliser la régulation du niveau et de la température, le deuxième réservoir dispose d'une vanne permettant de régler manuellement le débit de sortie. Un thermocouple est fixé dans le deuxième réservoir sur la vanne de sortie, il donne la température du mélange contenu à l'intérieur du réservoir, donc, la température que l'on désire réguler.

Le système est également équipé d'un capteur de pression (pour mesurer le niveau) qui est fixé dans la partie basse du deuxième réservoir, il donne une information sur le niveau d'eau que l'on veut réguler. Figure II-1 représente l'ensemble réservoirs-vannes-capteurs.

La cuve ayant une capacité relativement importante, la température de l'eau varie très lentement et n'est pas homogène à l'intérieur du réservoir. Les débits d'eau froide et d'eau chaude arrivant en surface mettent un certain temps pour se propager jusqu'à la sortie.

Les réservoirs disposent d'un agitateur que l'on n'a pas utilisé pour les expériences présentées dans ce rapport à cause du bruit électromagnétique et des fluctuations de niveau qu'introduit.

Le travail présenté ici a pour but de modéliser le système hydro-thermique avec régulation de niveau et de température permettant de travailler en configuration multivariable.

II.3 Modélisation du système

II.3.1 Système non linéaire

Le schéma simplifié suivant présente notre système

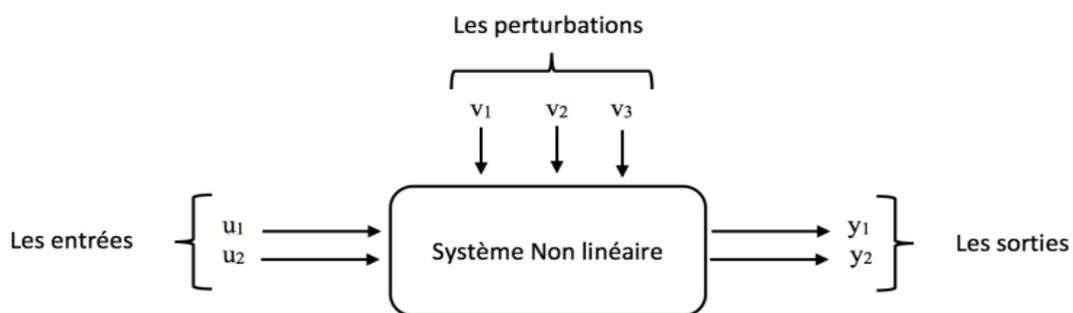


Figure II-2 : Système dynamique multivariable

Deux quantités peuvent être mesurées sur l'installation : le niveau et la température du réservoir R. Pour les deux systèmes de mesure on a cela :

$$y_1 = K_H \cdot H_2 \quad (\text{II. 1})$$

$$y_2 = K_T \cdot T_2 \quad (\text{II. 2})$$

Les deux vannes de contrôle ont les mêmes caractéristiques de débit, on assume que ces deux équations sont valides :

$$q_c = K_a \cdot u_c \quad (\text{II. 3})$$

$$q_f = K_a \cdot u_f \quad (\text{II. 4})$$

Pour le modéliser, on établit le bilan massique et le bilan énergétique pour chacun des réservoirs :

II.3.1.1 Bilan massique

La conservation de volume de fluide dans les deux réservoirs donne les relations suivantes :

$$\rho \cdot \frac{dv}{dt} = \rho \cdot (\sum \text{débit d'entrée} - \sum \text{débit de sortie}) \quad (\text{II. 5})$$

tel que $V_B = S \cdot H_B$

ρ : La densité volumique de fluide.

H : Le niveau de fluide dans le réservoir.

Nous allons déterminer l'évolution de la hauteur d'eau H_1 et H_2 respectivement dans les deux bacs en fonction des débits d'eaux d'entrées q_c et q_f , le débit d'écoulement entre les deux réservoirs q_1 et le débit de sortie q_2 .

$$\rho \cdot \frac{dv_1}{dt} = \rho \cdot q_c + \rho \cdot q_f - \rho \cdot q_1 \quad (\text{II. 6})$$

$$\rho \cdot \frac{dv_2}{dt} = \rho \cdot q_1 + \rho \cdot q_2 \quad (\text{II. 7})$$

Les volumes des bacs sont respectivement :

$$V_1 = S \cdot H_1 \text{ et } V_2 = S \cdot H_2 \quad (\text{II. 8})$$

En remplaçant V_1 et V_2 dans les équations (II.6) (II.7), on obtient :

$$\dot{H}_1 = \frac{1}{S} \cdot (q_c + q_f - q_1) \quad (\text{II. 9})$$

$$\dot{H}_2 = \frac{1}{S} \cdot (q_1 - q_2) \quad (\text{II. 10})$$

II.3.1.2 Bilan énergétique

Basant sur la loi de conservation d'énergie on trouve que l'énergie contenue dans le volume d'eau dans les deux réservoirs peut s'écrire sous la forme suivante :

$$E_L = S \cdot H_1 \cdot \rho \cdot C \cdot (T_1 - T_0) \quad (\text{II. 11})$$

$$E_R = S \cdot H_2 \cdot \rho \cdot C \cdot (T_2 - T_0) \quad (\text{II. 12})$$

avec $T_0 = 0$ c'est la température de référence où l'énergie est égale à zéro.

$$\frac{d(S \cdot H_1 \cdot T_1)}{dt} = q_c \cdot T_c + q_f \cdot T_f - q_1 \cdot T_1 \quad (\text{II. 13})$$

$$\frac{d(S \cdot H_2 \cdot T_2)}{dt} = q_1 \cdot T_1 - q_2 \cdot T_2 \quad (\text{II. 14})$$

T_c : La température d'entrée de l'eau chaude.

T_f : La température d'entrée de l'eau froide.

$$\dot{T}_1 = \frac{1}{S \cdot H_1} \cdot (q_c \cdot T_c + q_f \cdot T_f - q_1 \cdot T_1) - \dot{H}_1 \cdot \frac{T_1}{H_1} \quad (\text{II. 15})$$

$$\dot{T}_2 = \frac{1}{S \cdot H_2} \cdot (q_1 \cdot T_1 - q_2 \cdot T_2) - \dot{H}_2 \cdot \frac{T_2}{H_2} \quad (\text{II. 16})$$

L'orifice entre les deux réservoirs a une zone d'écoulement constante alors on peut écrire la relation suivante en appliquant la formule de Torricelli :

$$Q = C_d \cdot A_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta P} \quad (\text{II. 17})$$

avec : $P = \rho \cdot g \cdot h + P_0$

Le débit d'écoulement entre les deux réservoirs :

$$q_1 = C_0 \sqrt{H_1 - H_2} \quad (\text{II. 18})$$

sachant :

$$C_0 = k_0 \cdot A_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g}$$

La vanne de sortie à une variation de la section d'orifice A_v donc le débit de sortie est comme suit :

$$q_2 = D_v \cdot A_v \cdot \sqrt{H_2} \quad (\text{II. 19})$$

En substituant les équations (II.18) et (II.19) dans (II.9), (II.10), (II.15) et (II.16), on peut établir un modèle d'état dynamique de la manière suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{H}_1 = \frac{1}{S} [(q_c + q_f) - C_0 \sqrt{H_1 - H_2}] \\ \dot{H}_2 = \frac{1}{S} [C_0 \sqrt{H_1 - H_2} - D_v A_v \sqrt{H_2}] \\ \dot{T}_1 = \frac{1}{S \cdot H_1} [(T_c - T_1) \cdot q_c + (T_f - T_2) \cdot q_f] \\ \dot{T}_2 = \frac{1}{S \cdot H_2} (T_1 - T_2) \cdot C_0 \sqrt{H_1 - H_2} \end{array} \right. \quad (\text{II. 20})$$

Les perturbations sur le système

On considère que la variation de la section d'orifice due à la fermeture et l'ouverture de la vanne de sortie influe sur les niveaux des deux réservoirs comme première perturbation donc on aura :

$$V_1 = A_v \quad (\text{II. 21})$$

Les températures de débit chaud q_c et débit froid q_f agissent sur les températures des deux réservoirs comme deuxième et troisième perturbation :

$$V_2 = T_c \quad (\text{II. 22})$$

$$V_3 = T_f \quad (\text{II. 23})$$

Les paramètres du système

Symbole	Signification	Valeur numérique	Unité
S	La surface de la base du bac	0.785	m^2
K_a	Coefficient de débit	0.004	$\frac{m^3}{V} \cdot s$
K_H	Coefficient de débit Gain du niveau	2	V/m
K_T	Coefficient de débit Gain du température	0.1	V/C°
A_{v0}	La surface d'orifice	0.0122	m^2
P_0	Pression atmosphérique	1	atm
D_v	Constant d'écoulement de l'orifice entre les deux réservoirs	2.66	$m^{1/2}/s$
C_0		0.056	$m^{5/2}/s$
T_{c0}	Température chaude du débit entrant	60	C°
T_{f0}	Température froide e du débit entrant	30	C°

Tableau II-1 : Paramètres du système hydro-thermique

II.3.1.3 Représentation d'état du système

Nous considérons la hauteur H_2 et la température T_2 d'eau du deuxième réservoir comme étant les sorties de notre système :

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_2 \\ T_2 \end{bmatrix} = C \cdot x = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x \quad (\text{II. 24})$$

On remarque que la matrice C est linéaire, et que la matrice $D = 0$. Alors on peut définir les vecteurs suivants :

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ T_1 \\ T_2 \end{bmatrix}$$

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_c \\ q_f \end{bmatrix}$$

$$v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_v \\ T_c \\ T_f \end{bmatrix}$$

On considère les entres du système u_1 et u_2 comme des débits alors :

tel que :

$$u_1 = q_c = K_a \cdot u_c \quad (\text{II. 25})$$

$$u_2 = q_f = K_a \cdot u_f \quad (\text{II. 26})$$

u_c = Le signal de commande de la pompe d'eau chaude.

u_f = Le signal de commande de la pompe d'eau froide.

La même chose pour les signaux venus des capteurs on les donne comme des valeurs physiques alors :

$$y_1 = K_H \cdot H_2 \quad (\text{II. 27})$$

$$y_2 = K_T \cdot T_2 \quad (\text{II. 28})$$

On remplace A_v par (II.21), T_c par (II.22) et T_f par (II.23), ainsi les vecteurs représentés par (II.25) et (II.26) dans le système d'équation (II.20), on trouve le système non linéaire suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = \frac{1}{S} [(u_1 + u_2) - C_0 \sqrt{x_1 - x_2}] \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{S} [C_0 \sqrt{x_1 - x_2} - D_v v_1 \sqrt{x_2}] \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{S \cdot x_1} [(v_2 - x_3) \cdot u_1 + (v_3 - x_3) \cdot u_2] \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{S \cdot x_2} (x_3 - x_4) \cdot C_0 \sqrt{x_1 - x_2} \end{array} \right. \quad (\text{II. 29})$$

II.3.2 Linéarisation

Pour de nombreux systèmes on n'a pas une connaissance à priori qui permet de formuler un modèle linéaire immédiatement. Dans la plupart des systèmes physique il est nécessaire de commencer la modélisation en construisant le modèle non-linéaire puis la linéarisation.

Les modèles linéaires donnent une représentation suffisante, autour d'un point de fonctionnement, pour un grand nombre de systèmes physiques, permettant l'analyse des lois de commande en utilisant les outils de l'automatique linéaire.

Il est nécessaire de vérifier que l'approximation entre le modèle linéaire et non linéaire est validée et que l'on est toujours dans le voisinage du point à lequel est effectuée la linéarisation.

La linéarisation des systèmes non linéaires s'effectue par l'utilisation du développement en série de Taylor autour d'un point de fonctionnement $(x_0, u_0$ et $v_0)$ où les termes supérieurs à 1 sont négligés, elle peut être représentée comme suit :

$$(f(x, u, v) \approx f(x_0, u_0, v_0) + \frac{df(x_0, u_0, v_0)}{dx} \cdot \Delta x + \frac{df(x_0, u_0, v_0)}{du} \cdot \Delta u + \frac{df(x_0, u_0, v_0)}{dv} \cdot \Delta v$$

Pour des petites variations autour du point d'équilibre x_0, u_0 et v_0 on obtient : $\begin{cases} x = x_0 + \Delta x \\ u = u_0 + \Delta u \\ v = v_0 + \Delta v \end{cases}$

où :

$$\Delta x = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_3 \\ \Delta x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta H_1 \\ \Delta H_2 \\ \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 30})$$

$$\Delta u = \begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 31})$$

$$\Delta v = \begin{bmatrix} \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \\ \Delta v_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 32})$$

x_0, u_0 et v_0 sont respectivement les vecteurs d'état, d'entrée et de perturbation au point de fonctionnement.

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \frac{df(x, u, v)}{dx} \Big|_{(x,u,v)=(x_0,u_0,v_0)} = \begin{bmatrix} \frac{df_1}{dx_1} & \frac{df_1}{dx_2} & \frac{df_1}{dx_3} & \frac{df_1}{dx_4} \\ \frac{df_2}{dx_1} & \frac{df_2}{dx_2} & \frac{df_2}{dx_3} & \frac{df_2}{dx_4} \\ \frac{df_3}{dx_1} & \frac{df_3}{dx_2} & \frac{df_3}{dx_3} & \frac{df_3}{dx_4} \\ \frac{df_4}{dx_1} & \frac{df_4}{dx_2} & \frac{df_4}{dx_3} & \frac{df_4}{dx_4} \end{bmatrix} \\ \\ B = \frac{df(x, u, v)}{du} \Big|_{(x,u,v)=(x_0,u_0,v_0)} = \begin{bmatrix} \frac{df_1}{du_1} & \frac{df_1}{du_2} \\ \frac{df_2}{du_1} & \frac{df_2}{du_2} \\ \frac{df_3}{du_1} & \frac{df_3}{du_2} \\ \frac{df_4}{du_1} & \frac{df_4}{du_2} \end{bmatrix} \\ \\ E = \frac{df(x, u, v)}{dv} \Big|_{(x,u,v)=(x_0,u_0,v_0)} = \begin{bmatrix} \frac{df_1}{dv_1} & \frac{df_1}{dv_2} & \frac{df_1}{dv_3} \\ \frac{df_2}{dv_1} & \frac{df_2}{dv_2} & \frac{df_2}{dv_3} \\ \frac{df_3}{dv_1} & \frac{df_3}{dv_2} & \frac{df_3}{dv_3} \\ \frac{df_4}{dv_1} & \frac{df_4}{dv_2} & \frac{df_4}{dv_3} \end{bmatrix} \end{array} \right.$$

Le modèle d'état (II.30) peut être mis sous la forme :

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \cdot \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot \Delta \mathbf{u} + \mathbf{E} \cdot \Delta \mathbf{v} \\ \Delta \mathbf{y} = \mathbf{C} \cdot \Delta \mathbf{x} \end{cases} \quad (\text{II. 33})$$

Les débits d'entrées peuvent prendre des valeurs dans l'intervalle $[0 - 0.04] \text{ m}^3/\text{s}$, ils définissent la plage $[0 - 10]$ volts, acceptable pour un fonctionnement normal des vannes, grâce à la formule suivante :

$$q = k_a \cdot u$$

tel que $K_a = 0.004 [\frac{\text{m}^3}{\text{v}} \cdot \text{s}]$ est le coefficient de débit.

Dans notre travail on va prendre en considération l'effet de la saturation des pompes de commande.

II.3.2.1 Choix du point de fonctionnement

En régime permanent la dynamique du système est nulle ce qui implique que : $\dot{\mathbf{x}} = 0$ alors le système d'équations devient :

$$\begin{aligned} K_a(u_{10} + u_{20}) &= C_0 \sqrt{x_{10} - x_{20}} \\ C_0 \sqrt{x_{10} - x_{20}} &= D_v \sqrt{x_{20}} v_{10} \\ (v_{20} + x_{30})u_{10} &= -(v_{30} - x_{30})u_{20} \\ (x_{30} + x_{40})\sqrt{x_{10} - x_{20}} &= 0 \end{aligned}$$

On désire avoir les états suivants :

$$\begin{bmatrix} x_{10} \\ x_{20} \\ x_{30} \\ x_{40} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 1.5 \\ 40 \\ 40 \end{bmatrix}$$

Puis on calcule la commande qui mène à ces états à partir du système d'équations :

On obtient : $u_{10} = 0.0132 \text{ m}^3/\text{s}$ et $u_{20} = 0.0265 \text{ m}^3/\text{s}$.

Les matrices de linéarisation sont :

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-C_0}{2.S.\sqrt{x_{10}-x_{20}}} & \frac{C_0}{2.S.\sqrt{x_{10}-x_{20}}} & 0 & 0 \\ \frac{C_0}{2.S.\sqrt{x_{10}-x_{20}}} & \frac{-C_0}{2.S.\sqrt{x_{10}-x_{20}}} - \frac{D_v \cdot v_{10}}{2.S.\sqrt{x_{20}}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{u_{10} + u_{20}}{S.x_{10}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{C_0 \cdot \sqrt{x_{10}-x_{20}}}{S.x_{20}} & -\frac{C_0 \cdot \sqrt{x_{10}-x_{20}}}{S.x_{20}} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -0.0506 & 0.0506 & 0 & 0 \\ 0.0506 & -0.0675 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0253 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0338 & -0.0338 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 34})$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{S} & \frac{1}{S} \\ 0 & 0 \\ \frac{v_{20}-x_{30}}{S.x_{10}} & \frac{v_{30}-x_{30}}{S.x_{10}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.2739 & 1.2739 \\ 0 & 0 \\ 12.7389 & -6.3694 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 35})$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 36})$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\frac{D_v \cdot \sqrt{x_{20}}}{S} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{u_{10}}{S.x_{10}} & \frac{u_{20}}{S.x_{10}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -4.1501 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0084 & 0.0169 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 37})$$

Les valeurs propres de la matrice A sont :

$$\lambda_1 = -0.0077 \quad \lambda_2 = -0.0253 \quad \lambda_3 = -0.0338 \quad \lambda_4 = -0.1104$$

Le modèle linéaire obtenu autour de ce point de fonctionnement est stable.

II.4 Validation des modèles du système hydro-thermique sous Matlab

II.4.1 Introduction au logiciel MATLAB/Simulink

- MATLAB

Le logiciel MATLAB (MATrix LABoratory) est conçu pour travailler dans le domaine du calcul matriciel numérique. Tous les objets définis dans MATLAB sont donc au moyen de vecteur et matrices/ tableaux de nombres.

Matlab trouve ses applications dans de nombreuses disciplines. Il constitue un outil numérique puissant pour la modélisation de systèmes physiques, la simulation des modèles mathématiques, la conception et la validation (tests en simulation et expérimentation) d'applications.

Le logiciel intègre des boîtes à outils (toolbox) dédiés à des domaines technique scientifique, comme :

- Le traitement de signal (signal processing toolbox).
- La régulation automatique (control system toolbox).
- L'identification (system identification toolbox).
- Les réseaux de neurones (neural network toolbox).
- La logique floue (fuzzy logic toolbox).
- Le calcul symbolique (symbolic math toolbox).

Simulink est une boîte à outils de MATLAB permettant au moyen d'une interface graphique d'évoluer la construction rapide et la simulation de schémas fonctionnels complexes, contenant des systèmes linéaires et non linéaires.

Dans le cadre de la régulation automatique, MATLAB constitue un outil puissant d'analyse des systèmes dynamiques linéaires où on peut facilement obtenir les propriétés, comme les pôles, les zéros et tracer les réponses impulsionnelles ou indicelles, etc...

- Simulink

La boîte à outil Simulink est un complément puissant dans MATLAB. Les contributions de Simulink sont principalement :

- La construction de schémas fonctionnels.
- La simulation de systèmes linéaires et non linéaires.

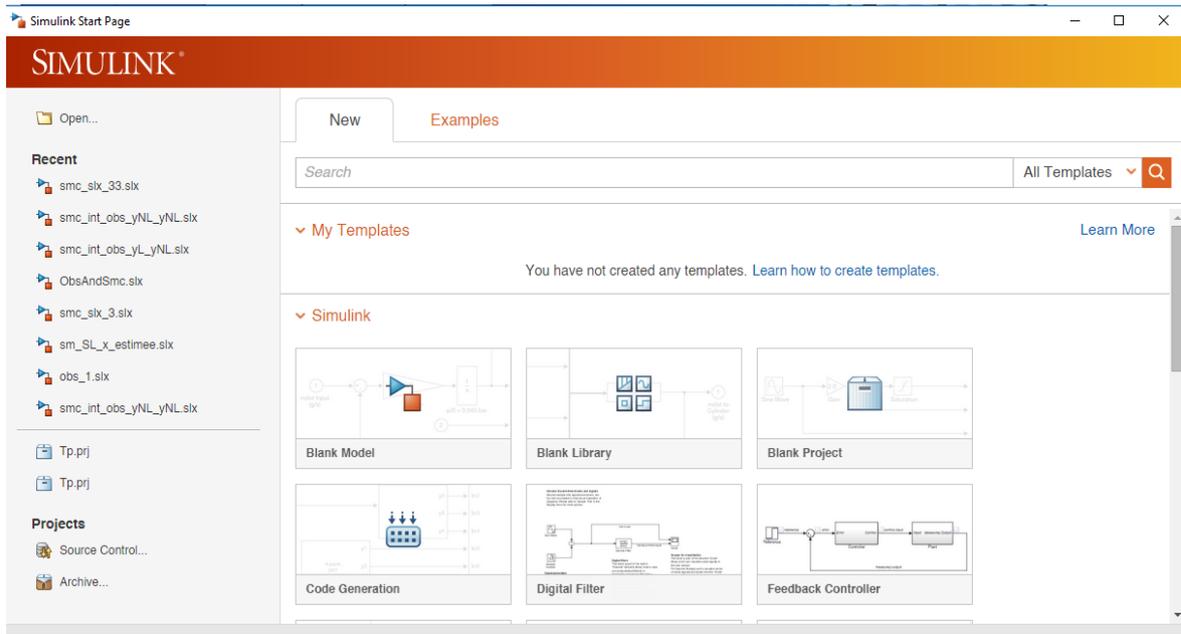


Figure II-3: Interface de Simulink

II.4.2 Schémas blocs des Modèles sous MATLAB/Simulink

La figure II-4 représente le bloc de simulation qui relie le système linéaire et non linéaire afin de faire une comparaison complète sur l'ensemble des deux réservoirs :

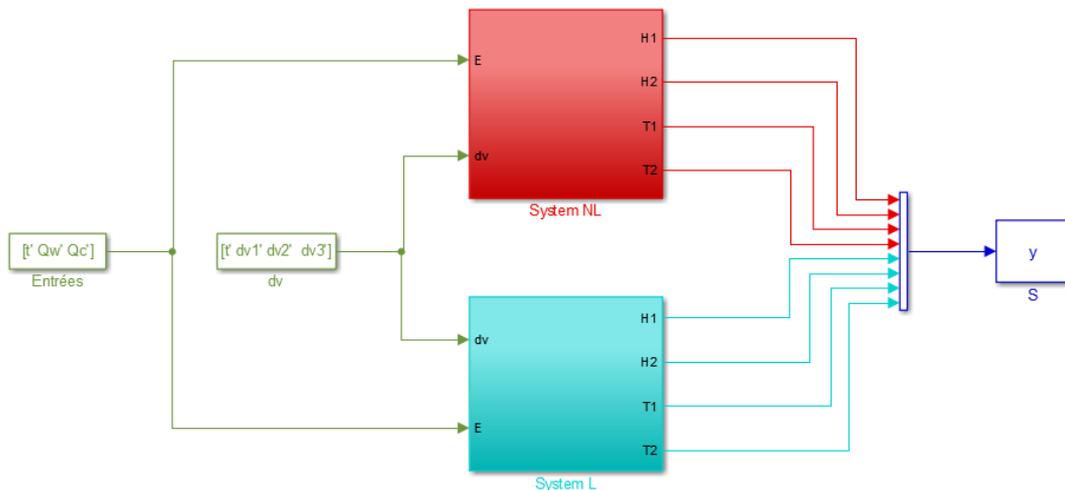


Figure II-4: Bloc de simulation du modèle linéaire et non-linéaire en boucle ouverte.

II.4.2.1 Résultat de simulation sans effets des perturbations

Les figures II-5 et II-6 montrent les résultats de simulation obtenus par la comparaison entre le modèle linéaire et non linéaire autour du point de fonctionnement.

On prend un intervalle de temps : $[0 - 500] s$, et un pas de simulation qui égale à $0.1s$.

$$dv = 0$$

- **Première simulation** : sans variation sur les entrées :

$$du_1 = du_2 = 0$$

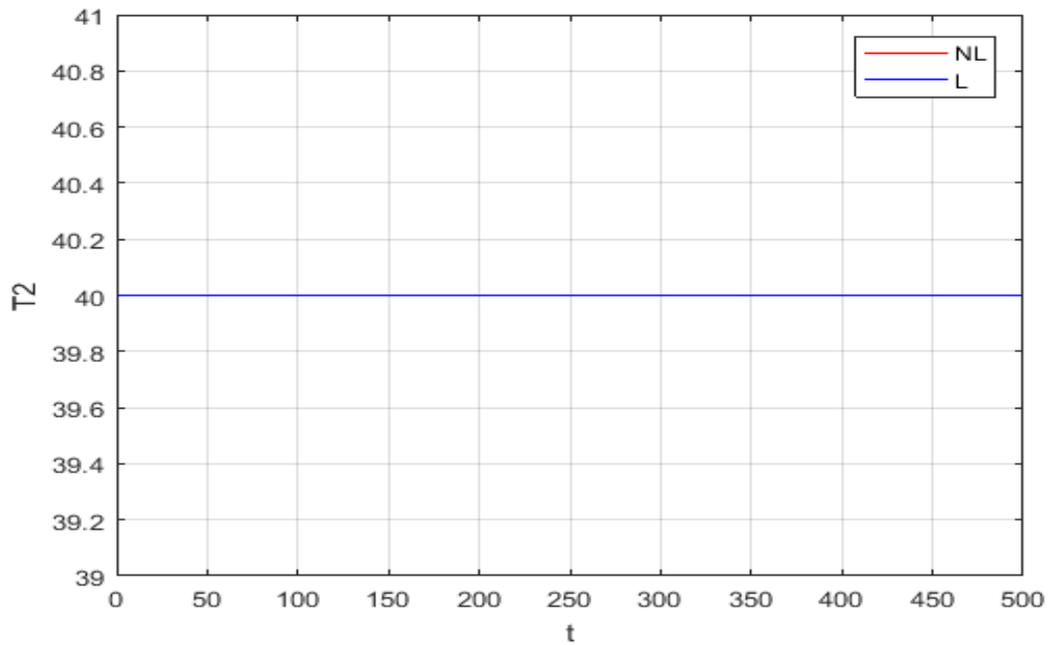


Figure II-5: Comparaison du modèle linéaire et non linéaire –niveau- sans variation sur les entrées en boucle ouverte.

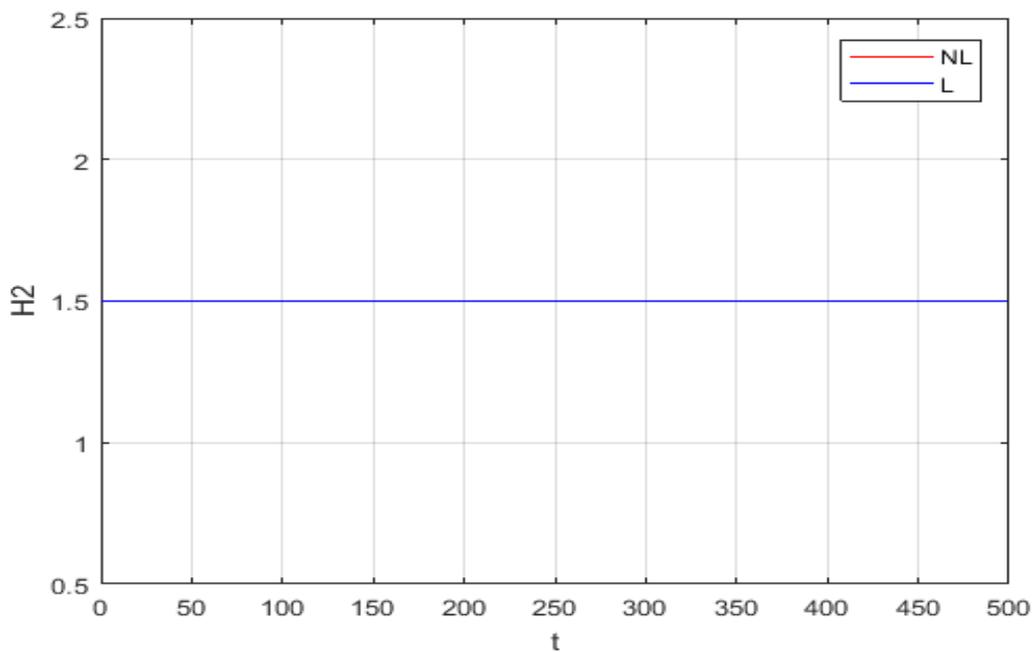


Figure II-6: Comparaison de modèle linéaire et non linéaire – température- sans variations sur les entrées en boucle ouverte

Les réponses des modèles linéaires et non linéaire sont similaires au point de fonctionnement.

- Deuxième simulation : avec variation sur les entrées

On associe aux débits d'entrées du système les variations suivantes :

$$du_1 = 0.0062 \quad du_2 = -0.0043$$

On prend un intervalle de temps : [0 - 1000] s, et un pas de simulation qui égale à 0.1s.

Les sorties sont tracées sur les figures II-7 et II-8 :

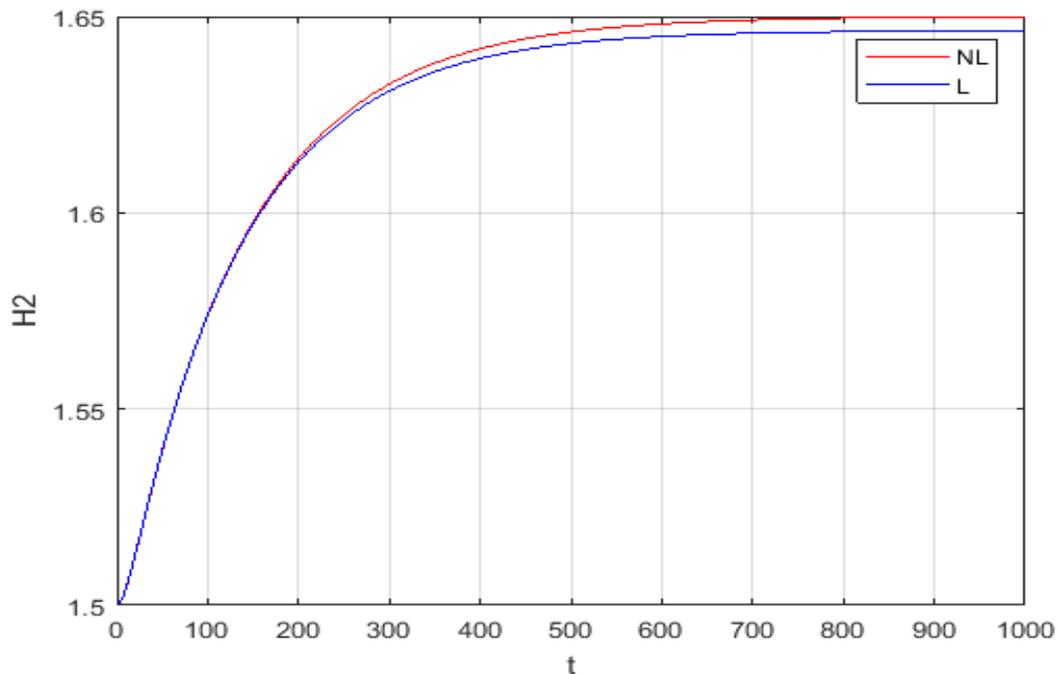


Figure II-7: Comparaison du modèle linéaire et non linéaire – niveau - avec variation sur les entrées en boucle ouverte.

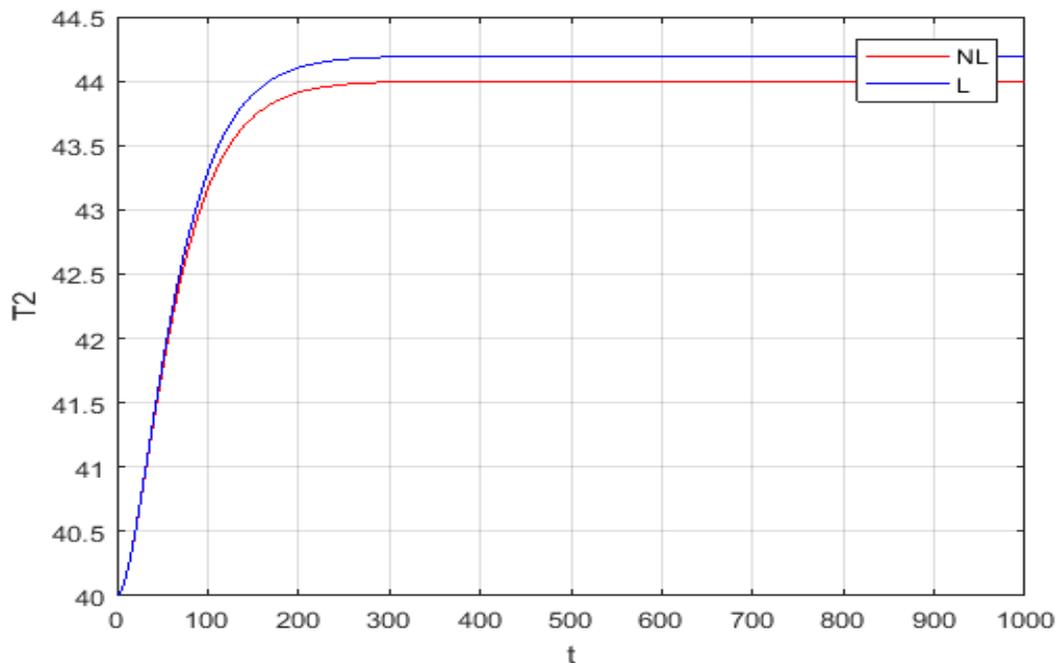


Figure II-8 : Comparaison de modèle linéaire et non linéaire – température – avec variation sur les entrées en boucle ouverte.

II.4.2.2 Interprétation des résultats

Les réponses ci-dessus illustrent bien que la dynamique du modèle linéaire est proche de la dynamique du modèle non linéaire. Ainsi, ils indiquent qu’il n’y a pas de dépassement concernant notre système dû aux pôles de la matrice d’état qui sont tous à partie réelles négatives.

Les réponses avec variations sur les débits d’entrées du modèle linéaire aux régimes permanents au point de fonctionnement présentent des petites différences par rapport aux réponses du modèle non linéaire, ces différences sont dues à l’éloignement important du point de fonctionnement. Ces variations nous ont permis d’aboutir aux performances exigées :

De niveau et de température ($H_2 = 1.65$ et $T_2 = 44$).

Les erreurs aux régimes permanents entre les réponses des modèles sont clairement montrées par le tableau suivant :

Les sorties de système	Model non linéaire	Model linéaire	Erreur statique (%) du système linéaire
$H_2 (m)$	1.65	1.648	1.33
$T_2 (°C)$	44	44.20	5

Tableau II-2 : Les erreurs en régime permanent entre SNL et SL

II.4.2.3 Simulation avec application des perturbations

On considère dans notre étude que les perturbations sont déterministes et définies sur les plages suivantes :

$$dv = \begin{cases} 4\% \text{ de } v1 \text{ dans } t \in [2500, 2600] \text{ s} \\ -6\% \text{ de } v2 \text{ dans } t \in [1500, 1600] \text{ s} \\ -7\% \text{ de } v3 \text{ dans } t \in [3500, 3600] \text{ s} \end{cases}$$

Le temps de simulation est 5000 s ce choix est effectué dans le but de voir clairement le dynamique du système qui est soumis à des perturbations.

Les figures II-9 et II-10 présentent l'évolution des sorties du modèle linéaire et non linéaire au point de fonctionnement avec application des perturbations :

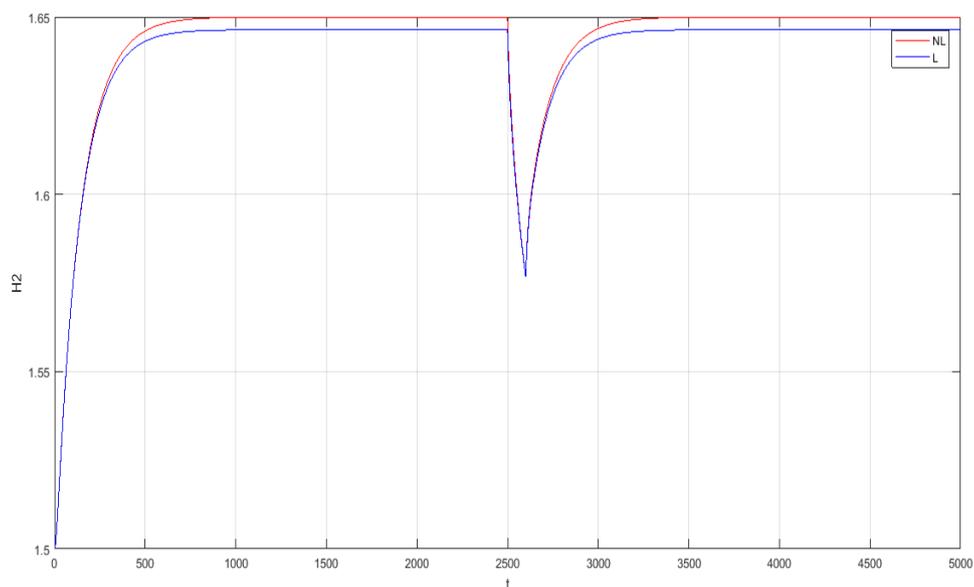


Figure II-9: Comparaison du modelé linéaire et non linéaire de H_2 avec variations sur les entrées et avec perturbations en boucle ouverte.

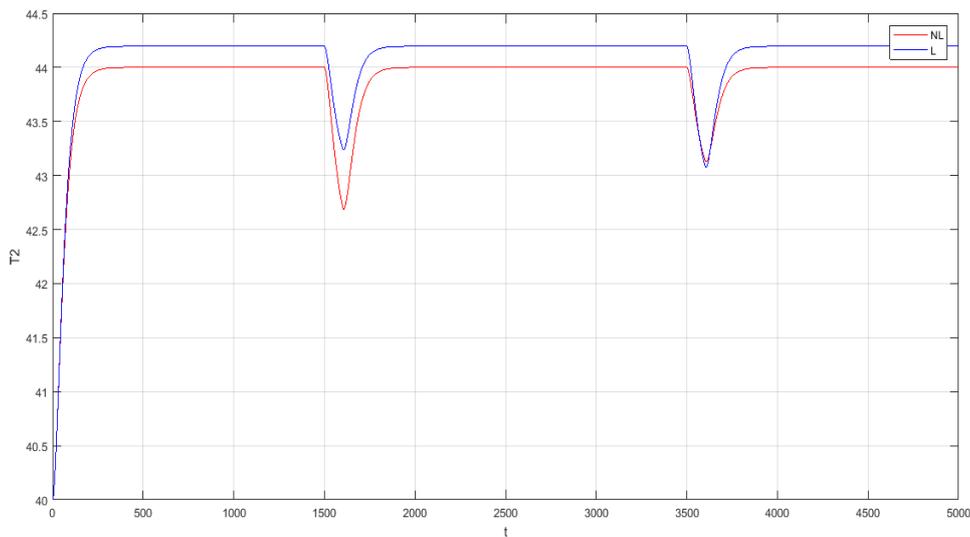


Figure II-10: Comparaison de modèle linéaire et non linéaire T_2 avec variations sur les entrées et avec perturbations en boucle ouverte.

II.4.2.4 Interprétation des résultats

L'effet de la perturbation apparaît sur les résultats de la simulation des deux modèles : la première perturbation agit sur le niveau (H_2) par contre les variations de v_2 et v_3 agissent sur la température (T_2).

Le tableau suivant résume le dépassement produit par les perturbations :

		Effets de perturbation (%)	
		Modèle non linéaire	Modèle linéaire
$H_2(m)$	dv_1	48.57	47.37
$T_2(C^\circ)$	dv_2	31.91	22.37
	dv_3	21.27	26.10

Tableau II-3: L'effet des perturbations sur le model linéaire et non linéaire

D'après ce tableau on remarque que les perturbations appliquées sur notre système ont un impact très fort sur le dynamique du système, on a obtenu des déplacements très grand par rapport aux 5%.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a fait une description du système hydro-thermique qui est composé de deux réservoirs alimentés par deux pompes dont les débits d'eau sont de différentes températures et qui est influencé par trois perturbations qui sont le changement de températures d'eau des deux entres et le changement de la section de sortie.

Par la suite on a modélisé notre système pour avoir le modèle mathématique non linéaire afin de pouvoir étudier ce process, en suite on a fait la linéarisation de ce model autour du point de fonctionnement à l'aide du développement en série de Taylor du premier ordre afin de développer la méthode de synthèse des commandes par le régime glissant.

A la fin de ce chapitre, nous avons procédé à la validation du modèle linéaire obtenu, c'est-à-dire en le comparant au modèle mathématique linéaire et non linéaire du système hydro-thermique dans les mêmes conditions de fonctionnement. Nous avons constaté une erreur acceptable qui est inférieure à 5% lors de cette phase de validation, en simulation sous Matlab.

Chapitre III :

Commande à régime glissant

III.1 Introduction

La commande par mode de glissement fait partie de la famille des contrôleurs à structure variable. C'est une commande qui est reconnue pour sa grande robustesse vis à vis des incertitudes paramétriques et les perturbations externes au système, d'autant plus qu'elle est simple à implémenter. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi d'étudier la commande par mode de glissement.

Toutefois, la commande par mode de glissement induit en pratique des commutations haute fréquence sur la commande. Ces commutations peuvent exciter des dynamiques non désirées qui risquent de déstabiliser, détériorer voire même de détruire le système étudié[14].

Le réglage en mode de glissement est un mode de fonctionnement particulier des systèmes à structure variable. La théorie donc des systèmes à structure variable et les modes glissants associés (en anglais : Sliding Mode), est une technique de commande non linéaire, elle est caractérisée par la discontinuité de la commande aux passages par une surface de commutation appelée surface de glissement.

La technique des modes glissants consiste à amener la trajectoire d'un état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une commutation appropriée autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre, d'où le phénomène de glissement[15].

III.2 Système à structure variable

Lorsque la structure du système ou du correcteur utilisé prend d'une façon discontinue deux ou plusieurs expressions, la notion de système à structures variables intervient. Il en découle la définition suivante :

Un système à structure variable est un système dont la structure change pendant son fonctionnement, il est caractérisé par le choix d'une structure et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à l'autre à tout instant.

De plus un tel système peut avoir de nouvelles propriétés qui n'existent pas dans chaque structure [16].

III.3 Principe de la commande à structure variable à régime glissant

Dans la commande des systèmes à structure variable par mode de glissement, la trajectoire d'état est amenée vers une surface, puis à l'aide de la loi de commutation, elle est obligée de rester au voisinage de cette surface. Cette dernière est appelée surface de glissement et le mouvement le long de laquelle se produit est appelé mouvement de glissement.

La forme d'une commande à structure variable peut être donnée par :

$$\begin{cases} u_i = u_{max} & S_i(x) > 0 \\ u_i = u_{min} & S_i(x) < 0 \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (\text{III.1})$$

Parmi les propriétés des modes glissants :

- La trajectoire d'état du système en mode de glissement appartient à une surface de dimension inférieure à celle de l'espace d'état, par conséquent l'ordre des équations différentielles régissant le fonctionnement du système en mode de glissement est réduit.
- La théorie des modes glissants s'adapte bien pour les systèmes dont la commande est discontinue.
- La dynamique du système en mode de glissement est déterminée uniquement par le choix des coefficients de la surface de glissement[17].

III.3.1 Fonction de commutation

La structure de commande est caractérisée par le signe d'une fonction vectorielle $S(x)$ appelée fonction de commutation. Dans le cas des modèles linéaires, la fonction de commutation est choisie comme une fonction linéaire de l'état :

$$S(x) = [S_1(x), S_2(x) \dots S_m(x)] = Cx \text{ ou } C = [c_1, c_2, \dots, c_m] \quad (\text{III. 2})$$

Chaque fonction scalaire de commutation $S_i(x)$ décrit une surface linéaire $S_i(x) = 0$.

III.3.2 Hyperplan de commutation

La surface de commutation associée au système de commande à structure variable défini précédemment

$$S_i = \{x \in R_n : S(x) = 0\}, i = 1, 2, \dots, m$$

m est appelée hypersurface de glissement.

III.3.3 Régime glissant

Si pour tout vecteur d'état initial $x(t_0) \in S$ la trajectoire d'état reste dans l'hypersurface S_i , $x(t) \in S \forall t > t_0$ alors $x(t)$ est un mode glissant pour le système.

III.3.4 Surface de glissement

Si tout point de S est tel qu'il existe des trajectoires d'état hors de S le contenant alors la surface de commutation S est appelée surface de glissement.

Le but d'un système de commande à structure variable est d'amener asymptotiquement l'état du système à partir d'une condition initiale quelconque $x(t_0) = x_0$ vers l'origine de l'espace d'état quand $t \rightarrow \infty$.

La trajectoire dans le plan de phase se compose de trois parties distinctes :

III.3.4.1 Mode de convergence (MC)

C'est le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase et tend vers la surface de commutation $S(x) = 0$. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence [18].

III.3.4.2 Mode de glissement (MG)

C'est le mode durant lequel la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est caractérisée par la détermination de la surface de glissement $S(x) = 0$ [18].

III.3.4.3 Mode du régime permanent (MRP)

Ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse de système autour de son point d'équilibre (origine de plan de phase) il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande [18].

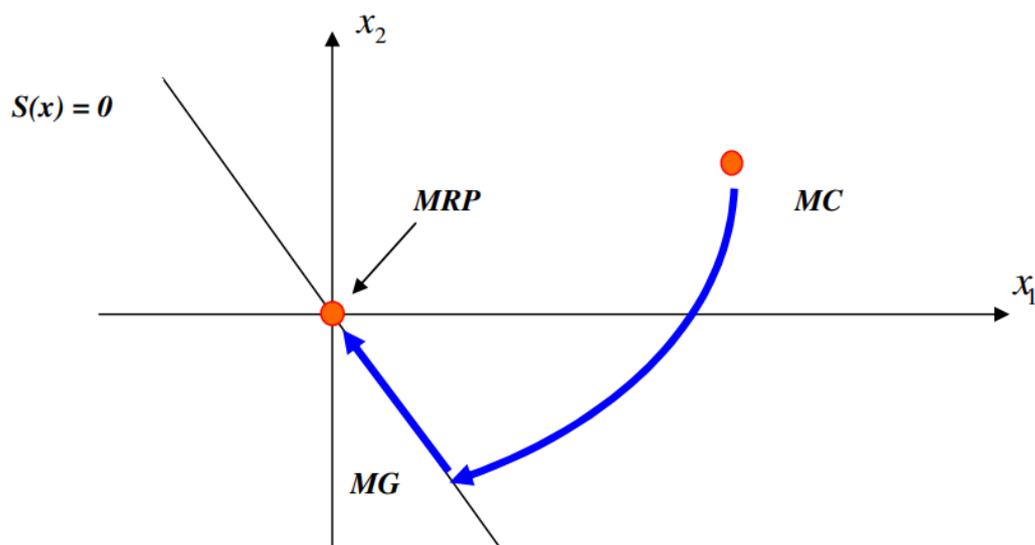


Figure III- 1: Les différents modes pour la trajectoire dans le plan de Phase.

III.3.5 Conditions d'existence et de convergence du régime glissant

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et de rester indépendamment de la perturbation. On présente deux types de conditions qui sont :

III.3.5.1 Fonction discontinue de commutation

Cette approche est la plus ancienne, elle est proposée et étudiée par Emilyanov et Utkin. Elle est donnée sous la forme [19]:

$$S \cdot \dot{S} < 0 \quad (\text{III. 3})$$

III.3.5.2 Fonction de Lyapunov :

La fonction de Lyapunov est une fonction scalaire positive, $V(x) > 0$, pour les variables d'état du système.

Elle est utilisée pour estimer les performances de la commande pour l'étude de la robustesse, elle garantit la stabilité du système non linéaire et l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence, elle a la forme suivante [19]:

$$V(S) = \frac{1}{2} S^2 \quad (\text{III. 4})$$

Sa dérivée est :

$$\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x) \quad (\text{III. 5})$$

La loi de la commande doit faire décroître cette fonction $\dot{V}(x) < 0$, l'idée est de choisir une fonction scalaire $S(x)$, pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence, et concevoir une commande « u » tel que le carré de la surface correspond à une fonction de Lyapunov. Pour que la fonction $V(x)$, puisse décroître, il suffit d'assurer que sa dérivée est négative.

D'où la condition de convergence exprimée par l'équation (III.3). Pour une convergence en temps fini, la condition (III.3) qui ne garantit qu'une convergence asymptotique vers la surface de glissement est remplacée par une condition plus restrictive dite de η -attractivité et donnée par [19]:

$$S \cdot \dot{S} < -K \cdot |S| ; K > 0 \quad (\text{III. 6})$$

III.3.6 Surface glissante linéaire

La surface glissante linéaire, en raison de sa simplicité de mise en œuvre, est communément utilisée dans SMC design. Premièrement, nous introduisons la 'forme régulière' approche de transformation modèle. Considérez le système linéaire suivant :

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \quad (\text{III. 7})$$

Où $x(t) \in R^n$ est le vecteur d'état de système, $u(t) \in R^m$ est la contribution de contrôle et les matrices $A \in R^{n \times n}$ et $B \in R^{n \times m}$. On suppose que la matrice B a le plein grade de colonne et on suppose que la paire (A, B) est commandable.

Le logiciel MATLAB nous a permis de vérifier la commandabilité du système par l'utilisation de commande « *ctrb* ».

On trouve la matrice de commandabilité C_o puis on exécute la commande « *rank* » qui nous donne le rang de la matrice C_o : Le résultat obtenu est $rank(C_o) = 4$ qui est l'ordre du système étudié alors notre système est commandable.

En appliquant une transformation difféomorphe appropriée :

$$x(t) = Q \cdot z(t) \quad (\text{III. 8})$$

$$z(t) = \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix} = Q^T \cdot x(t) \quad (\text{III. 9})$$

Où Q est une matrice orthogonale :

$$Q^T = Q^{-1}$$

En remplaçant (III.8) dans (III.7) on trouve :

$$Q \cdot \dot{z} = A \cdot Q \cdot z + B \cdot u \quad (\text{III. 10})$$

En multiplions par Q^T :

$$\dot{z} = Q^T \cdot A \cdot Q \cdot z + Q^T \cdot B \cdot u$$

On trouve :

$$\dot{z} = \bar{A} \cdot z + \bar{B} \cdot u \quad (\text{III. 11})$$

Où :

$$\bar{A} = Q^T \cdot A \cdot Q$$

$$\bar{B} = Q^T \cdot B$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Q et R sont obtenues par Matlab à l'aide de la fonction :

$$[Q, R] = qr(B)$$

Où :

$$\bar{B} = R$$

Il est bien connu que pour le système contrôlable (III.7) existe là une transformation non singulière, Tel que :

$$\dot{z}_1 = A_{11} \cdot z_1 + A_{12} \cdot z_2 + B_1 \cdot u \quad (\text{III. 12})$$

$$\dot{z}_2 = A_{21} \cdot z_1 + A_{22} \cdot z_2 \quad (\text{III. 13})$$

Où $z_1 \in R^m$ et $z_2 \in R^{n-m}$ sont les états de système transformés.

$A_{11} \in R^{(n-m) \times (n-m)}$, $A_{12} \in R^{(n-m) \times m}$, $A_{21} \in R^{m \times (n-m)}$, $A_{22} \in R^{m \times m}$, $B_1 \in R^{m \times m}$ et B_1 est non singulier.

On pose la surface S_z égale à :

$$S_z = C \cdot z$$

$$S_z = c_1 \cdot z_1 + c_2 \cdot z_2 \quad (\text{III. 14})$$

Où C est le paramètre de design qu'on cherche à concevoir. Pareillement, quand les trajectoires d'état de système arrivent sur la surface glissante, c'est-à-dire $S_z = 0$, elle le suit :

$$z_1 = -c_1^{-1} \cdot c_2 \cdot z_2 \quad (\text{III. 15})$$

En remplaçant (III.15) dans la première équation (III.13) on trouve :

$$\begin{aligned} \dot{z}_2 &= -A_{21} \cdot c_1^{-1} \cdot c_2 \cdot z_2 + A_{22} \cdot z_2 \\ \dot{z}_2 &= (A_{22} - A_{21} \cdot c_1^{-1} \cdot c_2) \cdot z_2 \end{aligned} \quad (\text{III. 16})$$

On pose :

$$F = c_1^{-1} \cdot c_2 \quad (\text{III. 17})$$

En remplaçant F dans (III.16) :

$$\dot{z}_2 = (A_{22} - A_{21} \cdot F) \cdot z_2 \quad (\text{III. 18})$$

Le système réduit est la soi-disant dynamique de mode régime glissant (c'est-à-dire l'équation de mouvement dans la surface glissante), qui est un système autonome.

Donc, le design de surfaces glissantes devient le choix du paramètre matriciel C tel que la dynamique de mode glissante est stable.

En outre, comme on peut montrer que, si la paire (A, B) est contrôlable, donc la paire (A_{22}, A_{21}) est contrôlable aussi, le problème de trouver la matrice de design F est en fait un problème de feedback classique avec la matrice F comme un feedback de gain et A_{21} comme une matrice d'entrée.

Donc, toutes les méthodes linéaires de design de contrôle de feedback existantes peuvent être utilisées pour résoudre ce problème, par exemple, la méthode de lieux de racines conventionnelle et méthode de régulation linéaire quadratique (LQR).

Pour calculer la matrice F on a utilisé l'instruction *place* et on a utilisé la méthode de lieux de racines pour le placement des pôles pour que le système (III.19) soit stable :

$$F = \text{place}(A_{22}, A_{21}, \text{poles})$$

on a: $S = C \cdot z = C \cdot Q^T \cdot x = G \cdot x$

donc : $G = C \cdot Q^T = [c_1 \ c_2] Q^T = c_1 [I \ F] Q^T \quad (\text{III. 19})$

où : $c_1 = I$ ou bien $c_1 = B_1^{-1}$

III.3.7 Détermination de la loi de commande

III.3.7.1 Commande en cas de stabilisation

III.3.7.1.1 Commande équivalente

Un vecteur de commande équivalente u_{eq} se définit comme étant les équations du régime glissant idéal. Nous nous intéressons au calcul de la commande équivalente et par la suite au calcul de la commande attractive du système défini dans l'espace d'état par l'équation (III.7) [20].

Le vecteur u est composé de deux grandeurs u_{eq} et u_d soit :

$$u = u_{eq} + u_d \quad (\text{III. 20})$$

On a le système linéaire suivant :

$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u$$

On pose :

$$S = G \cdot x \quad (\text{III. 21})$$

La dérivée de la surface de glissement donnée en relation (III.21) est :

$$\dot{S} = G \cdot \dot{x} \quad (\text{III. 22})$$

La commande équivalente est obtenue comme suit :

$$\dot{S} = G \cdot \dot{x} = 0 \quad (\text{III. 23})$$

En remplaçant (III.7) dans (III.23) :

$$G \cdot A \cdot x + G \cdot B \cdot u_{eq} = 0$$

On trouve que la commande équivalente égale à :

$$u_{eq} = -(G \cdot B)^{-1} \cdot G \cdot A \cdot x \quad (\text{III. 24})$$

III.3.7.1.2 Commande discontinue

L'addition du terme u_d à la loi de commande permet d'assurer l'attractivité de la surface de glissement S , Celle-ci est attractive si seulement si $S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0$.

Cette condition permet de définir la région dans laquelle le mode de glissement existe. on prend :

$$\dot{S} = -\eta \cdot \text{sign}(S) \quad (\text{III. 25})$$

on a :

$$u = u_{eq} + u_d$$

On a déjà calculé u_{eq} dans l'étape précédente.

$$G.\dot{x} = G.A.x + G.B.u = -\eta.sign(S)$$

$$G.A.x + G.B.(u_{eq} + u_d) = -\eta.sign(S)$$

Après les calculs on trouve :

$$u_d = -(GB)^{-1}\eta.sign(S) \quad (III. 26)$$

III.3.7.2 Commande en cas de poursuite

Le calcul de la commande équivalente et la commande de discontinue est le même que celui de la commande de stabilisation

III.3.7.2.1 Commande équivalente

$$u_{eq} = -(G.B)^{-1}.G.A.x$$

III.3.7.2.2 Commande discontinue

$$u_d = (G.B)^{-1}.\eta.sign(S) \quad (III. 27)$$

Pour cette commande on prend

$$S = G.e \quad (III. 28)$$

avec

$$e = x_d - x \quad (III. 29)$$

III.3.7.3 Etude de stabilité du système sur la base de la fonction de Lyapunov

on pose :

$$v = \frac{1}{2}.S^2 \quad (III. 30)$$

Sa dérivée est :

$$\dot{v} = S.\dot{S} \quad (III. 31)$$

on a :

$$S = G.e$$

$$\dot{S} = -G.\dot{x} \quad (III. 32)$$

On remplace la relation (III.7) dans la relation (III.32) on obtient :

$$\dot{S} = -GAx - GBu \quad (III. 33)$$

on sait que :

$$u = u_{eq} + u_d \quad (III. 34)$$

$$u = -(GB)^{-1}GAx + (GB)^{-1}\eta.sign(S) \quad (III. 35)$$

En remplaçant (III.35) dans (III.33) on aura :

$$\begin{aligned}\dot{S} &= -G.A.x - G.B.(-(G.B)^{-1}G.A.x + (G.B)^{-1}\eta.\text{sign}(S)) \\ \dot{S} &= -G.A.x + (G.B).(G.B)^{-1}G.A.x - (G.B).(G.B)^{-1}\eta.\text{sign}(S) \\ \dot{S} &= -\eta.\text{sign}(S)\end{aligned}\quad (\text{III. 36})$$

En remplaçant (III.36) dans (III.31) on aura :

$$\dot{v} = S.\dot{S} = -\eta.\text{sign}(S).S$$

$$S.\dot{S} = -\eta.\frac{S}{|S|}.S$$

$$S.\dot{S} = -\eta.|S|\quad (\text{III. 37})$$

on a : $\eta > 0$

d'où : $S.\dot{S} < 0$

Donc le système est asymptotiquement stable.

III.3.8 Phénomène du broutement

Un régime glissant idéal requiert une commande pouvant commuter à une fréquence infinie. Ainsi, durant le régime glissant, les discontinuités appliquées à la commande peuvent entraîner un phénomène de broutement, appelé réticence ou "Chattering" en anglais. Celui-ci se caractérise par de fortes oscillations des trajectoires du système autour de la surface de glissement figure III-2. Les principales raisons à l'origine de ce phénomène sont les limitations des actionneurs ou les retards de commutation au niveau de la commande. Ces commutations détériorent la précision de la commande et peuvent s'avérer néfastes pour l'organe de commande en provoquant une détérioration prématurée des systèmes mécaniques et une élévation de température dans les systèmes électriques (perte d'énergie non négligeable) [21].

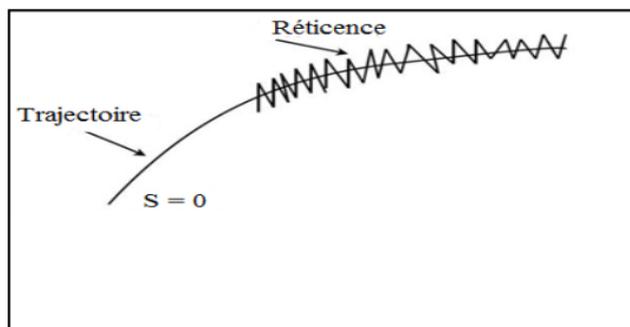


Figure III- 2: Phénomène de broutement.

III.3.9 Suppression du phénomène de réticence

Dans le but de réduire ou d'éliminer ce phénomène, de nombreuses solutions ont été proposées, comme la solution de couche limite, mode glissant flou, mode glissant d'ordre supérieur, etc....

III.3.9.1 Commande avec seuil

Cette commande est caractérisée par un seuil e figure III-3. Dans la bande qui entoure la surface de glissement $S(x)$, seule la composante continue u_{eq} de la tension de commande qui agit. La partie discontinue u_d étant égale à zéro.

Les oscillations sur les réponses fortement atténuées, Cependant lorsque e augmente, il apparaît un écart statique sur la réponse en régulation La commande discontinue a l'expression suivante [22] :

$$\begin{cases} u_d = 0 & \text{si } |S| < e \\ u_d = K \cdot \text{sign}(S) & \text{si } |S| > e \end{cases} \quad (\text{III. 38})$$

Ce choix de la fonction discontinue est représenté sur la figure suivante :

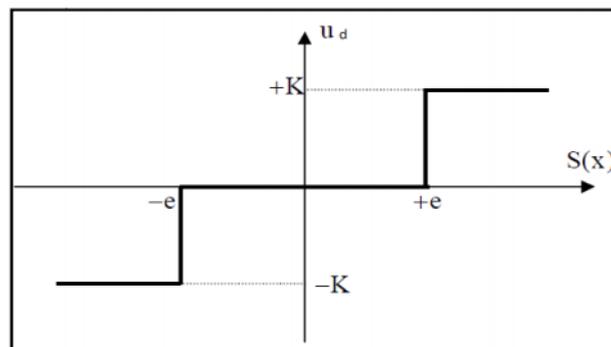


Figure III- 3: Fonction signe de la commande avec un seul seuil.

Ce type de commande n'est pas très utilisé car, outre le problème d'erreur statique, en présence d'une perturbation, u_d intervient avec toute sa valeur et des oscillations peuvent persister en régime permanent. Un adoucissement de la commande u_d est donc nécessaire.

III.3.9.2 Commande SAT

Cette fonction représentée dans la figure III-4, est définie par [23]:

$$\text{Sat}(S) = \begin{cases} \frac{S}{\emptyset} & \text{si } \left| \frac{S}{\emptyset} \right| < 1 \\ \text{sign}\left(\frac{S}{\emptyset}\right) & \text{si } \left| \frac{S}{\emptyset} \right| > 1 \end{cases} \quad (\text{III. 39})$$

u_d s'exprime donc comme : $u_d = k \cdot \text{Sat}(s)$.

\emptyset Représente la bande de transition de la surface de glissement.

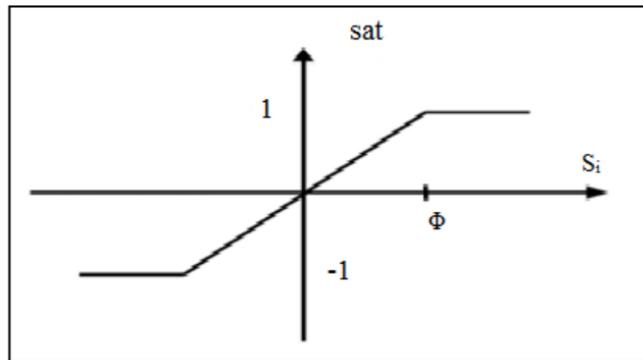


Figure III- 4: Fonction SAT.

III.3.9.3 Commande Smooth

On peut aussi remplacer la fonction « signe » par une fonction de classe C_1 . On donne ci-dessous un exemple de ce type de fonction, figure III-5 :

$$u_d = K \cdot \frac{s}{|s|+l} \quad (\text{III. 40})$$

Où l est un paramètre définissant le degré d'atténuation des oscillations, Lorsque l tend vers zéro, on tend vers la même commande discontinue définie par (III.26)

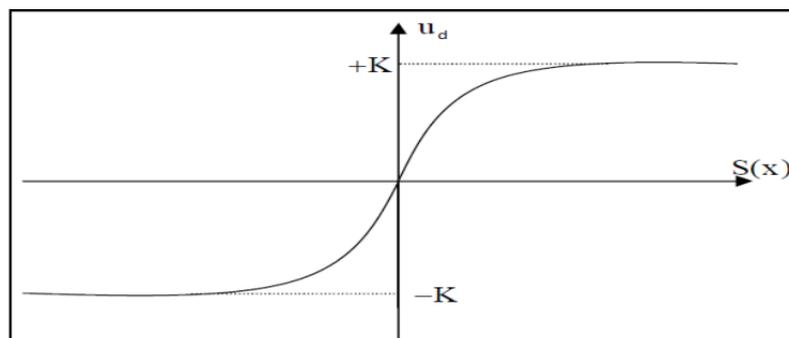


Figure III- 5: Fonction Smooth

III.3.9.4 Commande th (tangente hyperbolique)

On peut aussi remplacer la fonction « signe » par une fonction « th ». On donne ci-dessous un exemple de ce type de fonction, figure III-6 :

$$u_d = K \cdot th(S) \quad (\text{III. 41})$$

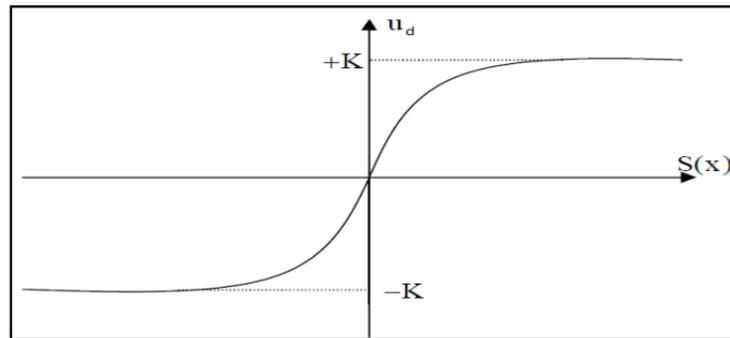


Figure III- 6: Fonction th

III.3.10 Commande à régime glissant du système hydro-thermique

Pour la synthèse de cette loi de commande, on utilise le modèle d'état du système Hydro-thermique linéarisé.

III.3.10.1 Schémas bloc de la commande à régime glissant du système hydro-thermique

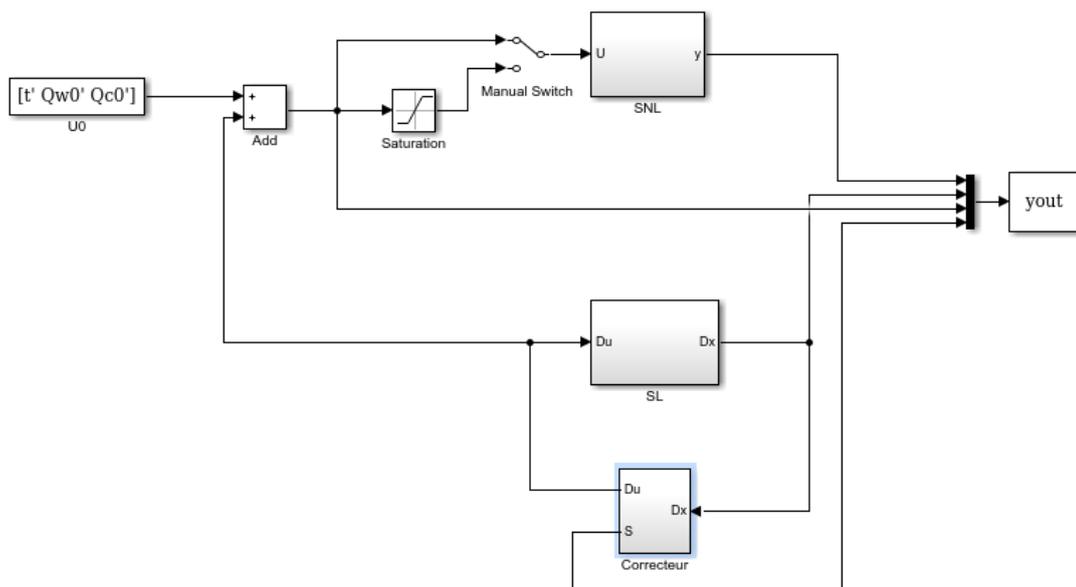


Figure III- 7: Simulation du modèle linéaire et non linéaire avec correcteur pour étudier la stabilisation.

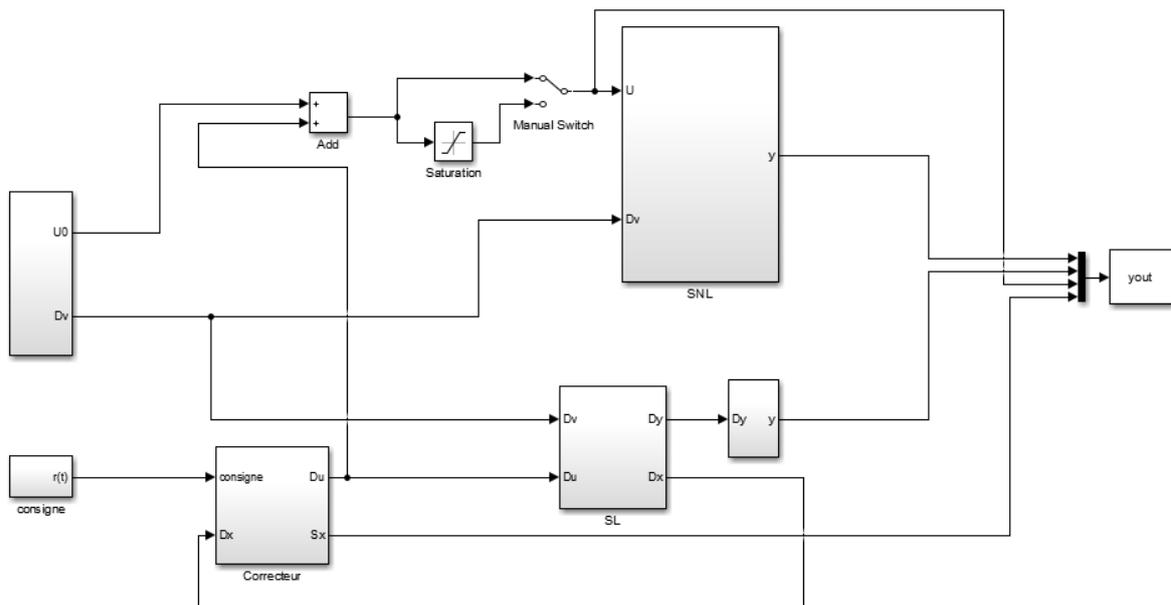


Figure III- 8: Simulation du modèle linéaire et non linéaire avec correcteur pour la commande glissante

III.3.10.2 Résultats de simulation

III.3.10.2.1 Etude en stabilisation

Les conditions initiales de système linéaire sont : $\Delta x_0 = [0.2 \quad 0.15 \quad 4 \quad 4]$

On veut observer le développement de la commande, la surface de glissement et les états dans les figures III-9, III-10, III-11

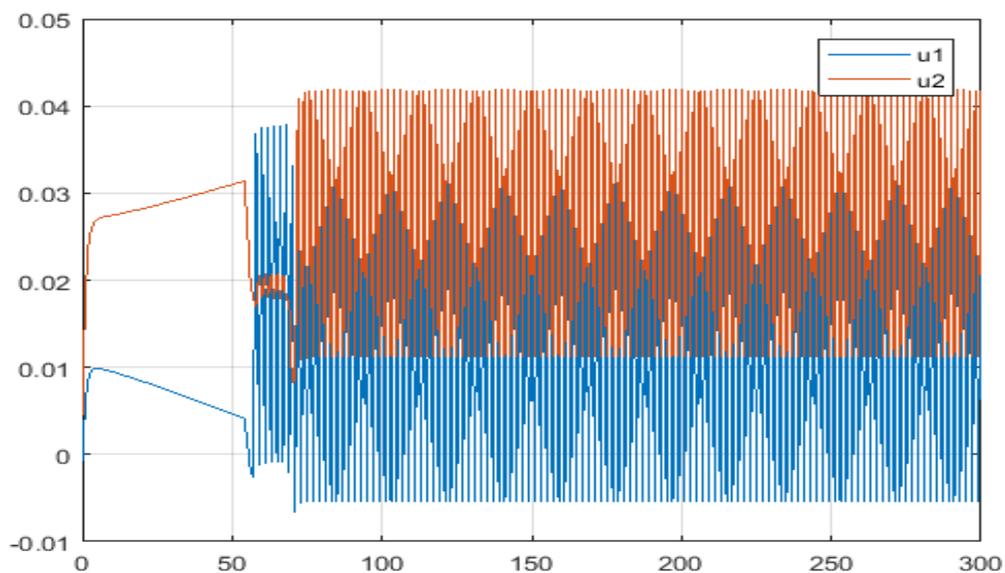


Figure III- 9: Simulation de la commande u_1 et u_2

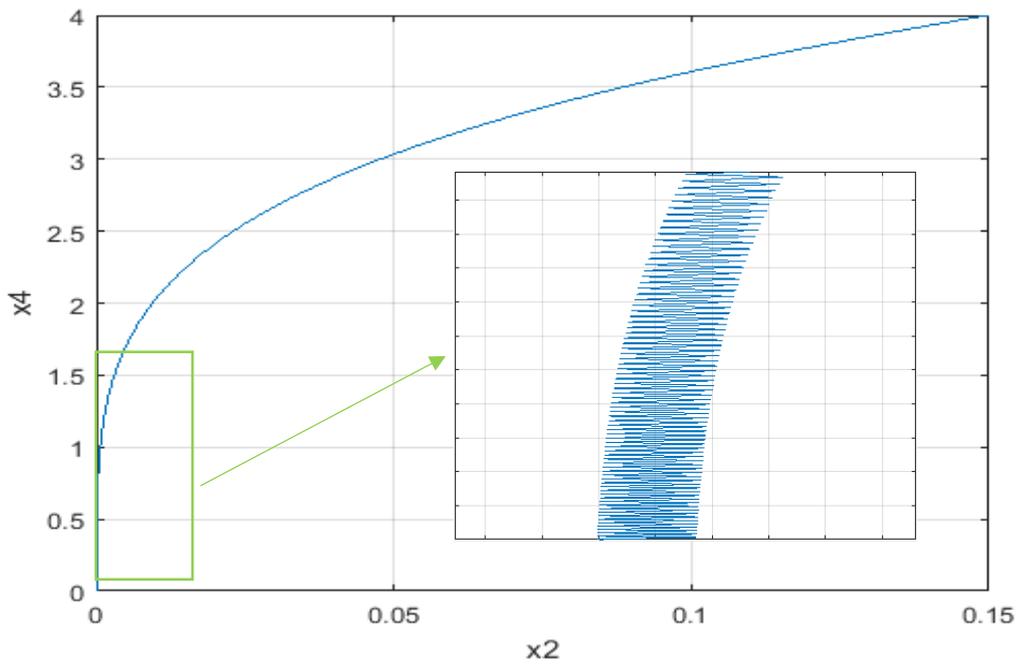


Figure III- 10: Trajectoire d'état $x_4 = f(x_2)$

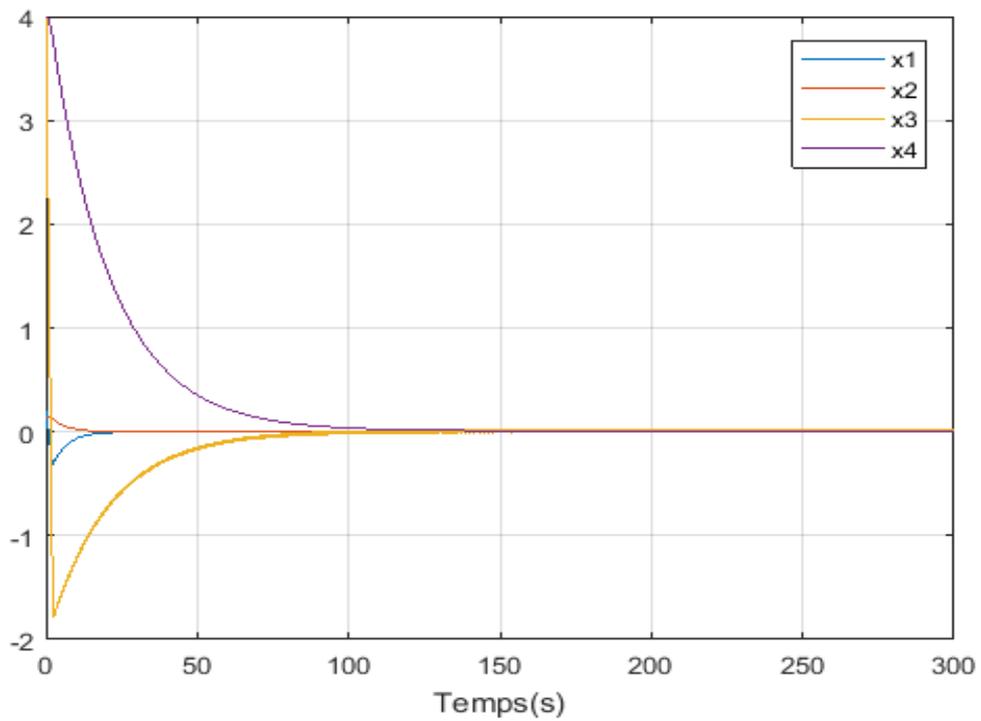


Figure III- 11: Simulation des états

III.3.10.2.2 Etude en poursuite

Les figures III.13, III.14, III.16 représentent le résultat de simulation des sorties H_2 , T_2 et de la commande par régime glissant appliquée pour aboutir aux performances désirées du système hydro-thermique qui est linéarisé autour de point de fonctionnement.

$$\begin{bmatrix} x_{10} \\ x_{20} \\ x_{30} \\ x_{40} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 1.5 \\ 40 \\ 40 \end{bmatrix}$$

On a utilisé les pôles suivant pour le calcul de F : $p = [-0.05 \quad -0.2]$.

Remarque : pour notre étude l'utilisation de $c_1 = B_1^{-1}$ nous a donné des résultats mieux que $c_1 = I$.

a- Sans perturbations

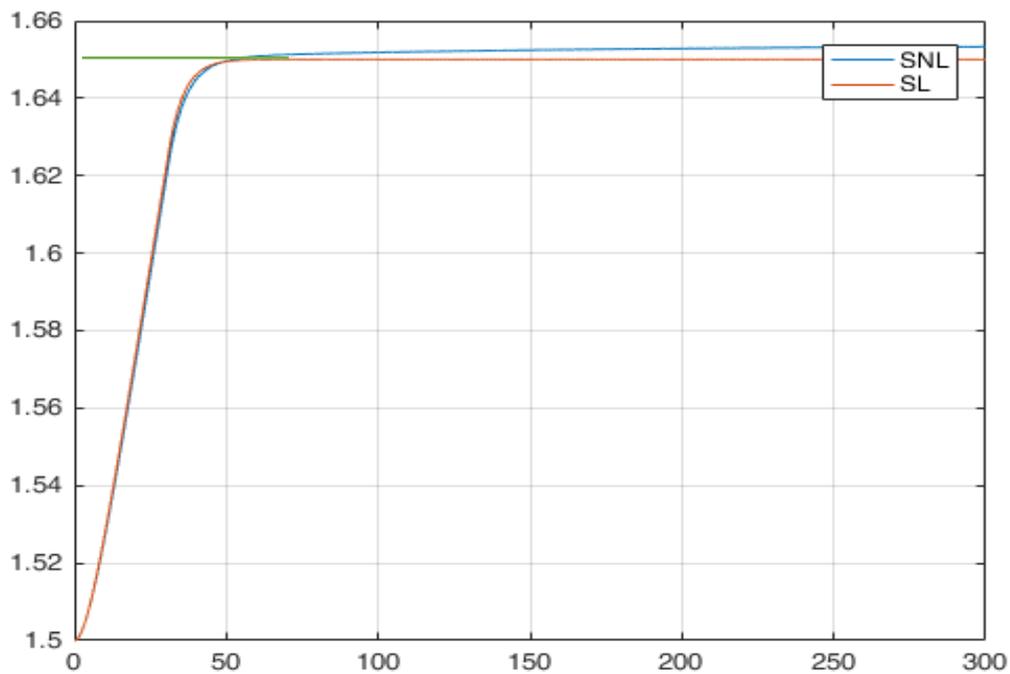


Figure III- 12: Simulation du modèle L et NL de H_2 avec correcteur sans perturbations

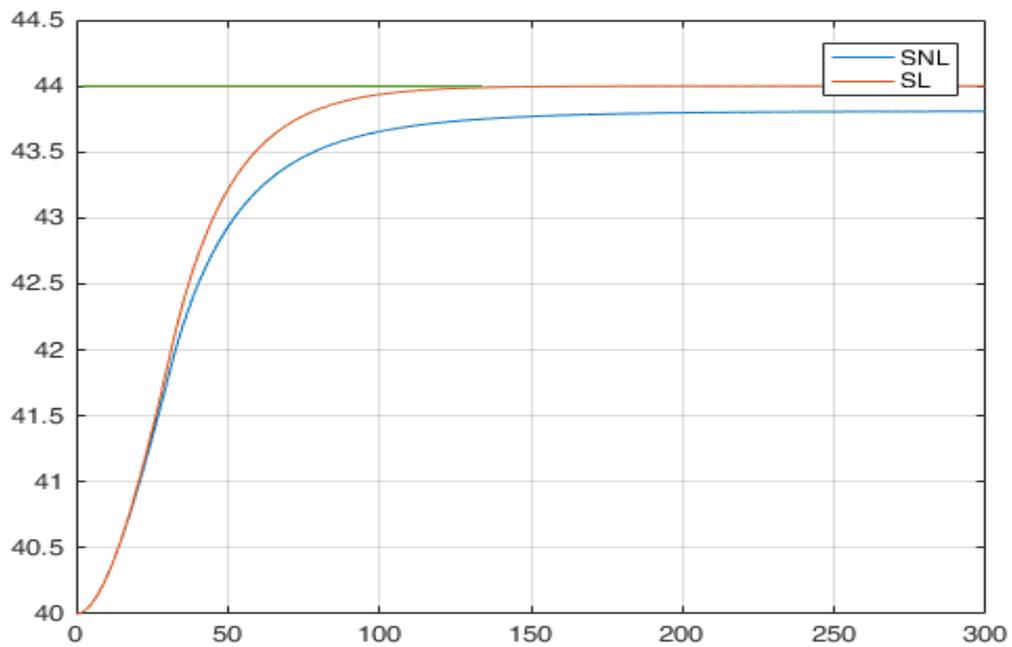


Figure III- 13: Simulation du modèle L et NL de T_2 avec correcteur sans perturbations

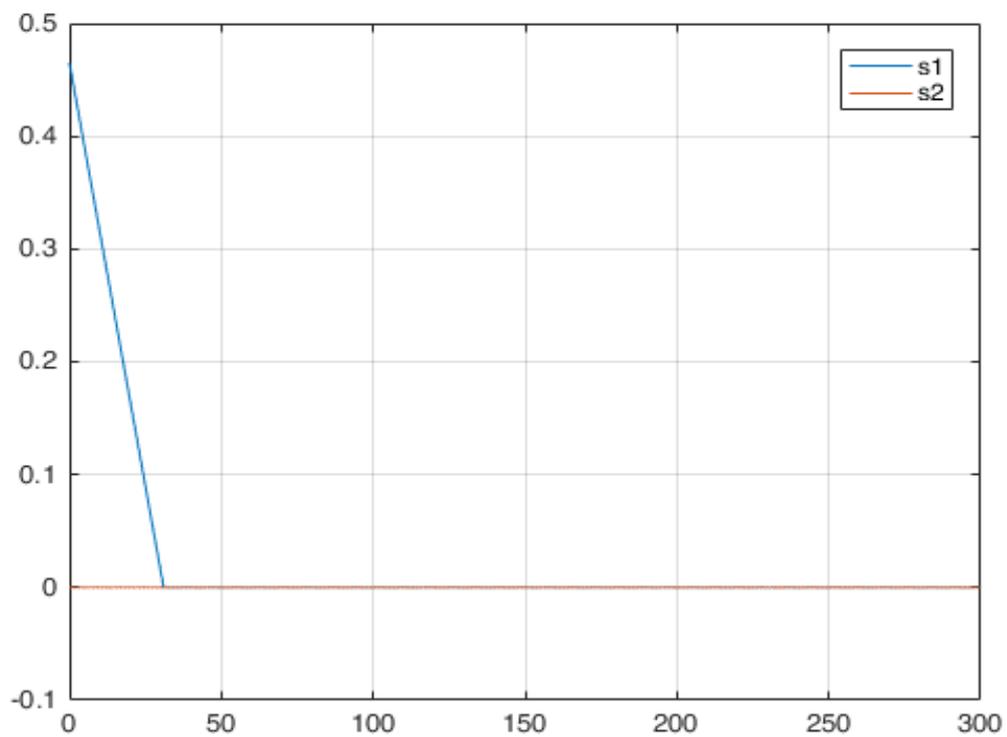


Figure III- 14: Simulation de la variation de la surface de glissement

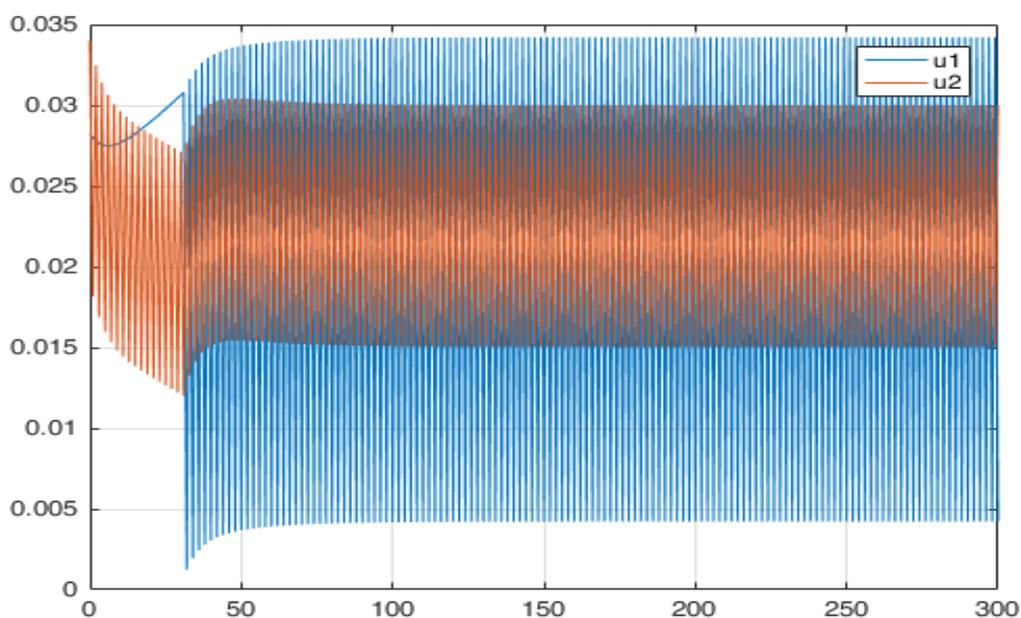


Figure III- 15: simulation de la commande u_1 et u_2 de correcteur

b- Avec perturbations

- En utilisant la commande discontinue de commutation (III.26) :

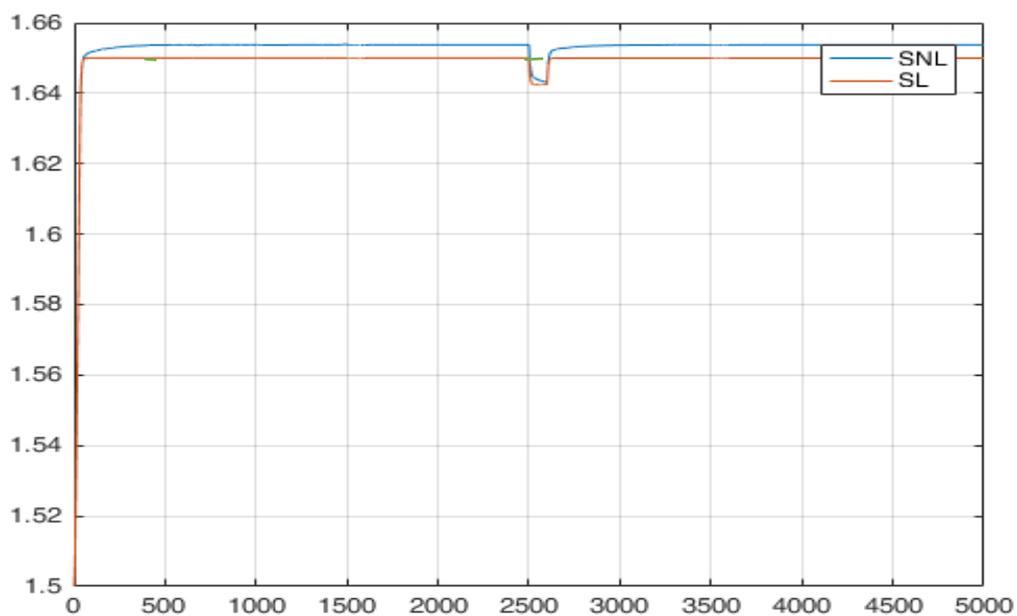


Figure III- 16: Simulation du modèle L et NL de H_2 avec correcteur avec perturbations

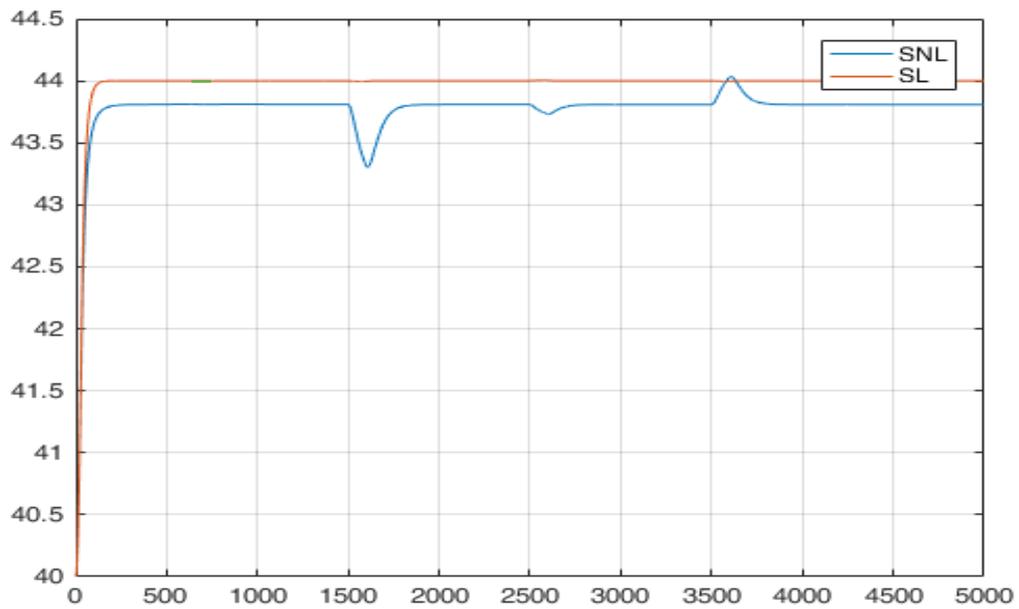


Figure III- 17:Simulation du modèle L et NL de T_2 avec correcteur avec perturbations

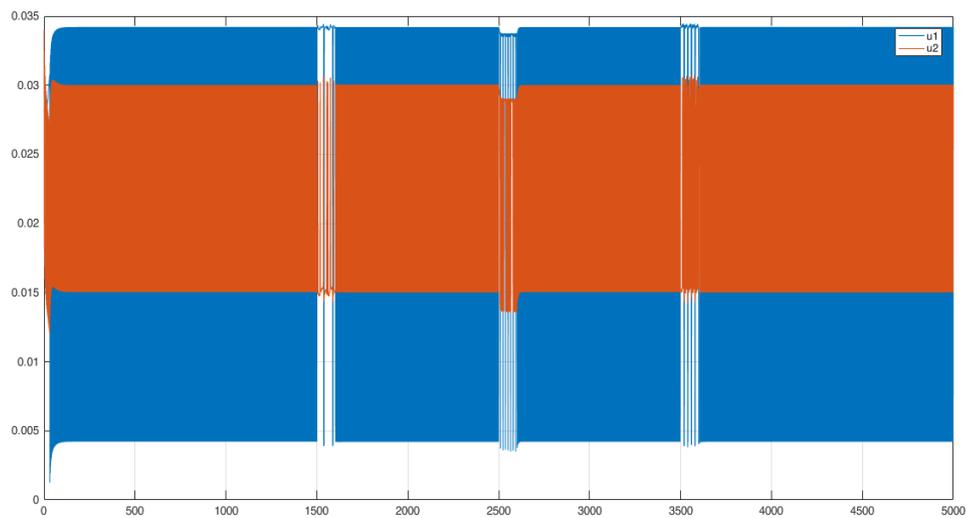


Figure III- 18:simulation de la commande discontinue de commutation u_1 et u_2 de correcteur

III.3.10.2.3 Elimination de l'effet du broutement

On veut observer l'évolution de la surface de glissement et la commande en utilisant la commande discontinue et la commande continue :

III.3.10.2.3.1 Utilisation de la commande discontinue sign :

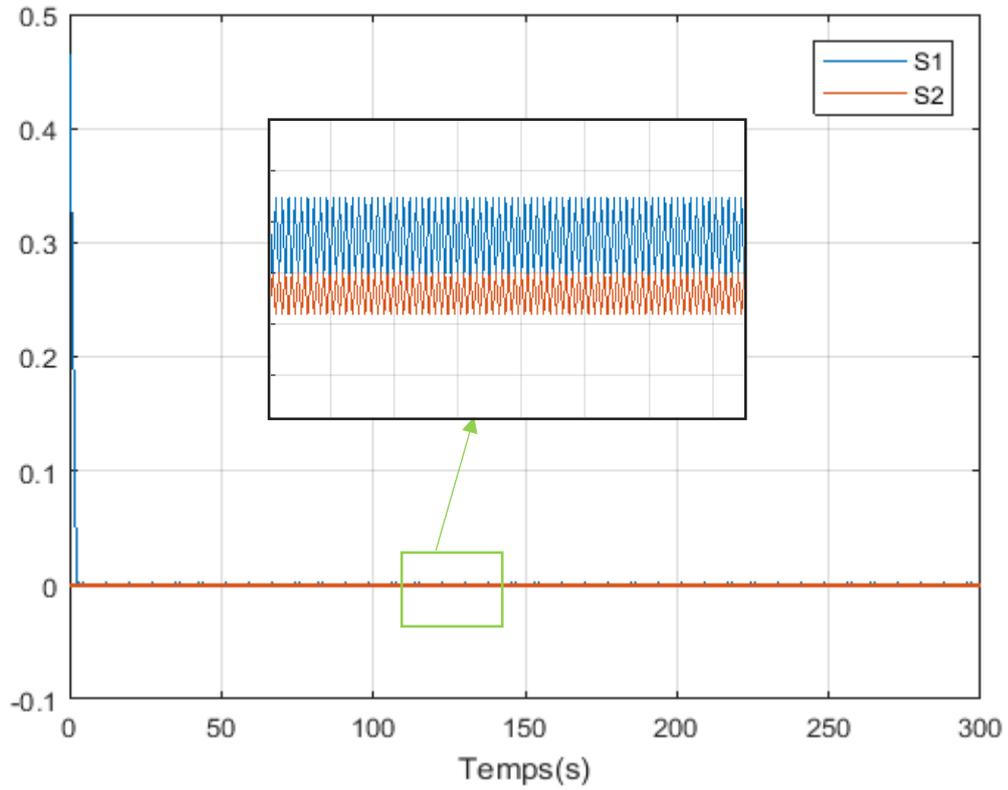


Figure III- 19: Les surfaces de glissement S_1 et S_2

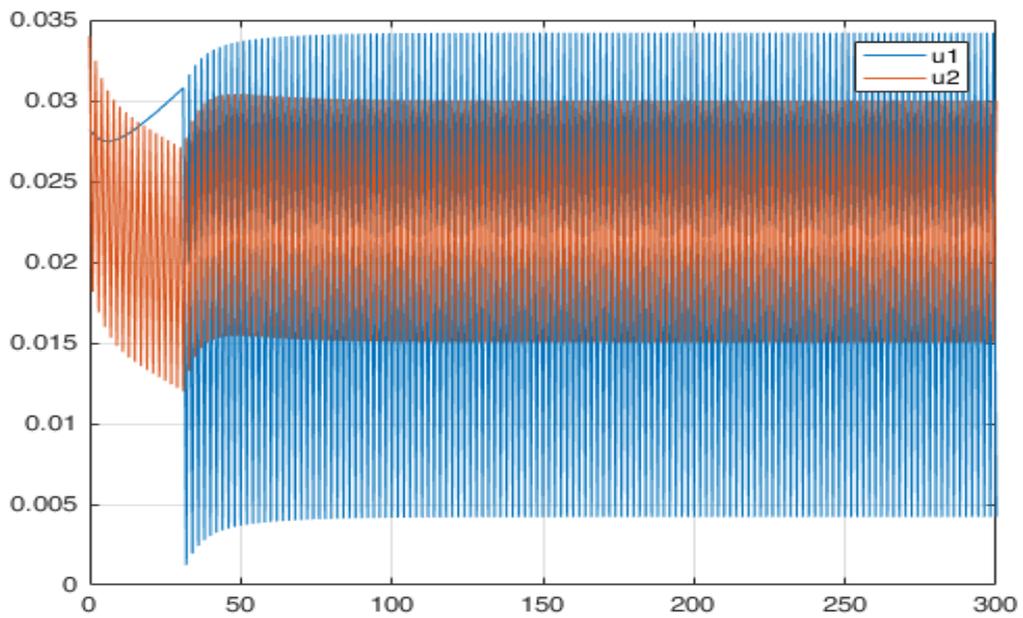


Figure III- 20: simulation de la commande u_1 et u_2 de correcteur

III.3.10.2.3.2 Utilisation de la commande continue smooth :

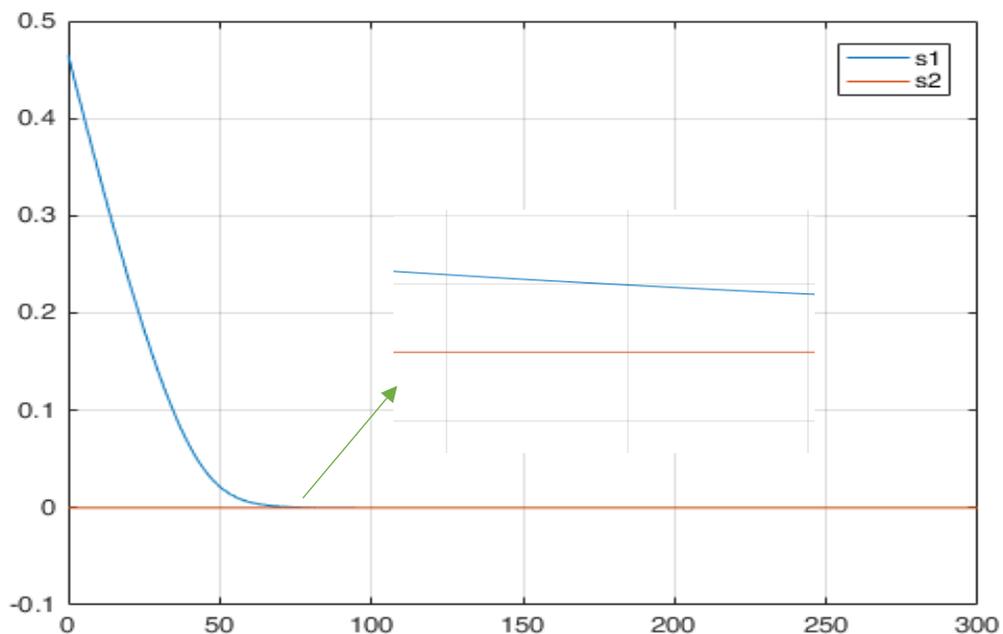


Figure III- 21: Les surfaces de glissement S_1 et S_2

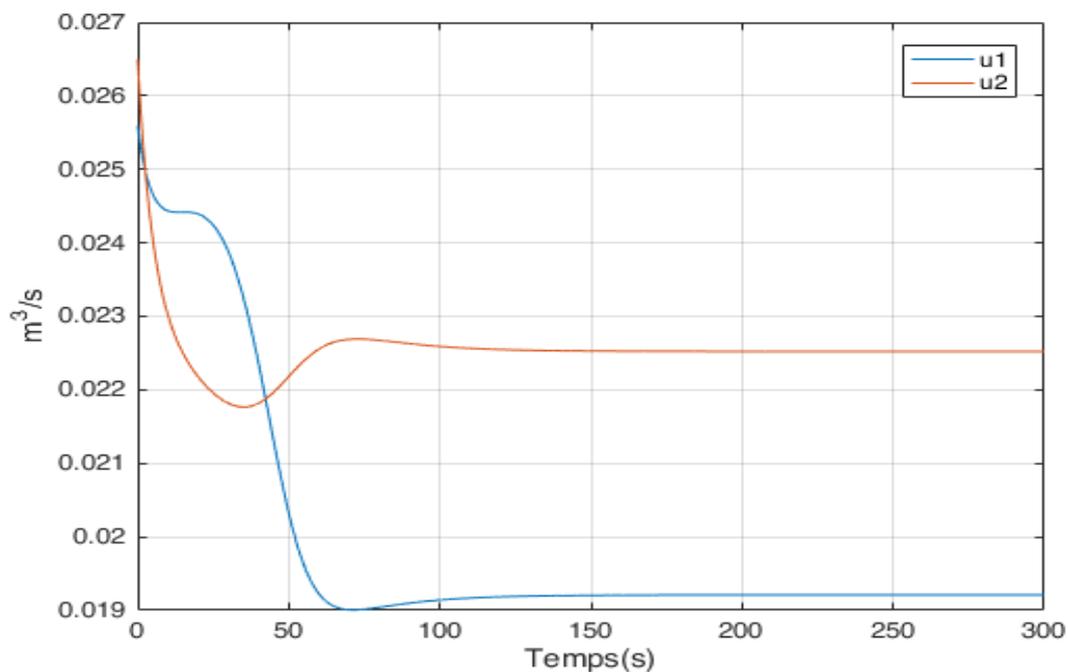


Figure III- 22: simulation de la commande u_1 et u_2 de correcteur

On remarque l'élimination du phénomène de broutement

Dans les figures III-23, III-24 on visualise les graphes des sorties et dans la figure III-25 on visualise la commande en utilisant la continue Smooth (III.40) :

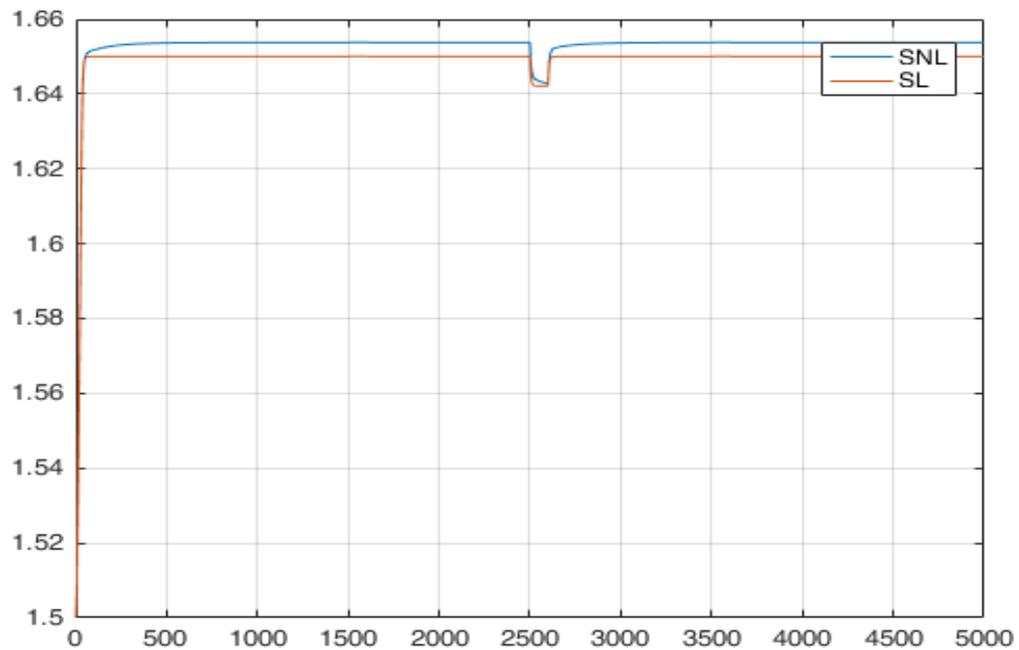


Figure III- 23 : Simulation du modèle L et NL de H_2 avec correcteur avec perturbations

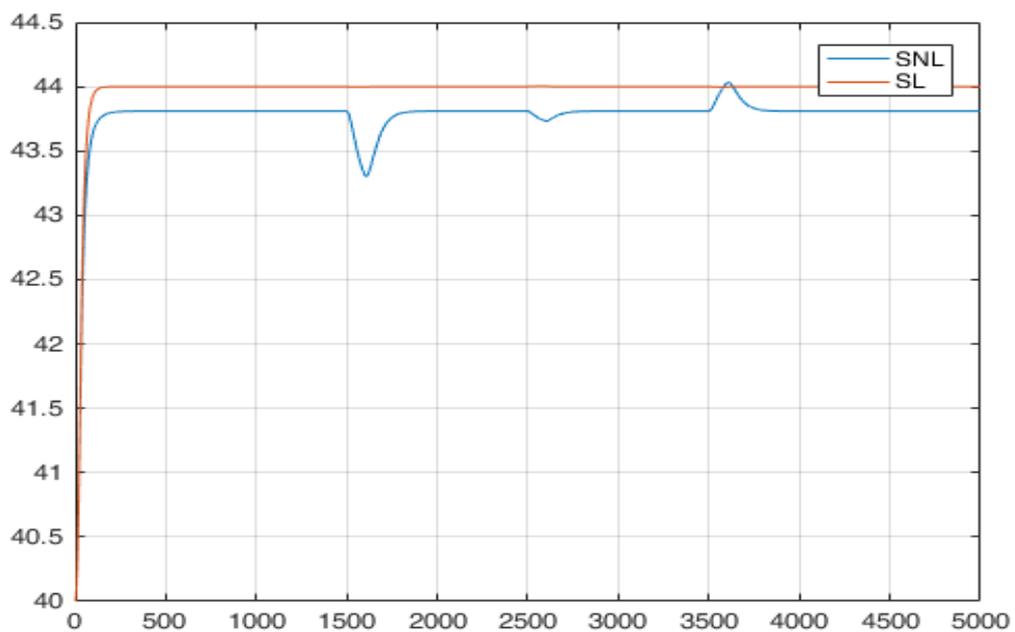


Figure III- 24: Simulation du modèle L et NL de T_2 avec correcteur avec perturbations

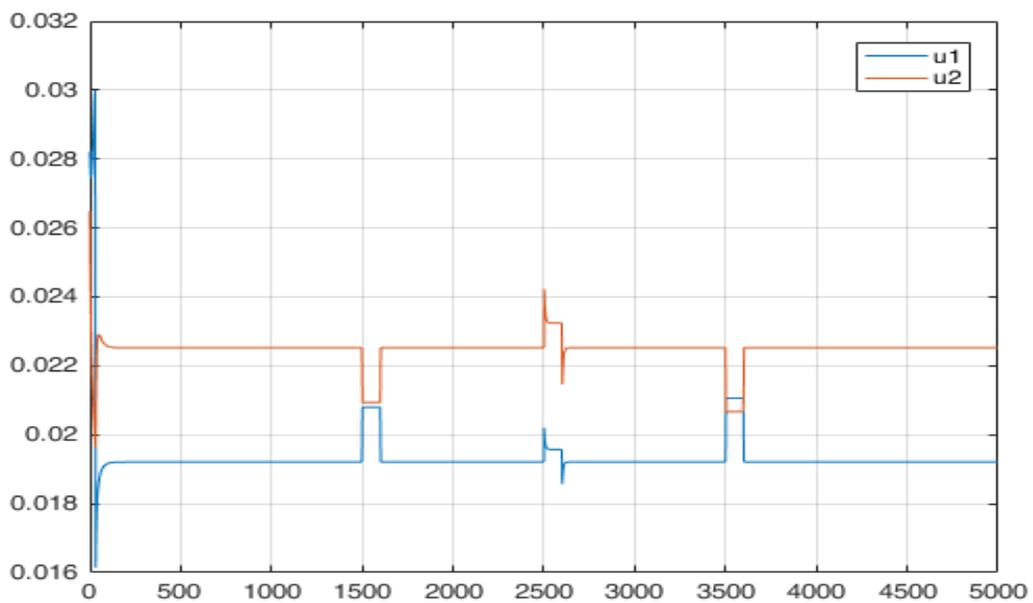


Figure III- 25: simulation de la commande continue Smooth u_1 et u_2 de correcteur

III.3.10.2.3.3 Utilisation de la commande continue th

Dans les figures III-26, III-27 on visualise les graphes des sorties et dans la figure III-28 on visualise la commande en utilisant la commande continue th (III.41)

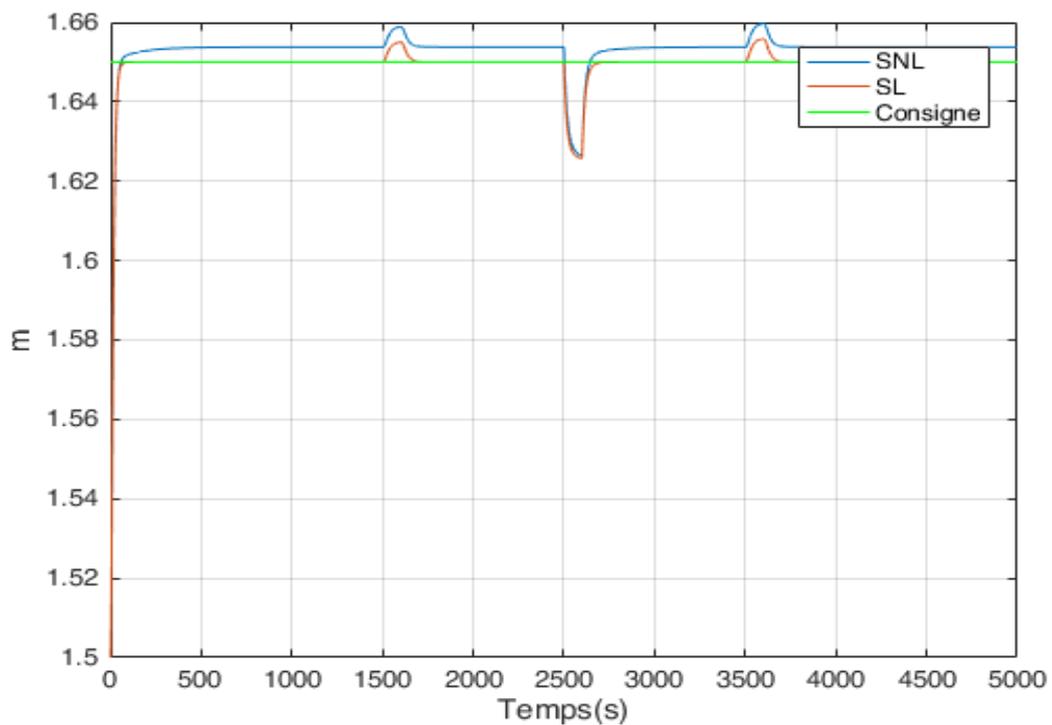


Figure III- 26 : Simulation du modèle L et NL de H_2 avec correcteur avec perturbations

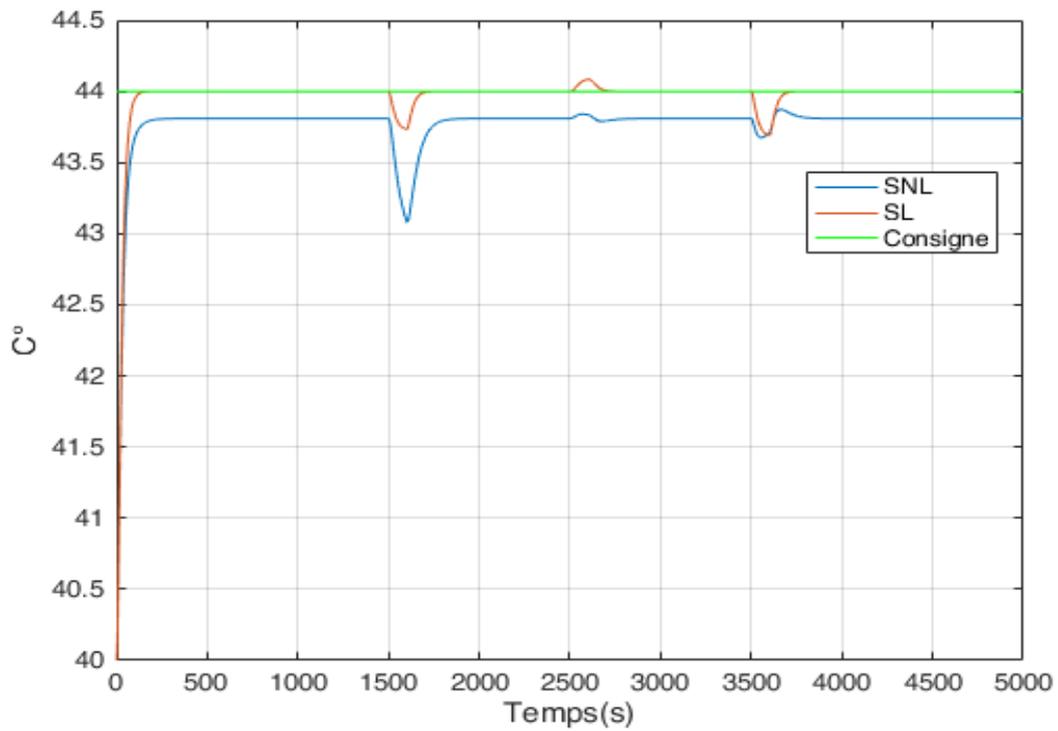


Figure III- 27: Simulation du modèle L et NL de T_2 avec correcteur avec perturbations

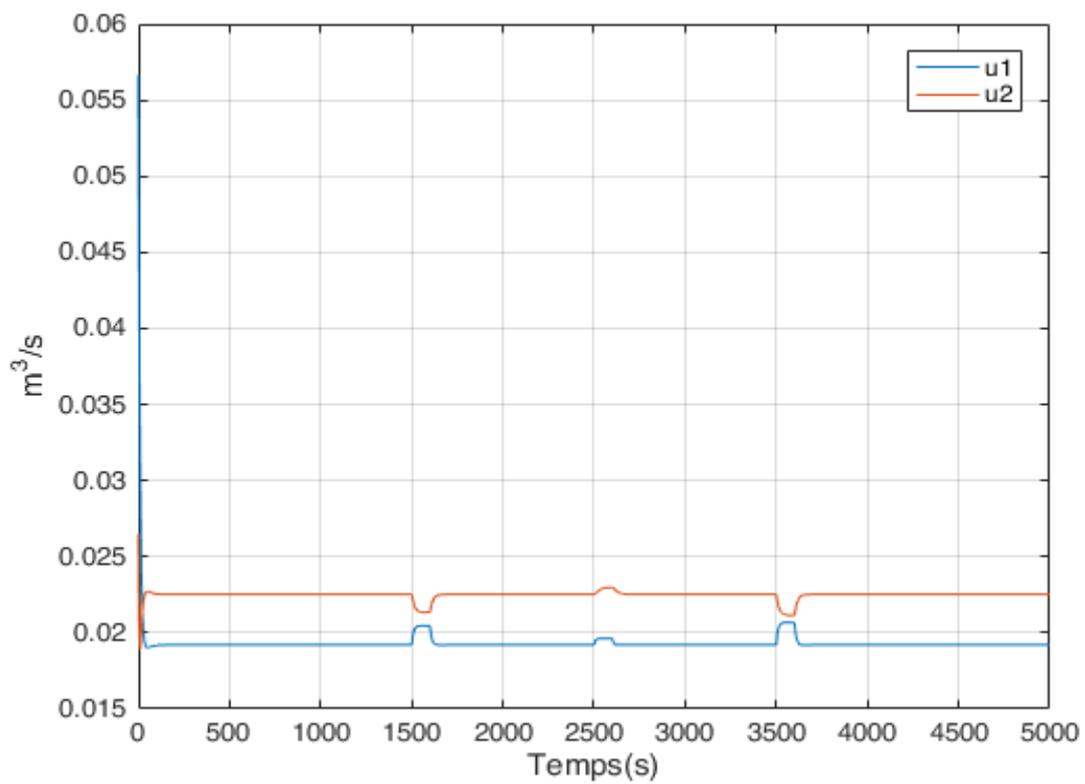


Figure III- 28: Simulation de la commande continue intégrale u_1 et u_2 de correcteur

- Utilisation du bloc de saturation quand la commande dépasse les borniers du débit $[0, 0.04] m^3/s$.

III.3.10.2.3.4 Utilisation de bloc de saturation

a- Les résultats avant l'utilisation du bloc de saturation :

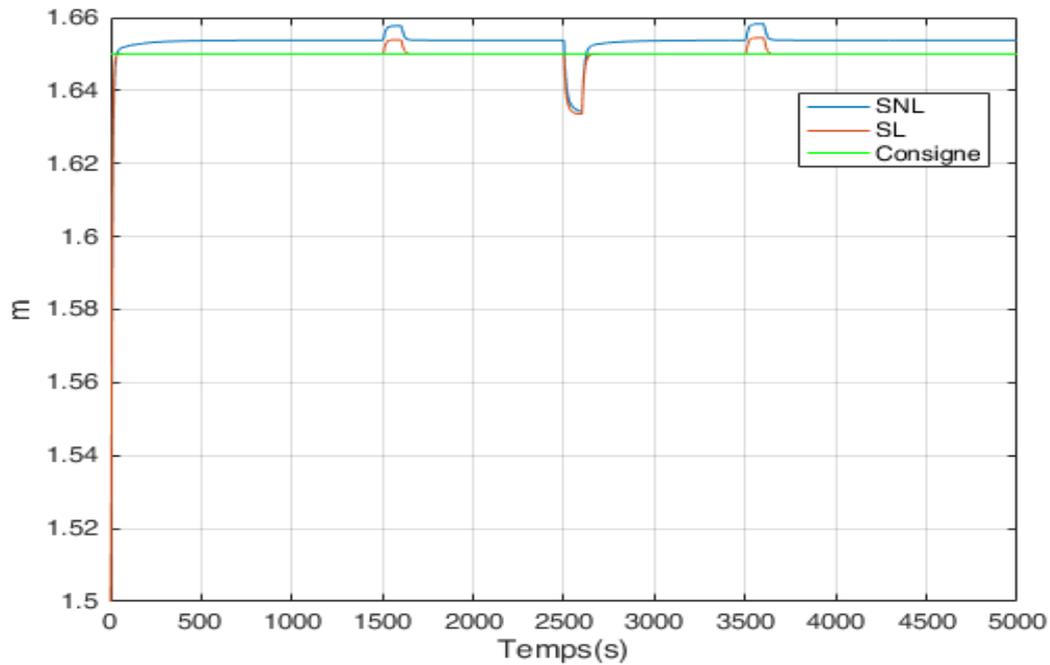


Figure III- 29: Simulation du modèle L et NL de H_2 avec correcteur avec perturbations avant saturation

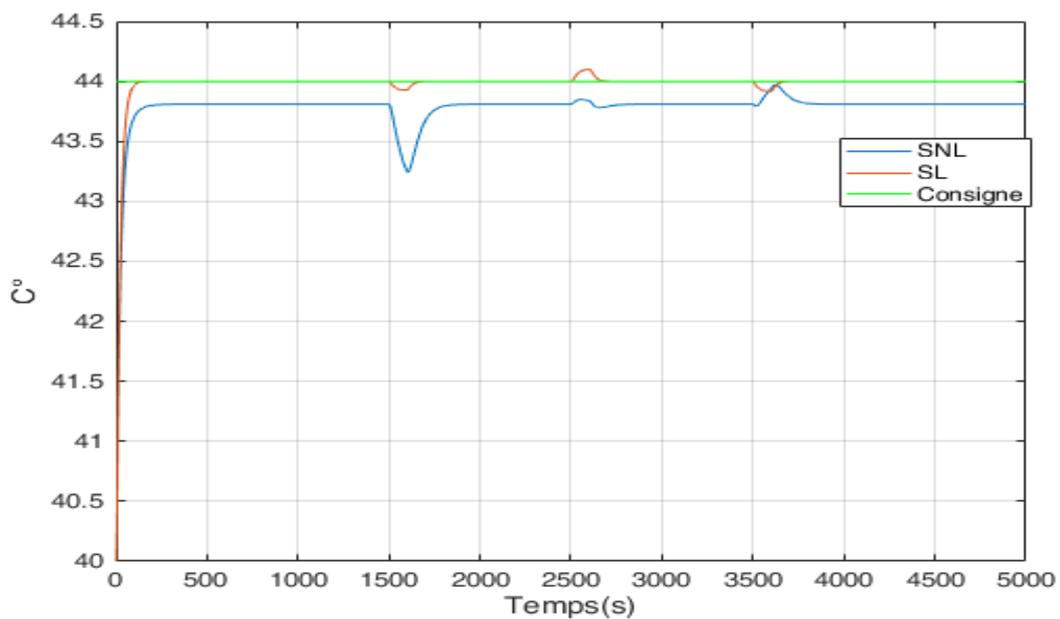


Figure III- 30: Simulation du modèle L et NL de T_2 avec correcteur avec perturbations avant saturation

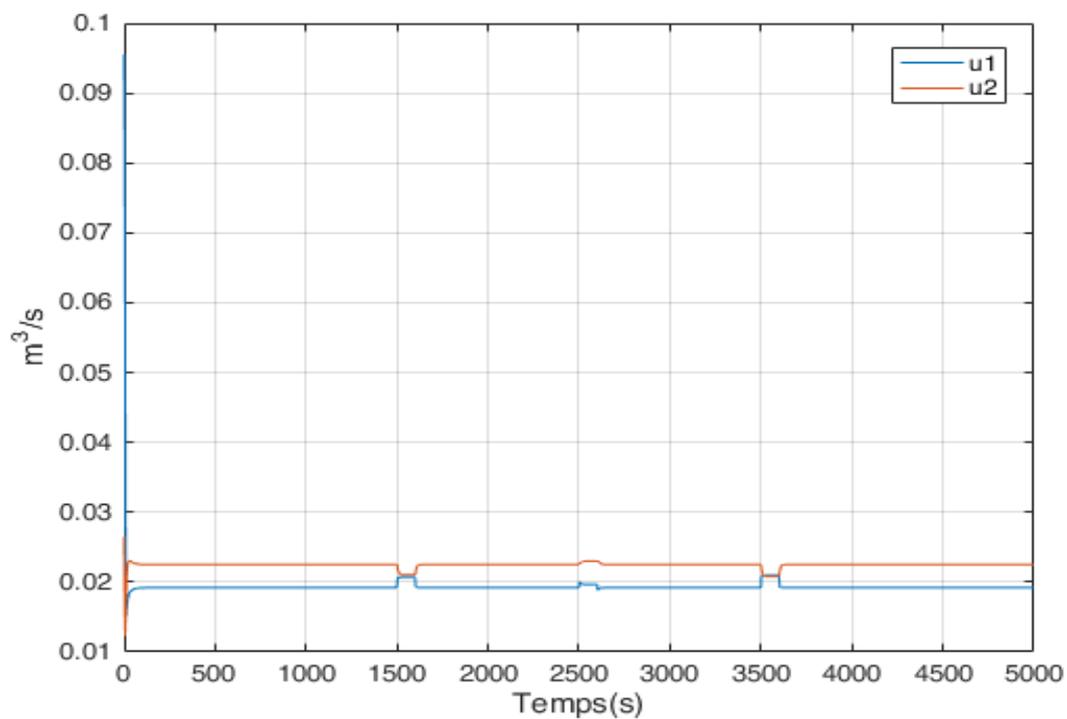


Figure III- 31 : Simulation de la commande u_1 et u_2 avant saturation

b- Les résultats après l'utilisation du bloc de saturation :

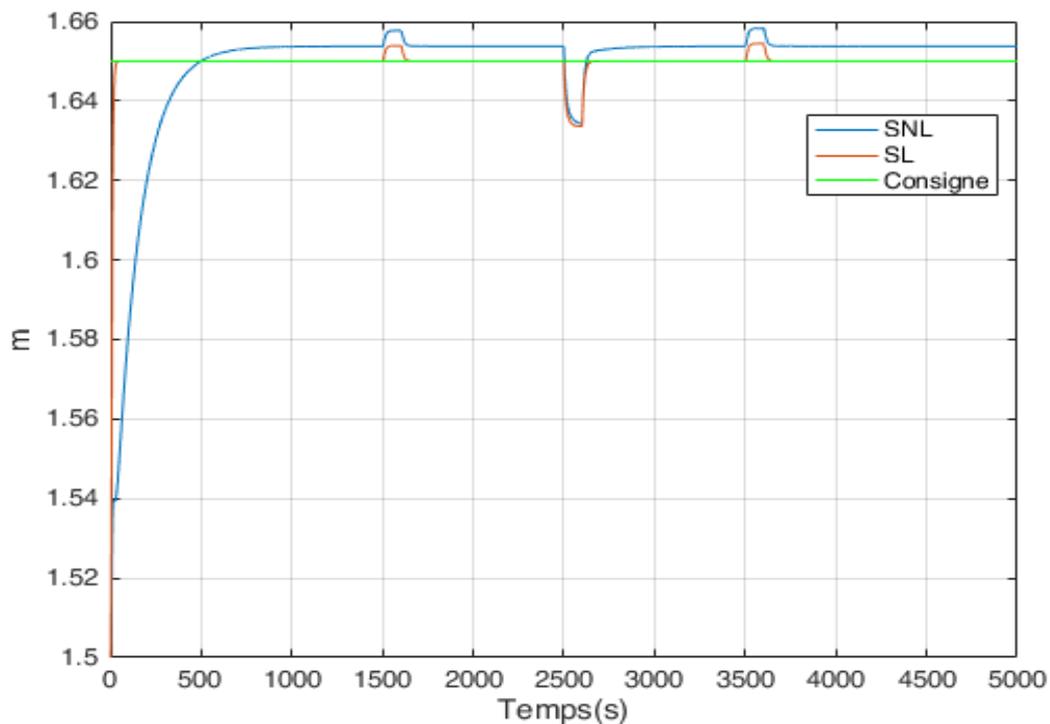


Figure III- 32: Simulation du modèle L et NL de H_2 avec correcteur avec perturbations après saturation

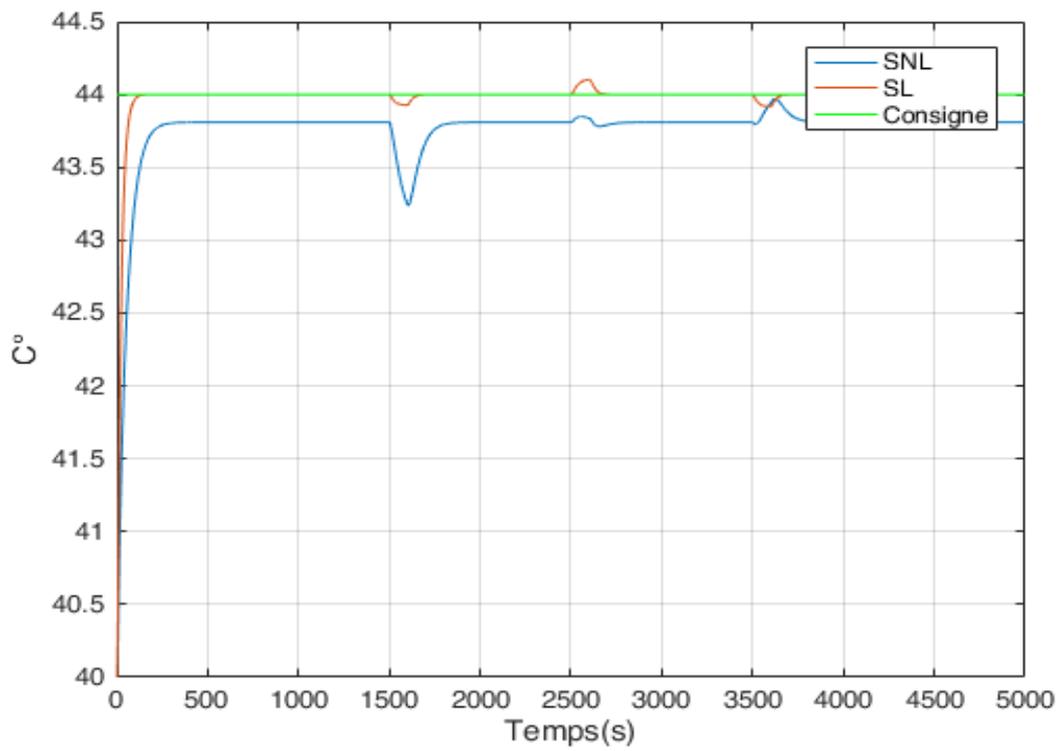


Figure III- 33: Simulation du modèle L et NL de T_2 avec correcteur avec perturbations après saturation

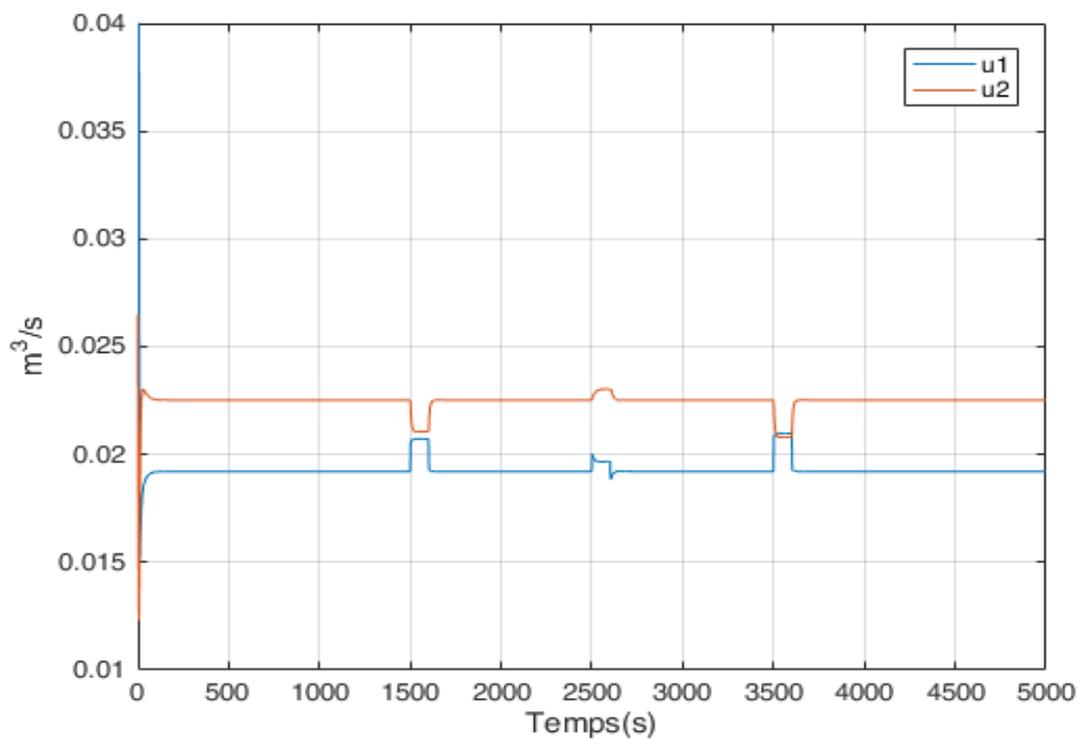


Figure III- 34: Simulation de la commande u_1 et u_2 après saturation

III.3.10.3 Interprétation des résultats

- **Comparaison entre le temps de réponse en utilisant la Commande discontinue commutation (fonction sign) et avant l'utilisation du correcteur**

Les résultats obtenus lors de l'implémentation de cette commande qui est calculer par la commande de poursuite montrent la dynamique du système qui a été changé ainsi que les performances du système qui ont été améliorer significativement.

Les sorties	Temps de repense (s)	
	Système linéaire en Boucle ouverte	Système linéaire après régulation (en BF)
$H_2(m)$	460s	40.9s
$T_2(C^\circ)$	164s	91s

Tableau III-1 : Temps de réponse du modèle non linéaire avant et après correction

On remarque une diminution importante du temps de réponse en boucle fermée par rapport à la boucle ouverte prouve l'efficacité du correcteur. En effet, il améliore la rapidité système.

Aussi on note que les commandes n'atteignent pas le seuil de saturation des pompes de commande ($0.04 m^3 /s$).

- **Etude de l'effets des perturbations Par la Commande discontinue commutation (fonction sign) :**

		Effet des perturbations (%)			
		Avant correction		Après correction	
		NL	L	NL	L
$H_2(m)$	dv_1	48.57	47.37	7.14	5.33
	dv_2	0	0	0	0
	dv_3	0	0	0	0
$T_2(C^\circ)$	dv_1	0	0	0	0
	dv_2	31.91	22.37	13.38	0
	dv_3	21.27	26.10	5.77	0

Tableau III-2: Effet des perturbations sur le modèle linéaire et non linéaire avant et après la correction.

On remarque l'effet de perturbation est devenue très petit après la correction par rapport qu'avant la correction pour le niveau dans le modèle non linéaire et linéaire, et pour l'effet des perturbations sur la température tend vers 0 pour le modèle linéaire et il est devenu petit pour le modèle non linéaire.

- **Etude de l'effets des perturbations Par la Commande continue : forme Smouth**

		Effet des perturbations (%)			
		Avant correction		Après correction	
		NL	L	NL	L
$H_2(m)$	dv_1	48.57	47.37	7.3	5.33
	dv_2	0	0	0	0
	dv_3	0	0	0	0
$T_2(C^\circ)$	dv_1	0	0	0	0
	dv_2	31.91	22.37	13.38	0
	dv_3	21.27	26.10	5.77	0

Tableau III-3: Effet des perturbations sur le modèle linéaire et non linéaire avant et après la correction en utilisant la forme Smouth.

On remarque qu'on a obtenu les mêmes résultats de la commande discontinue de commutation soit pour l'effets des perturbations ou pour le temps de repense mais on a éliminé le Chattering pour avoir une commande lisse acceptable et réalisable.

- **Etude de l'effets des perturbations par la commande continue : forme th**

		Effet des perturbations (%)			
		Avant correction		Après correction	
		NL	L	NL	L
$H_2(m)$	dv_1	48.57	47.37	10.1	9.3
	dv_2	0	0	0	0
	dv_3	0	0	0	0
$T_2(C^\circ)$	dv_1	0	0	0	0
	dv_2	31.91	22.37	15.3	0
	dv_3	21.27	26.10	8.7	0

Tableau III-4 : Effet des perturbations sur le modèle linéaire et non linéaire avant et après la correction en utilisant la forme th

On remarque qu'on a eu un effet de perturbation moins qu'avant correction mais plus que l'effet obtenu par forme Smouth.

Donc on constate que la commande Smouth est la meilleure pour notre cas.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la commande du process hydrothermique par la méthode de commande en mode glissant. Du moment que les résultats de poursuite de trajectoire sont bons lors des simulations malgré les perturbations imposées, on conclut que la commande est fiable et robuste.

De plus, la réduction de l'ordre du système constitue un autre point fort de ce type de commande, car elle permet de simplifier la complexité du système.

Un phénomène de broutement provoqué par la partie discontinue de cette commande et qui peut avoir un effet néfaste sur les actionneurs donc on a ajouté la commande continue la forme Smooth pour éliminer le phénomène de broutement et on a trouvé que cette forme a donné des résultats mieux que la forme th ; et le résultat et là, on y est parvenu.

Chapitre IV :

Synthèse de l'observateur

IV.1 Introduction

L'observabilité d'un processus est un concept très important en automatique. En effet, pour reconstruire l'état et la sortie d'un système, il faut savoir, a priori, si les variables d'état sont observables ou non.

En générale, la dimension du vecteur des sorties est inférieure à celle de l'état, que ce soit pour des considérations technique (de matériel et de réalisabilité), de fiabilité (panne des éléments de mesure) ou encore économique (cout des capteurs), nous ne pouvant pas déduire l'état directement à partir des mesures.

A ce propos nous cherchons à construire un système dynamique qui va nous fournir une estimation de cet état. En tenant compte du fait que les seules grandeurs accessibles du système sont les variables d'entrées et de sorties, le problème d'observation ou d'estimation de l'état se définit comme la construction d'un système dynamique auxiliaire qui a pour entrées les sorties et les sorties estimées du système et pour sorties l'estimation des états ; de tels systèmes auxiliaires sont appelés reconSTRUCTEURS d'état ou observateurs.

Dans ce chapitre nous allons tout d'abord construire l'observateur à la base du modèle linéaire, ensuite associer cet observateur à notre système pour étudier les résultats et les comparé avec les résultats précédents.

IV.2 Définition

Un observateur est un développement mathématique qui permet de reconstituer les états internes d'un système à partir uniquement des données accessibles, c'est-à-dire, des entrées imposées et des sorties mesurées

L'observation se fait en deux parties : la première est une étape d'estimation et la seconde est une étape de correction. L'estimation se fait par le calcul des grandeurs d'état à l'aide de modèle proche du système (modèle mathématique du système). Ensuite, la correction se fait par l'addition ou la soustraction de la différence entre les états estimés et ceux mesurés (erreur d'estimation) que l'on multiplie par un gain G .

Ce gain régit la dynamique et la robustesse de l'observateur. Donc, son choix est important et doit être adapté aux propriétés et dynamiques du système dont on veut effectuer l'observation des états suivant la nature du modèle du système, nous rencontrons deux types d'observateurs : linéaires et non-linéaires.

D'autre part, et suivant la technique utilisée, nous distinguons des observateurs déterministes et stochastiques. Dans la suite, nous allons brièvement présenter les différentes catégories d'observateurs tout en citant les observateurs les plus utilisés[22].

IV.3 Types d'observateurs

IV.3.1 Observateurs non linéaires

Les systèmes peuvent être non-linéaires (Dans ce cas, des Observateurs non-linéaires ont été développés pour pallier cette difficulté. Nous pouvons citer à titre d'exemple : les observateurs de types modes glissants et les observateurs à grand gain.

La figure IV-1 montre le schéma de principe d'un observateur non-linéaire. Il est à noter que chaque type d'observateurs non-linéaires est caractérisé par un raisonnement distinct.

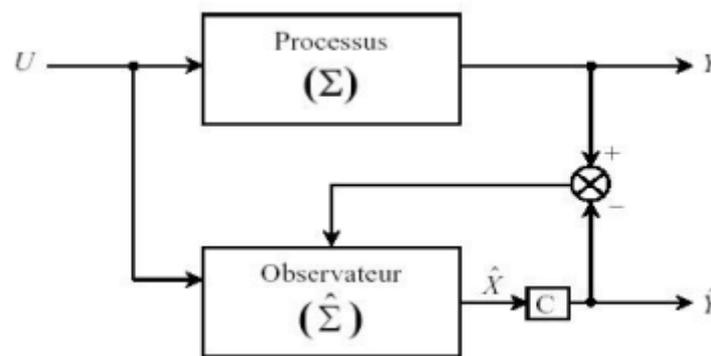


Figure IV-1: Schéma fonctionnel d'un observateur non linéaire.

Les deux équations, du processus et de l'observateur, sont données par :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = Cx \end{cases} \quad (\text{IV. 1})$$

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = \hat{f}(\hat{x}, y, u) + G(y).H(y - \hat{y}) \\ \hat{Y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (\text{IV. 2})$$

H : est une fonction (linéaire ou non-linéaire) de l'erreur $(y - \hat{y})$.

G : est une matrice de gains (peut être constante ou dépendante de Y).

IV.3.2 Observateurs linéaires

La structure d'un observateur linéaire peut être présentée selon la figure IV-2. Elle comprend un estimateur fonctionnant en boucle ouverte, décrit par l'équation caractéristique du système à observer avec la matrice dynamique A (c'est-à-dire, qu'il est caractérisé par la

même dynamique que celle du système). L'introduction de la boucle de correction agissant sur l'erreur d'observation $\Delta Y = Y - \hat{Y}$ permet d'imposer à l'observateur sa dynamique propre. Ainsi, en choisissant de façon judicieuse les gains de la matrice G , on peut modifier la vitesse de convergence de Y vers zéro.

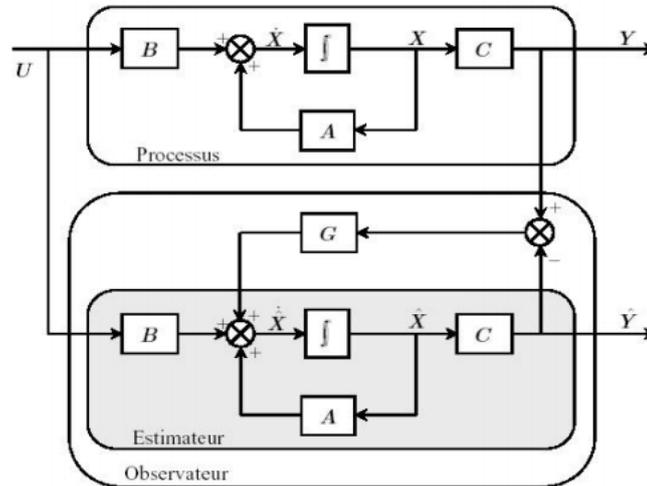


Figure IV-2 : Schéma fonctionnel d'un observateur linéaire.

L'équation de l'observateur ci-dessus peut être exprimée par :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + G \Delta Y \\ \hat{Y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (\text{IV. 3})$$

En remplaçant l'erreur d'observation ΔY , qui intervient dans (IV.3), par $(Y - \hat{Y})$, en aura :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A_0\hat{x} + Bu + GY \\ \hat{Y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (\text{IV. 4})$$

Avec : $A_0 = A - G.C$

Donc, la dynamique de l'observateur est gouvernée par la matrice d'état A_0 qui dépend de la matrice de gain G .

IV.3.2.1 Observateur de Luenberger

L'observateur de Luenberger est l'un des observateurs connus. Il permet de reconstruire l'état du système observable lorsque tout ou partie du vecteur d'état ne peut être mesuré, comme il peut estimer les paramètres variables ou inconnus d'un système, c'est le

cas d'un observateur étendu. Une représentation de l'observateur de Luenberger peut s'exprimer dans la figure IV-3.

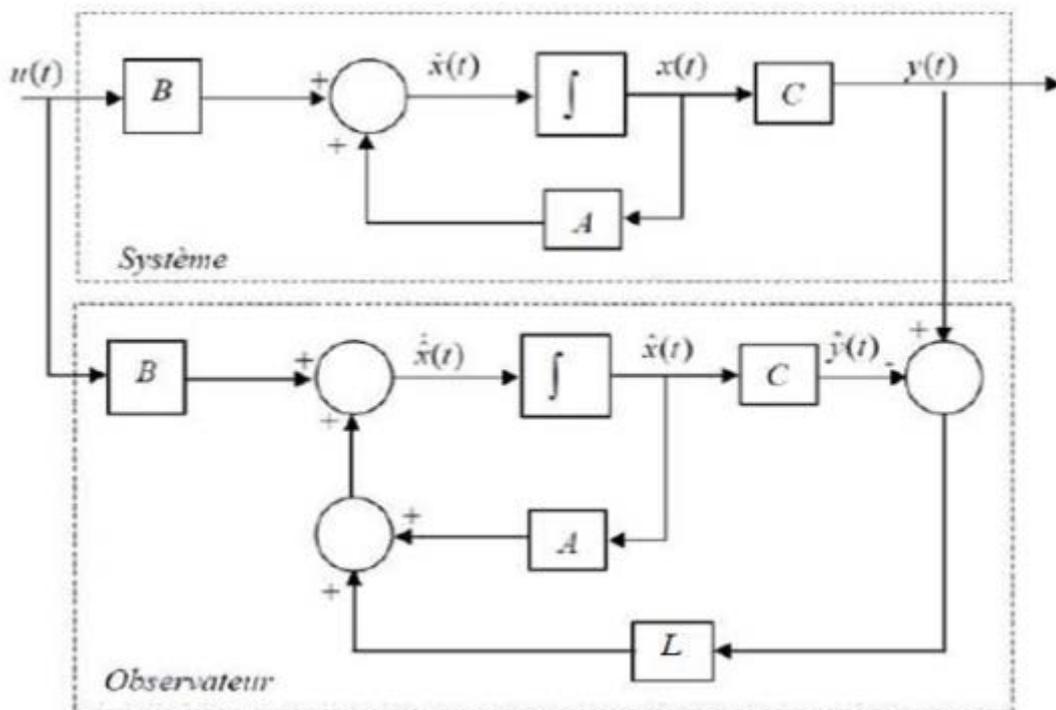


Figure IV-3: Schéma structural de l'observateur de Luenberger.

La reconstruction de l'état se fait par le système dynamique suivant :

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(Y - \hat{Y}) \quad (\text{IV. 5})$$

$$\hat{Y} = C\hat{x} \quad (\text{IV. 6})$$

En substituant l'équation (IV.5) dans (IV.6), conduit à :

$$\dot{\hat{x}} = (A - L.C).\hat{x} + L.y \quad (\text{IV. 7})$$

Le gain de la boucle de retour est représenté par une matrice des gains, notée L, le dimensionnement de cette matrice est effectué de tel sorte à assurer la convergence le plus rapidement possible entre le modèle ou l'estimateur et le système réel [23].

Le vecteur de sortie y est comparé au vecteur équivalent \hat{y} , donné par l'observateur, pour assurer le fonctionnement en boucle fermée [23].

Théorème :

Les valeurs propres de la matrice Hurwitz $(A - L.C)$ (c'est-à-dire que ces valeurs propres soient à parties réelles négatives) peuvent être fixées arbitrairement si et seulement si la paire (A, C) est observable [23].

IV.3.2.1.1 Calcul du gain de l'approche modale

L'approche modale consiste à choisir à priori les valeurs de $(A - L.C)$ puis en déduire la matrice L . On travaille avec la méthode de placement des pôles pour trouver la matrice L du gain d'observateur.

Le logiciel MATLAB nous a permis de vérifier l'observabilité du système par l'utilisation de commande « *obsv* ».

On trouve la matrice d'observabilité O_b puis on exécute la commande « *rank* » qui nous donne le rang de la matrice O_b : Le résultat obtenu est $\text{rang}(O_b) = 4$ qui est l'ordre du système étudié alors notre système est observable.

On prend ces pôles-là pour notre observateur :

$$P = [-0.06 \ -0.1 \ -0.1 \ -0.12]$$

On a choisi les pôles plus petits celle de la matrice A pour avoir une dynamique plus rapide.

En utilisant la fonction MATLAB « *place* » on obtient la matrice des gains K_{ob} :

$$K_{ob} = \begin{bmatrix} 0.1182 & 0.1018 & 0.0062 & 0.0028 \\ 0.0020 & 0.0020 & 0.0770 & 0.1010 \end{bmatrix}$$

Finalement, la matrice des gains de l'observateur est simplement la transposée de la matrice K_{ob} :

$$L = K_{ob}^T = \begin{bmatrix} 0.1182 & 0.0020 \\ 0.1018 & 0.0020 \\ 0.0062 & 0.0770 \\ 0.0028 & 0.1010 \end{bmatrix}$$

IV.4 Schéma bloc de l'observateur des états du système hydro-thermique

IV.4.1 Validation de l'observateur

La figure IV-4 représente une simulation en boucle ouverte du modèle linéaire et de l'observateur, ce qui nous a permis de valider l'observateur choisis et sa matrice des gains L , où les débits d'entrées sont soumis à des variations.

Pour montrer la convergence de l'erreur d'estimation, nous avons effectuées un changement des conditions initiales par rapport au modèle linéaire.

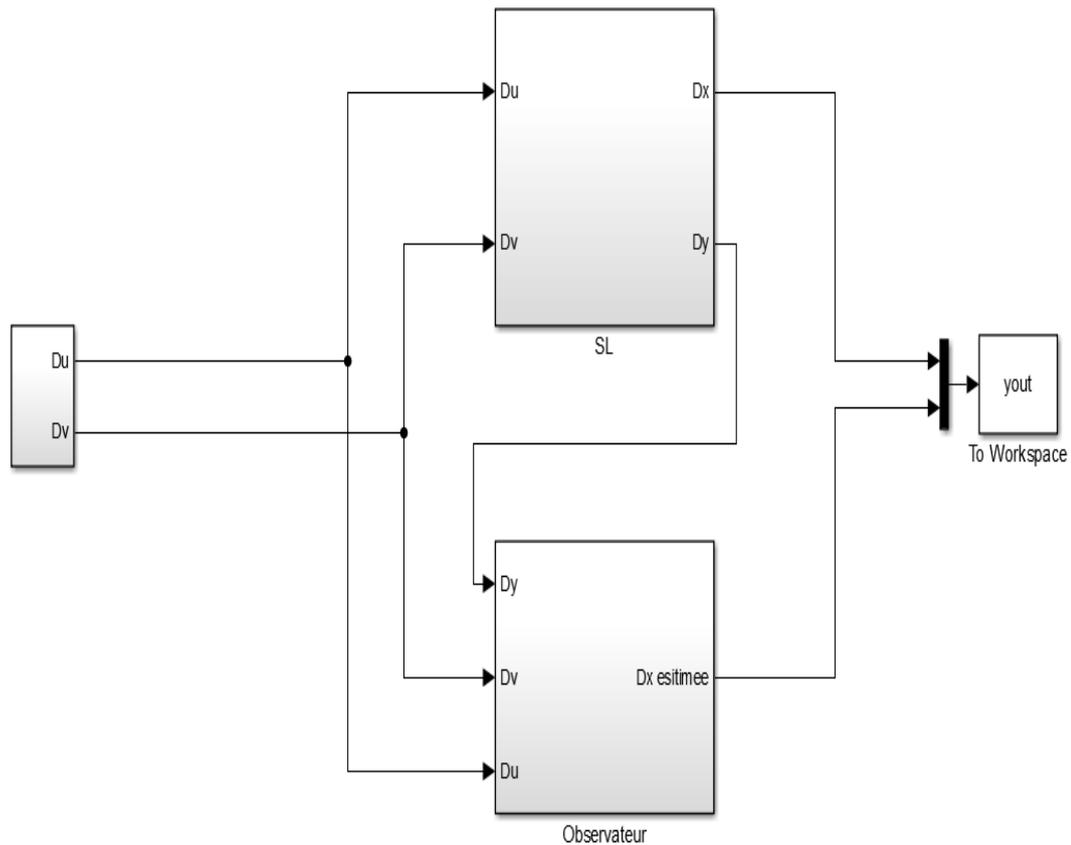


Figure IV-4: Bloc de simulation d'un observateur linéaire et d'un modèle linéaire en boucle ouvert

IV.4.2 Résultats de simulations

Afin de tester l'observateur proposé pour ce système, on compare les états réels du système et les états estimés dans les figures IV-5, IV-6, IV-7 et IV-8, en prenant les conditions initiales pour l'observateur $\hat{x}_0 = [0.02 \ 0.015 \ 4 \ 4]$.

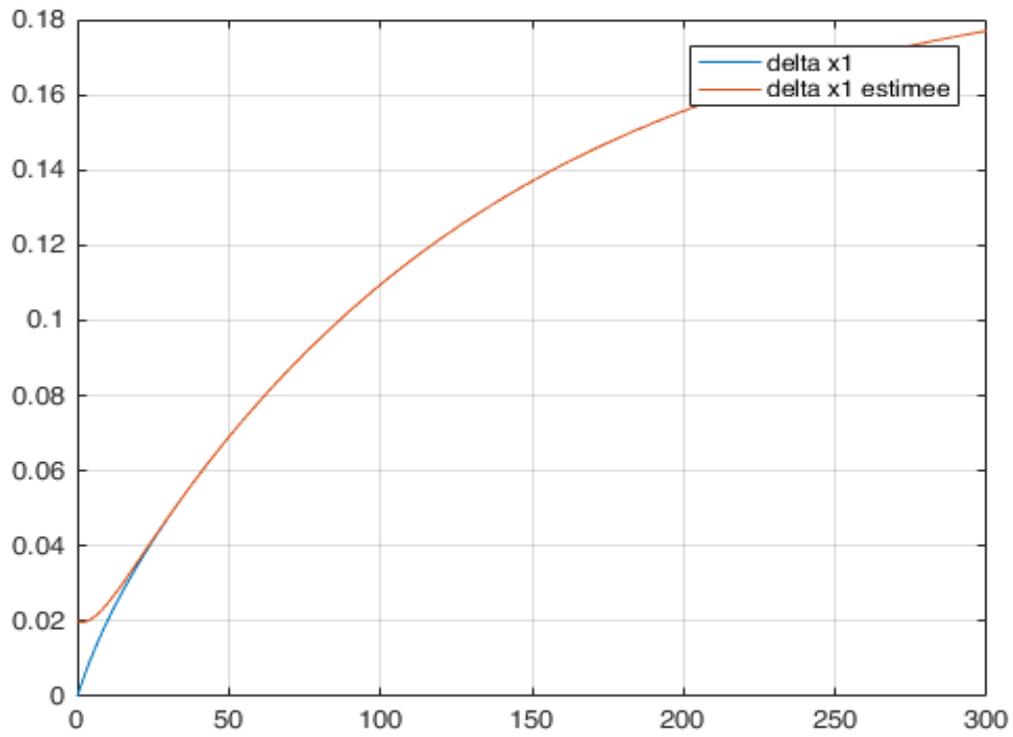


Figure IV-5: Simulation de δx_1 et son estimé $\delta \hat{x}_1$.

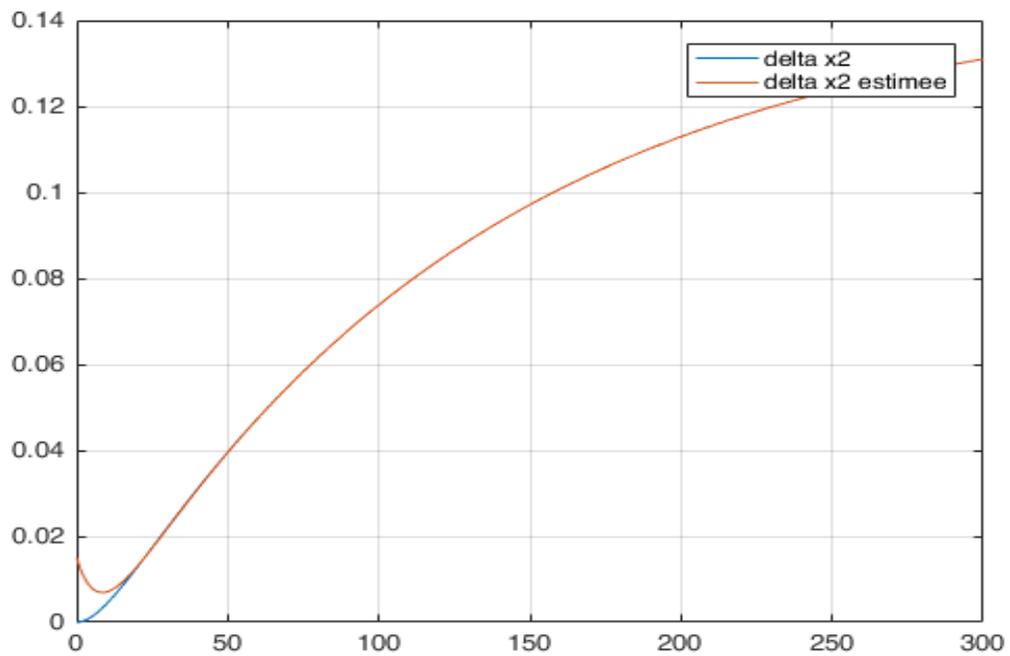


Figure IV-6: Simulation de δx_2 et son estimé $\delta \hat{x}_2$.

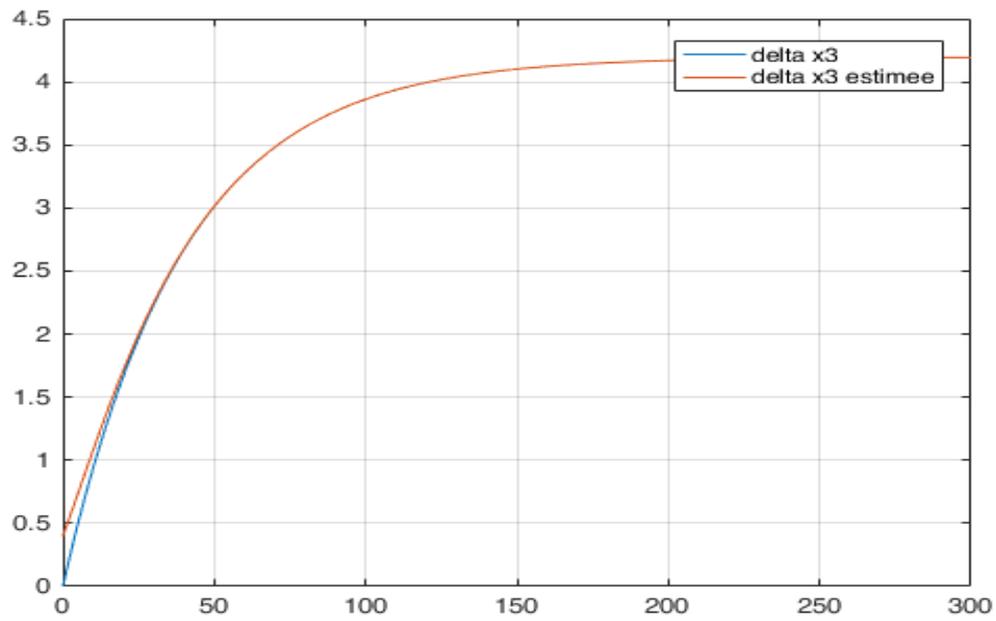


Figure IV-7: Simulation de delta x_3 et son estimé delta \hat{x}_3 .

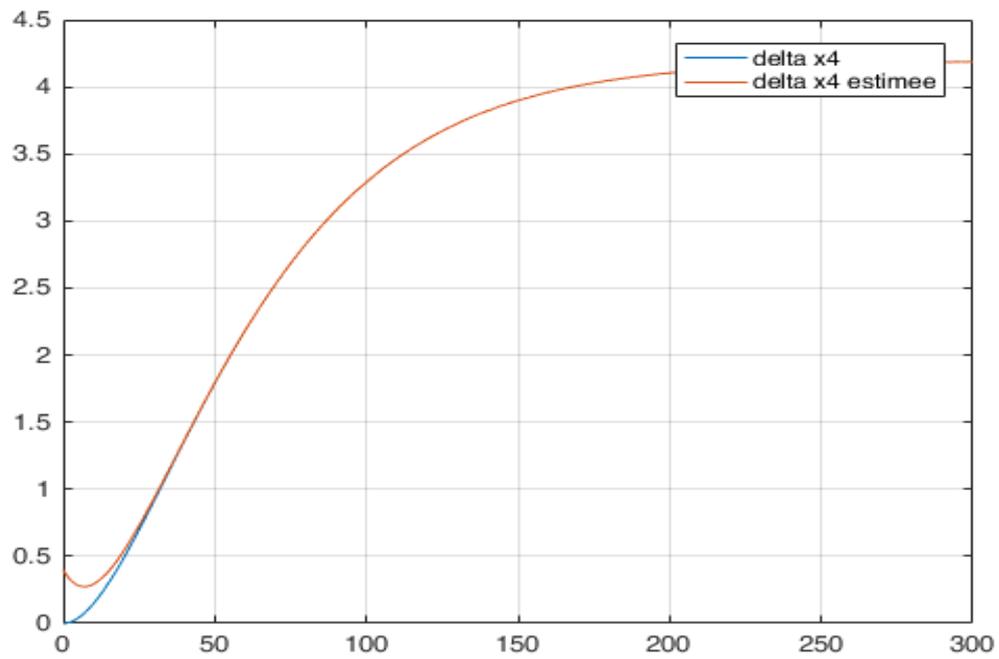


Figure IV-8: Simulation de delta x_4 et son estimé delta \hat{x}_4 .

IV.4.3 Interprétation des résultats

On remarque que les variables d'états estimées représentées dans les figures IV-5 jusqu'à la figure IV-8 sont complètement confondues avec les variables d'état après un temps fini et très court, ce qui signifie que l'observateur conçu est efficace.

Les résultats obtenus montrent l'efficacité de l'observateur proposé. Dans la section suivante cet observateur sera couplé avec une commande glissante.

IV.5 Conclusion

Nous avons abordé dans ce chapitre la synthèse d'un observateur de Luenberger afin d'estimer les états non mesurables du système linéaire. L'observateur développé a été par la suite validé en vue d'une comparaison avec les états du système linéaire dans le but d'observer la dynamique de son régime transitoire pour des conditions initiales différentes.

Chapitre V : Association de la commande à régime glissant et l'observateur sans et avec action intégrale

V.1 Introduction

Dans ce chapitre on va associer l'observateur à notre système et étudier les résultats et les comparé avec les résultats précédents. Ensuite on va ajouter l'action intégrale à la commande glissante à partir de calcul de la surface glissement des états augmentés afin de réguler notre système et obtenir les performances désirées, et on présente des graphes et des schémas de Simulink et comparer ces résultats avec les résultats précédents, qui vont montrer l'intérêt de cette méthode dans le domaine d'automatique.

V.2 Association de l'observateur avec la commande à régime glissant sans action intégrale

V.2.1 Schémas bloc du système linéaire et non linéaire de la commande à régime glissant à base d'observateur

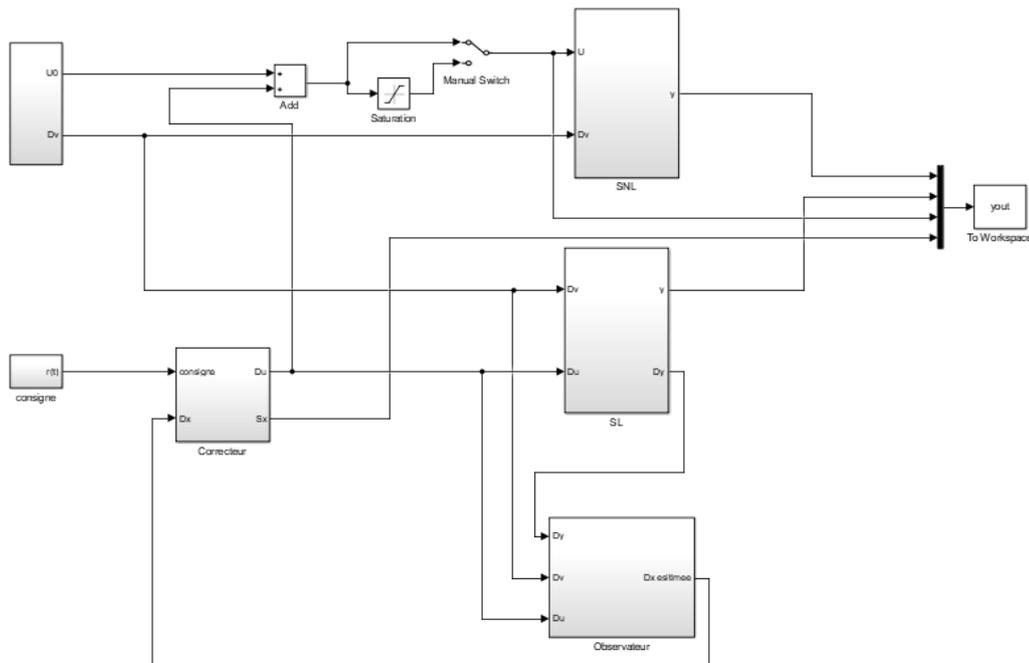


Figure V-1 : Bloc de simulation d'un observateur linéaire sur la base de $(y_L - \hat{y})$ en boucle fermée

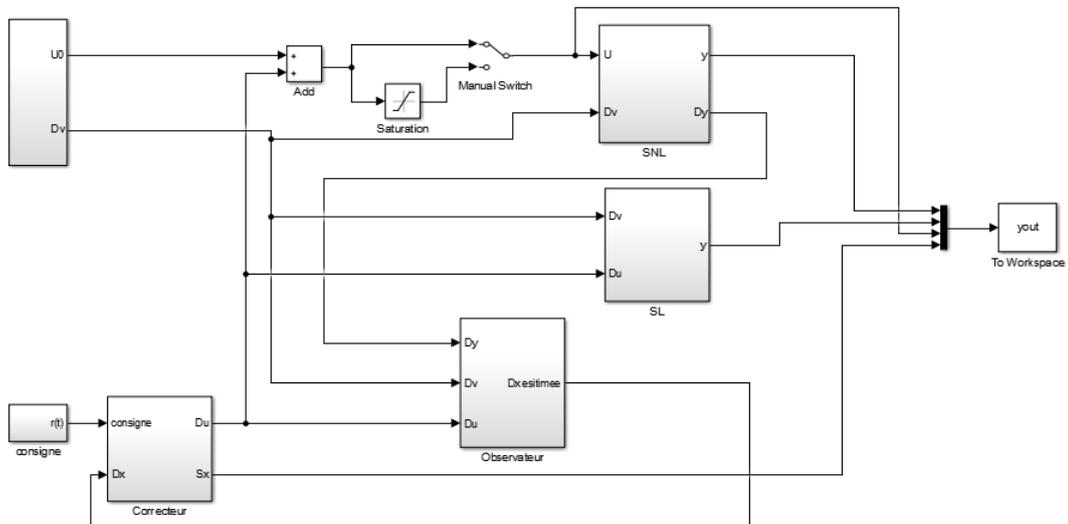


Figure V-2: Bloc de simulation d'un observateur linéaire sur la base de $(y_{NL} - \hat{y})$ en boucle fermée

V.2.2 Résultats de simulation

V.2.2.1 Sur la base de la sortie du modèle linéaire

Les figures V-3, V-4, V-7, V8 illustrent le comportement dynamique des sorties du système avec le correcteur associé avec l'observateur d'état de Luenberger sur la base $(y_L - \hat{y})$ sans et avec l'effet de perturbation et les figures V-5, V-9 représentent la commande générée dans les deux cas.

a- Premier cas Sans l'effet de perturbation :

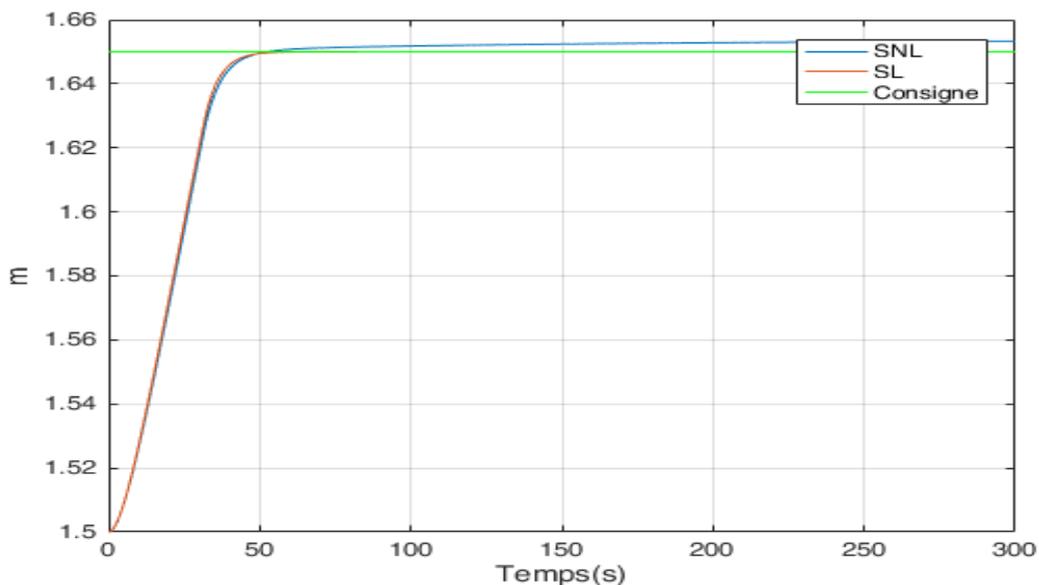


Figure V-3: Résultat de simulation de l'évolution du niveau H_2 .

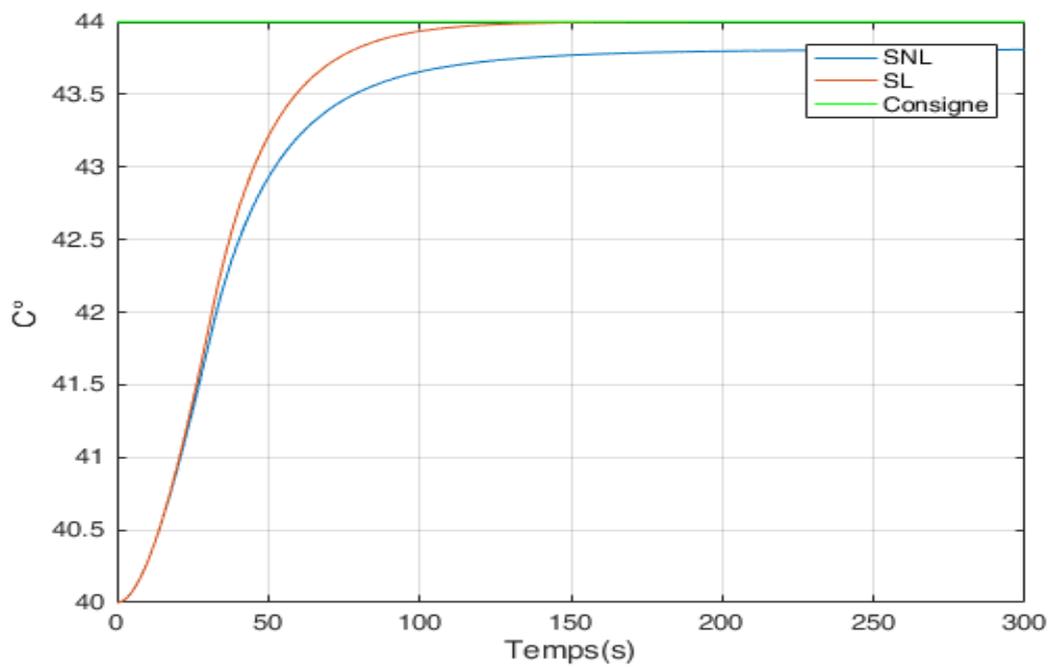


Figure V-4 : Résultat de simulation de l'évolution de la température T_2 .

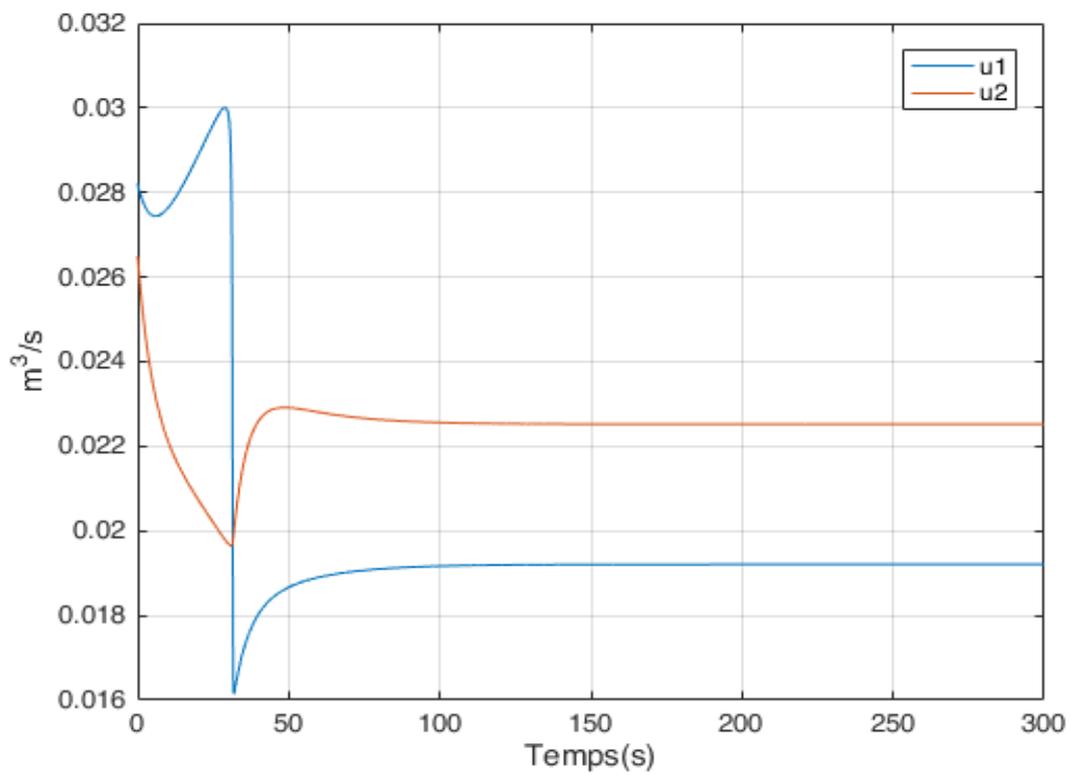


Figure V-5: Simulation de la commande u_1 et u_2

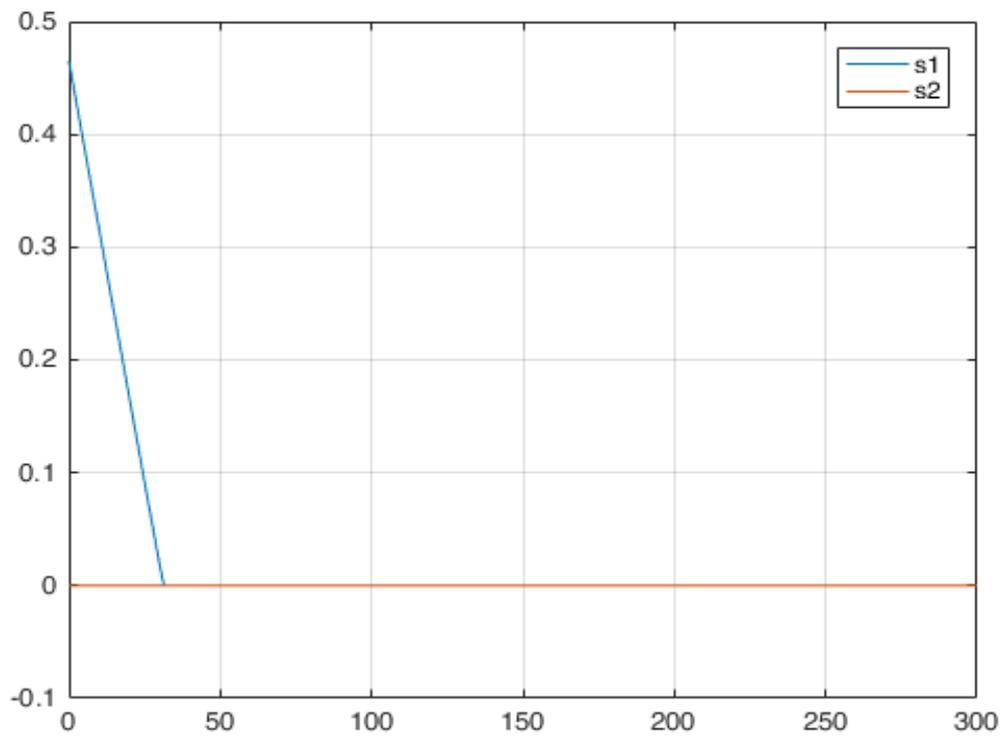


Figure V-6: Simulation de la surface S1 et S2

b- Deuxième cas avec perturbation :

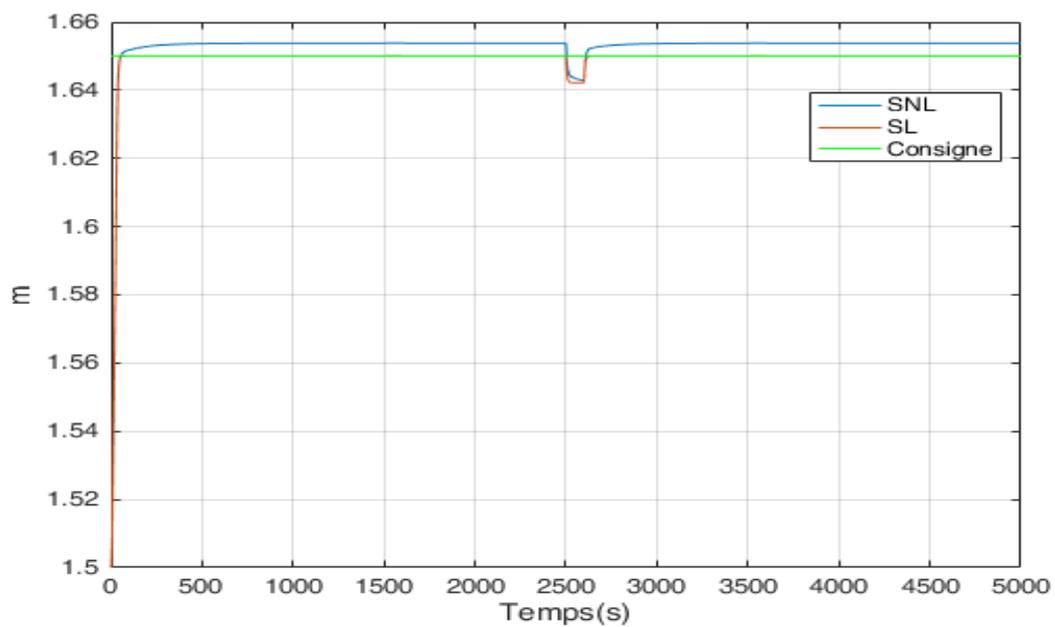


Figure V-7: Résultat de simulation de l'évolution du niveau H_2 à la présence de la perturbation

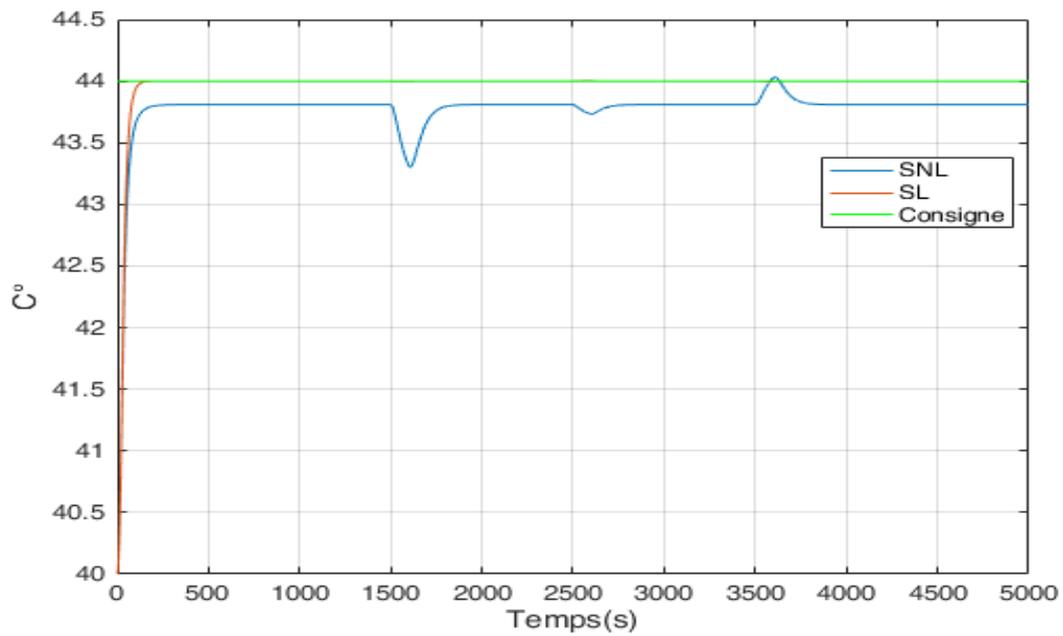


Figure V-8: Résultat de simulation de l'évolution du température T_2 a la présence de la perturbation

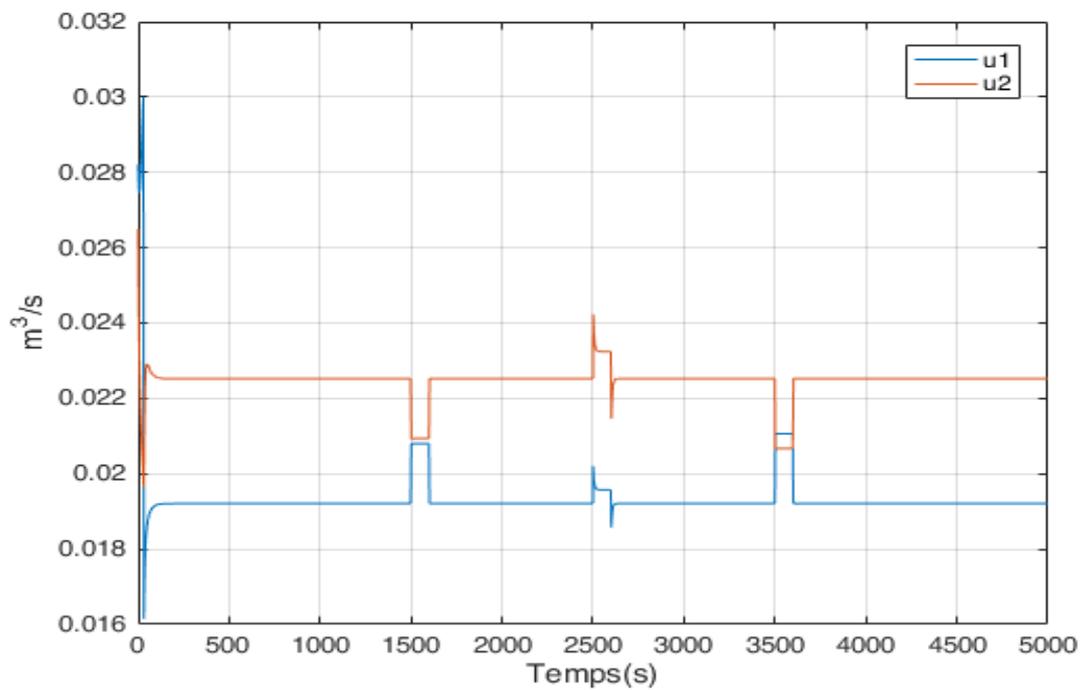


Figure V-9: Résultat de simulation de la commande u_1 et u_2 a la présence de la perturbation.

V.2.2.2 Sur la base de la sortie du modèle non linéaire

Les figures V-10, V-11, V-13, V14 illustrent le comportement dynamique des sorties du système avec le correcteur associé avec l'observateur d'état de Luenberger sur la base $(y_{NL} - \hat{y})$ sans et avec l'effet de perturbation et les figures V-12, V-15 représentent la commande générée dans les deux cas.

a- Premier cas Sans perturbation

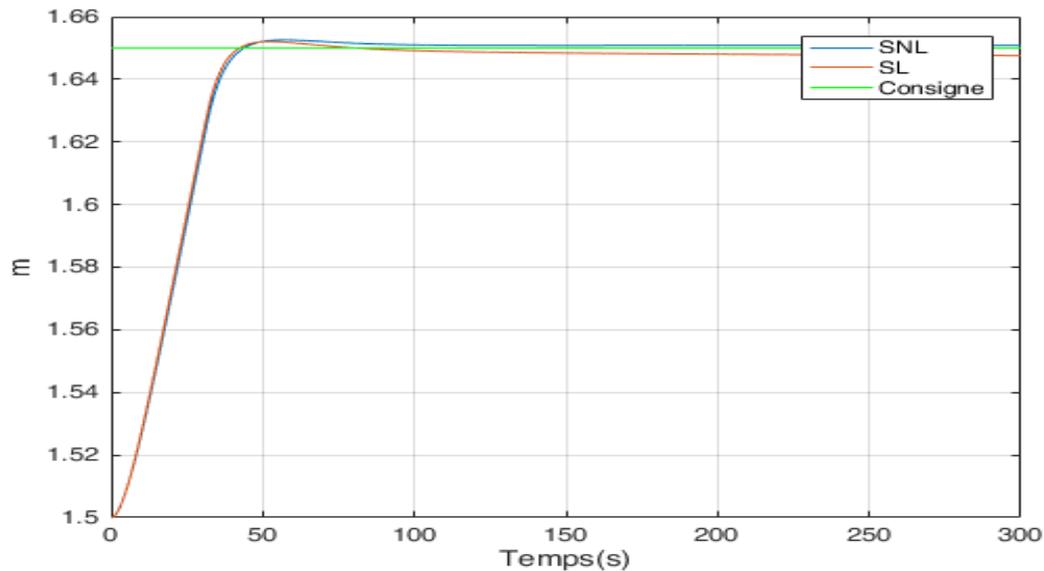


Figure V-10: Résultat de simulation de l'évolution du niveau H_2 sans perturbation

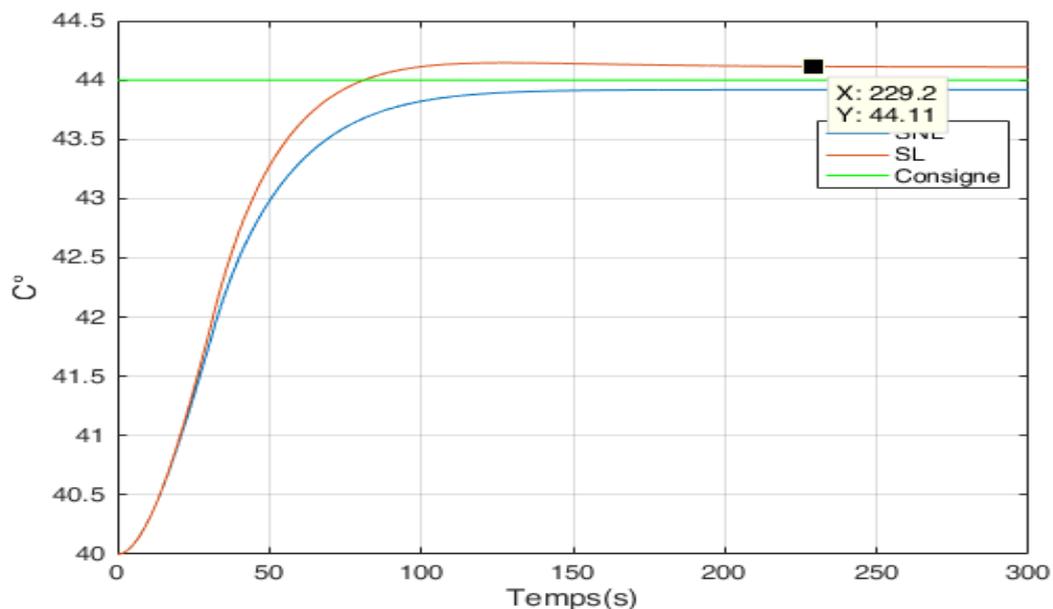


Figure V-11: Résultat de simulation de l'évolution du température T_2 sans perturbation

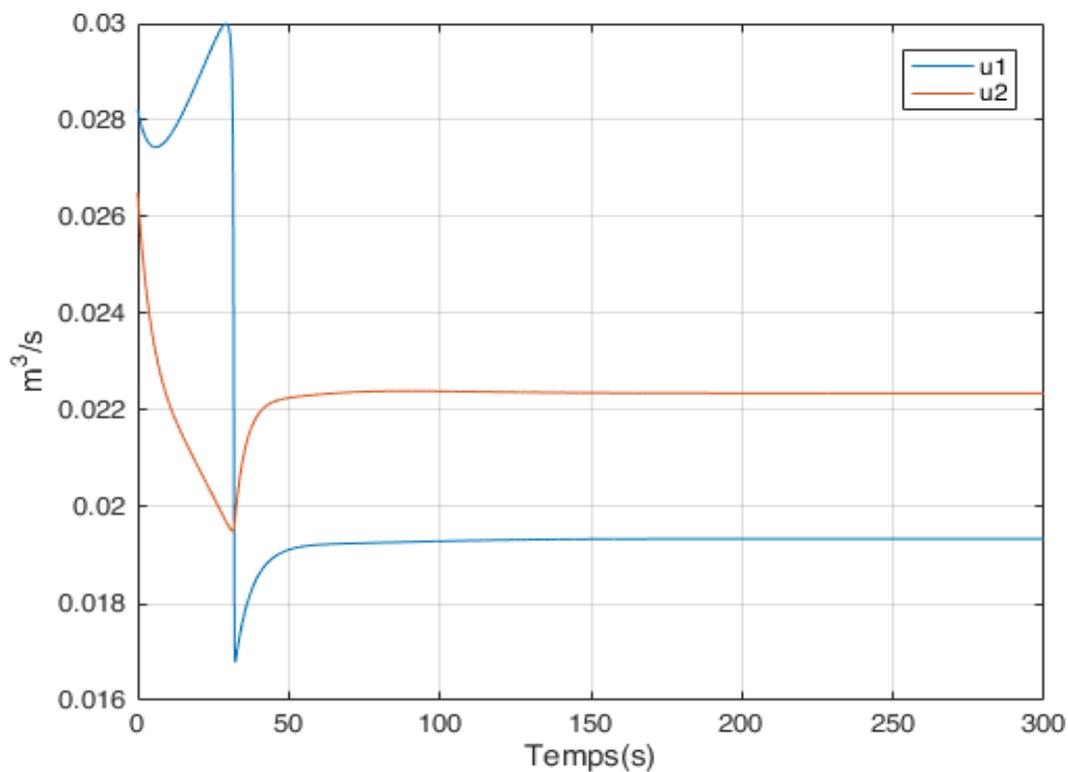


Figure V-12: Simulation de la commande u_1 et u_2

b- Deuxième cas Avec perturbation

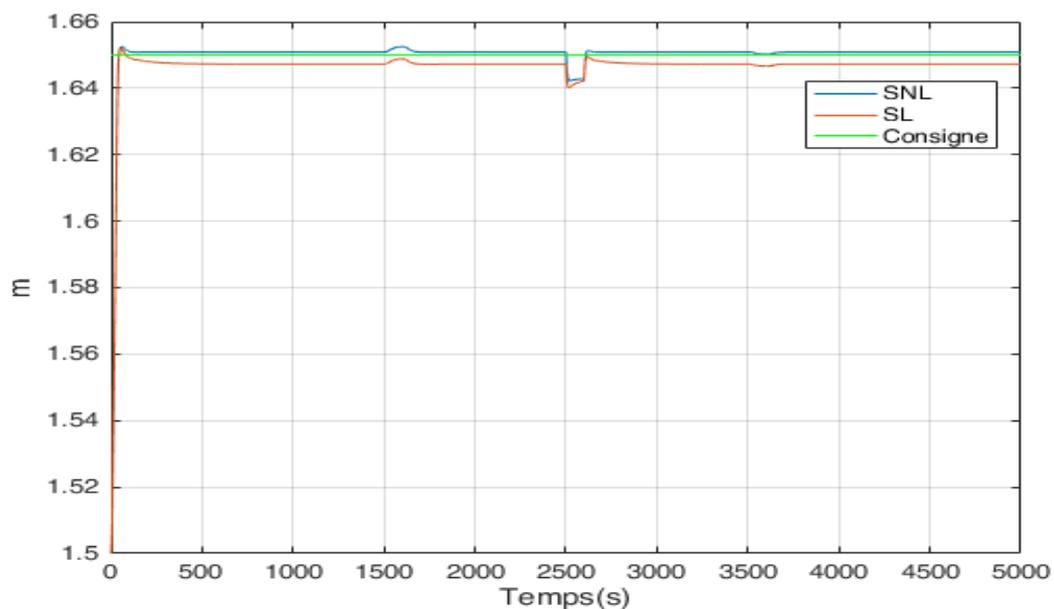


Figure V-13: Résultat de simulation de l'évolution du niveau H_2 à la présence de la perturbation

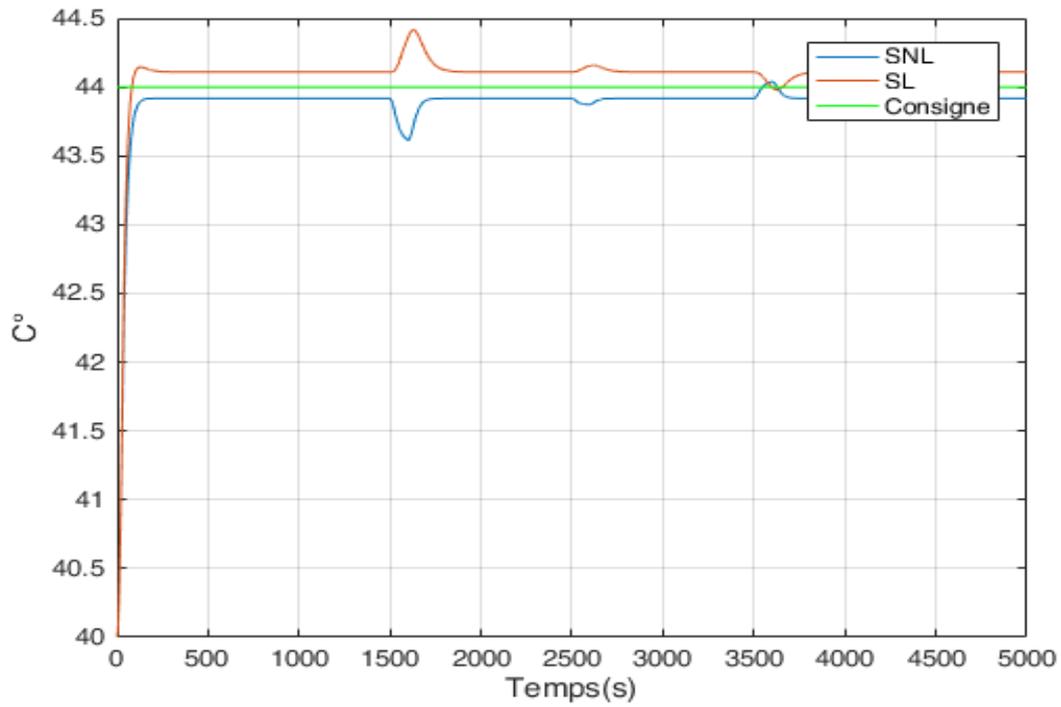


Figure V-14: Résultat de simulation de l'évolution du température T_2 a la présence de la perturbation

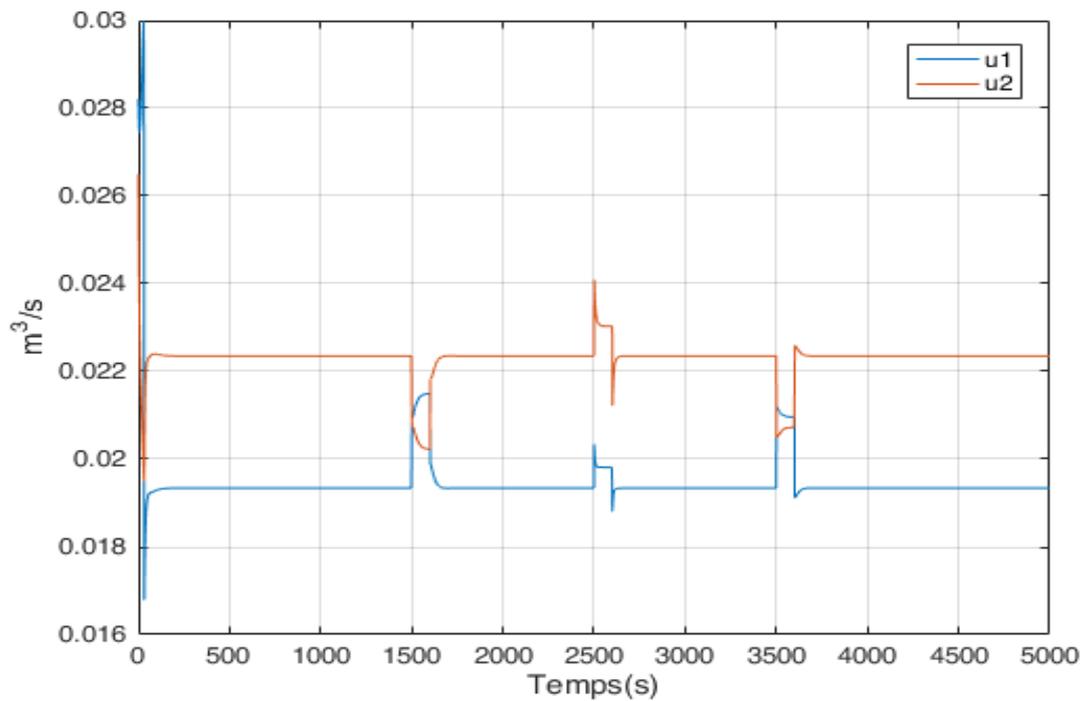


Figure V-15: Simulation de la commande u_1 et u_2

V.2.3 Interprétation des résultats

Le tableau V-1 représente une comparaison de l'effet de perturbation sur le système linéaire et non linéaire entre la correction en utilisant la commande de poursuite continue (smooth) avec et sans observateur ainsi que le tableau V-2 représente la comparaison de temps de réponse et l'erreur statique.

			Effet des perturbations (%)		
			dv_1	dv_2	dv_3
$H_2(m)$	Sans Ob	SL	5.33	0	0
		SNL	7.3	0	0
	Avec Ob	SL	4.76	1.36	0.4
		SNL	5.96	0.66	0.3
$T_2(C^\circ)$	Sans Ob	SL	0	0	0
		SNL	0	13.38	5.77
	Avec Ob	SL	1.3	7.54	2.91
		SNL	1.2	7.9	3.06

Tableau V-1: Comparaison de l'effet de perturbation sur le système entre la correction avec observateur et sans observateur

On remarque une diminution de l'effet de perturbation sur les sorties de système non linéaire après l'ajout de l'observateur.

			Erreur statique (%)	Temps de réponse (s)
			$H_2(m)$	Sans Ob
SNL	4.5	40.9		
Avec Ob	SL	2		34.6
	SNL	0.66		37.3
$T_2(C^\circ)$	Sans Ob	SL	0	87.2
		SNL	4.8	91
	avec Ob	SL	2.75	72.8
		SNL	2.25	84.8

Tableau V-2: comparaison de l'erreur statique du système entre la correction avec observateur et sans observateur

Avec l'utilisation de l'observateur on remarque une diminution de temps de réponse et une diminution importante de l'erreur statique pour le système non linéaire mais elle est augmentée dans le système linéaire a cause de l'utilisation de y_{NL} dans l'observateur.

V.2.4 Comparaison entre les résultats obtenu par la commande à régime glissant associé à l'observateur d'état basé sur la sortie du modèle linéaire et non linéaire du système hydro-thermique :

La figure V-16 regroupe le graphe de SNL du figure V-7 avec SNL de la figure V-13 on aura le résultat suivant :

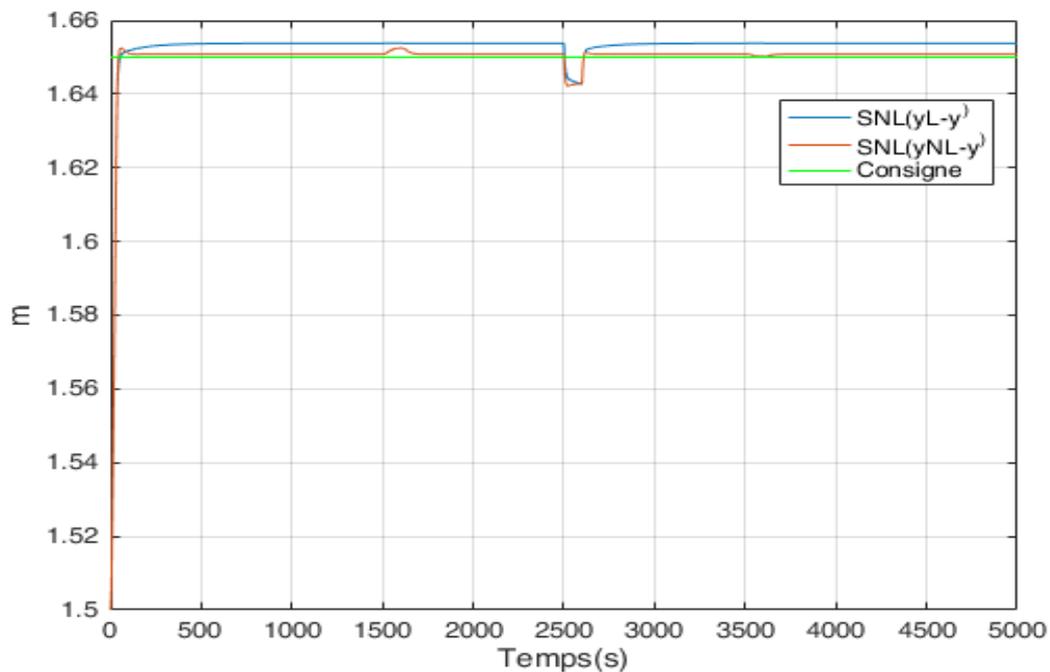


Figure V-16: Résultat de comparaison de H_2 NL

La figure V-17 regroupe le graphe de SNL du figure V-8 avec SNL de la figure V-14 on aura le résultat suivant :

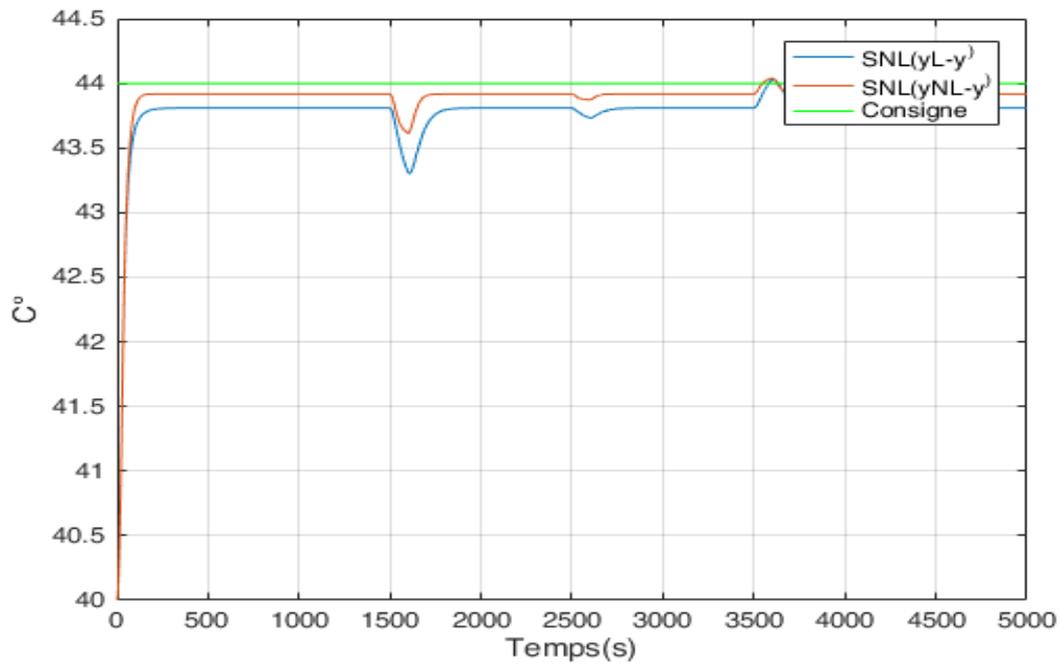


Figure V-17: Résultat de comparaison de T_2 NL

La figure V-18 regroupe le graphe de SL du figure V-7 avec SL de la figure V-13 on aura le résultat suivant :

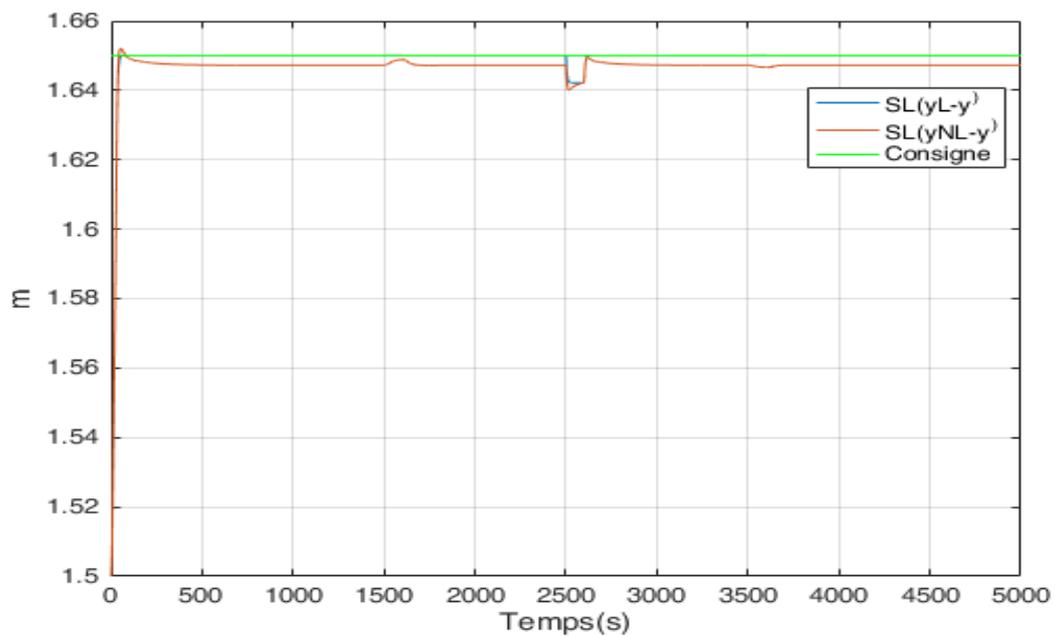


Figure V-18: Résultat de comparaison de H_2 L

La figure V-19 regroupe le graphe de SL du figure V-8 avec SL de la figure V-14 on aura le résultat suivant :

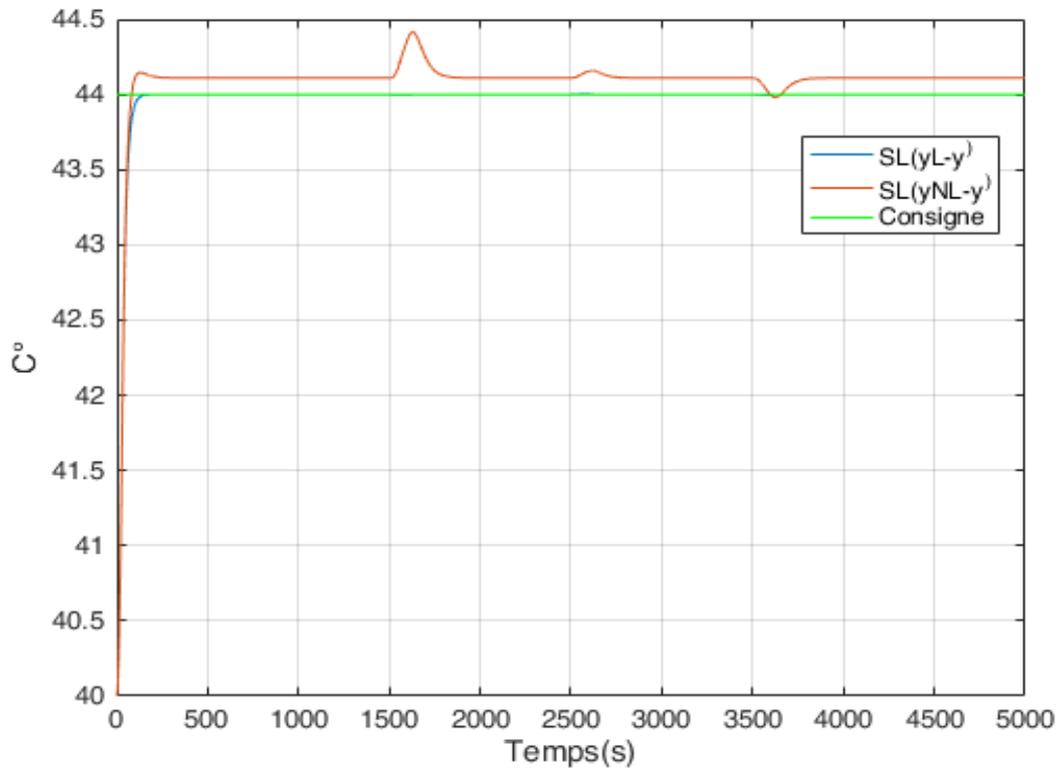


Figure V-19: Résultat de comparaison de $T_2 L$

V.3 Commande en régime glissant avec action intégrale

L'utilisation de commandes comportant un terme fonction de l'intégral de l'erreur d'asservissement est classique en automatique, lorsqu'on veut garantir une erreur statique nulle en présence de consignes et de perturbations constantes.

Considérons le système (V.1) :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) + E \cdot v(t) \\ y(t) = C \cdot x(t) \end{cases} \quad (\text{V. 1})$$

Avec des consignes $y_r(t)$ que doivent suivre les sorties $y(t)$. Si celles-ci sont mesurables, on peut introduire des variables supplémentaires $e(t)$ qui représentent l'intégral de l'erreur d'asservissement :

$$e = y_r - y \quad (\text{V. 2})$$

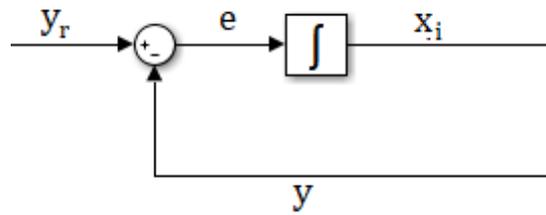


Figure V-20 : Schéma fonctionnelle présente l'ajout de l'action intégrale

on pose :

$$x_i = \int e dt \quad (\text{V. 3})$$

donc :

$$\dot{x}_i = e = y_r - C \cdot x \quad (\text{V. 4})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} 0 \\ I_n \end{bmatrix} y_r \quad (\text{V. 5})$$

donc on a :

$$\dot{x}_a = A_a x_a + B_a u + E_a v + \Gamma y_r \quad (\text{V. 6})$$

On présente la sortie par :

$$\begin{bmatrix} y \\ x_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & I_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_i \end{bmatrix} = C_a x_a \quad (\text{V. 7})$$

avec :

$$A_a = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0506 & 0.0506 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0506 & -0.0675 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0253 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0338 & -0.0338 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{V. 8})$$

$$B_a = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.2739 & 1.2739 \\ 0 & 0 \\ 12.7389 & -6.3694 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{V. 9})$$

$$E_a = \begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -4.1501 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0084 & 0.0169 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{V. 10})$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0 \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{V. 11})$$

$$C_a = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{V. 12})$$

La surface du glissement devient :

$$S_a = G_a \cdot e_a \quad (\text{V. 13})$$

On calcule G_a de la même méthode utilisée dans le paragraphe III.3.6 pour le calcul de la matrice G, sauf cette fois on utilise le système augmenté à la place de l'ancien système linéaire on a trouvé :

$$G_a = \begin{bmatrix} 0.2617 & 1.2041 & 0.0523 & 0.0570 & -0.0008 & -0.0001 \\ 0.5233 & 2.4083 & -0.0523 & -0.0570 & -0.0016 & 0.0001 \end{bmatrix} \quad (\text{V. 14})$$

V.3.1 Calcul de la commande équivalente

Nous intéressons au calcul de la commande équivalente et par la suite au calcul de la commande attractive du système augmenté.

La dérivée de la surface de glissement donnée en relation (V.13) est :

$$\dot{S}_a = -G_a \cdot \dot{x}_a \quad (\text{V. 15})$$

La commande équivalente est obtenue comme suit :

$$\dot{S}_a = 0 \quad (\text{V. 16})$$

En remplaçant (V.6) dans (V.15) :

$$-G_a \cdot A_a \cdot x_a - G_a \cdot B_a \cdot u_{eq} - G_a \cdot \Gamma \cdot y_r = 0 \quad (\text{V. 17})$$

On aura la commande équivalente :

$$u_{eq} = -(G_a \cdot B_a)^{-1} \cdot G_a \cdot A_a \cdot x - (G_a \cdot B_a)^{-1} \cdot G_a \cdot \Gamma \cdot y_r \quad (\text{V. 18})$$

V.3.2 Calcul de la commande discontinue

On additionne le terme u_d à la commande équivalente pour assurer l'attractivité de la surface de glissement S_a et on le calcule comme suit :

On pose :

$$\dot{S}_a = -\eta \cdot \text{sign}(S_a) \quad (\text{V. 19})$$

On sait que :

$$u = u_{eq} + u_d \quad (\text{V. 20})$$

En remplaçant (V.18) dans (V.19) :

$$-G_a \cdot A_a \cdot x_a - G_a \cdot B_a \cdot u - G_a \cdot \Gamma \cdot y_r = -\eta \cdot \text{sign}(S_a) \quad (\text{V. 21})$$

Et en remplaçant (V.20) dans (V.21) :

$$G_a \cdot A_a \cdot x_a + G_a \cdot B_a \cdot (u_{eq} + u_d) + G_a \cdot \Gamma \cdot y_r = \eta \cdot \text{sign}(S_a) \quad (\text{V. 22})$$

Après l'arrangement de l'équation on trouve :

$$u_d = (G_a \cdot B_a)^{-1} \cdot \eta \cdot \text{sign}(S_a) \quad (\text{V. 23})$$

V.3.3 Schémas blocs des systèmes linéaire et non linéaire contrôlés par une commande à régime glissant avec action intégrale

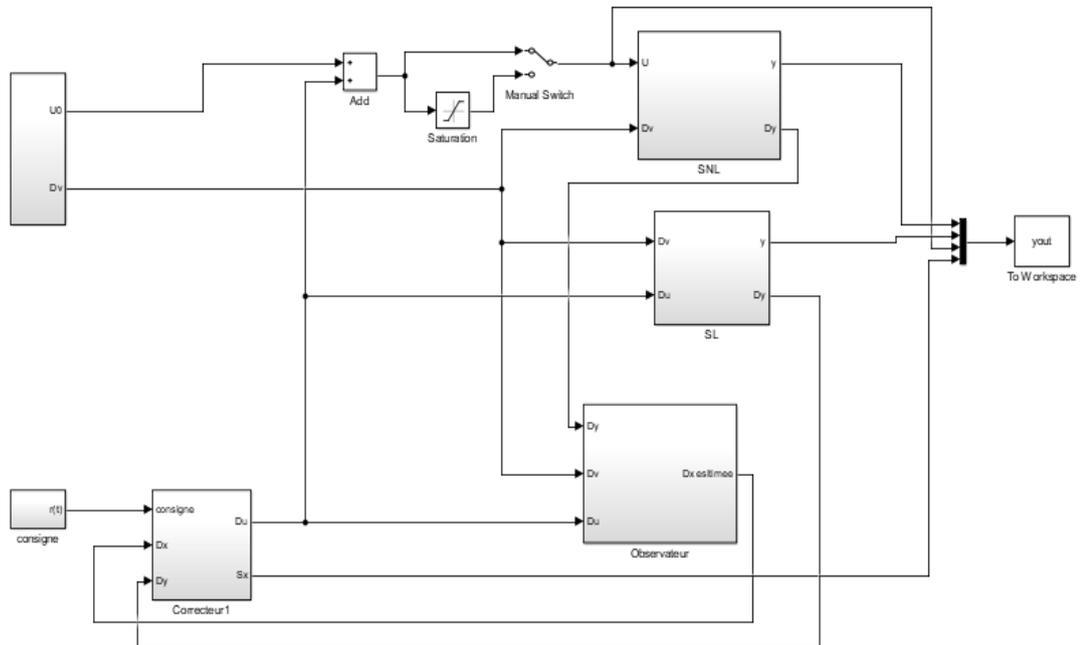


Figure V-21: Bloc de simulation du système régulier par régime glissant à action intégrale sur la base de $e = y_r - y_l$ plus observateur

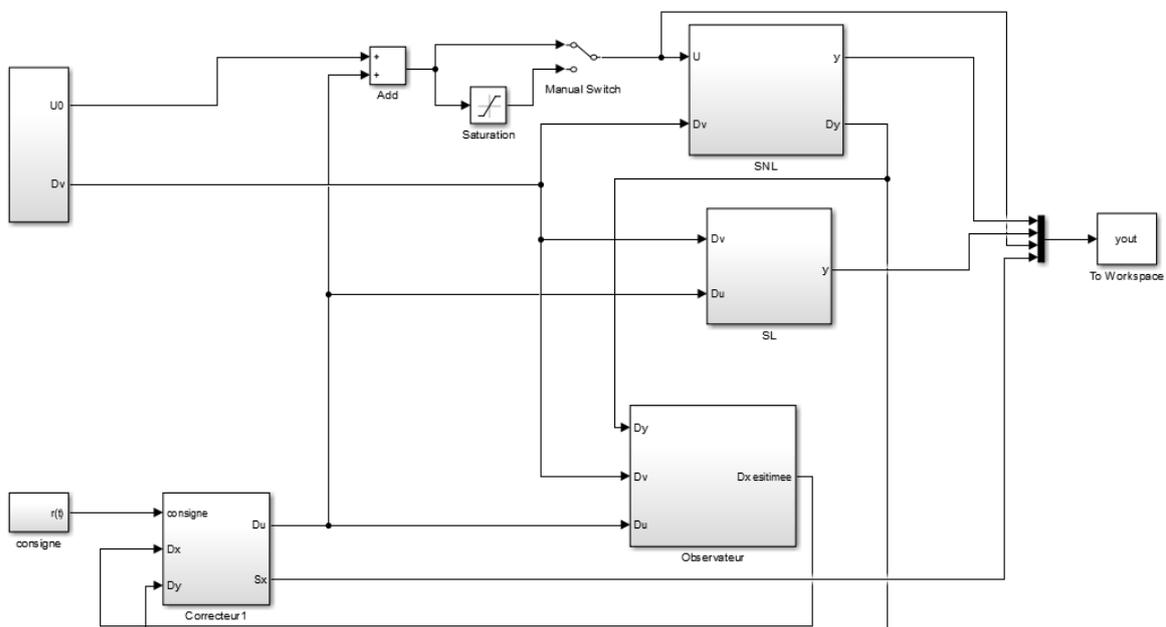


Figure V-22: Bloc de simulation du système régulier par régime glissant à action intégrale sur la base de $e = y_r - y_{nl}$ plus observateur

V.3.4 Résultats de la simulation

Les figures de V-23 à V-28 représente les sorties et les commande dans les deux cas :

a- Premier cas : $e = y_r - y_l$

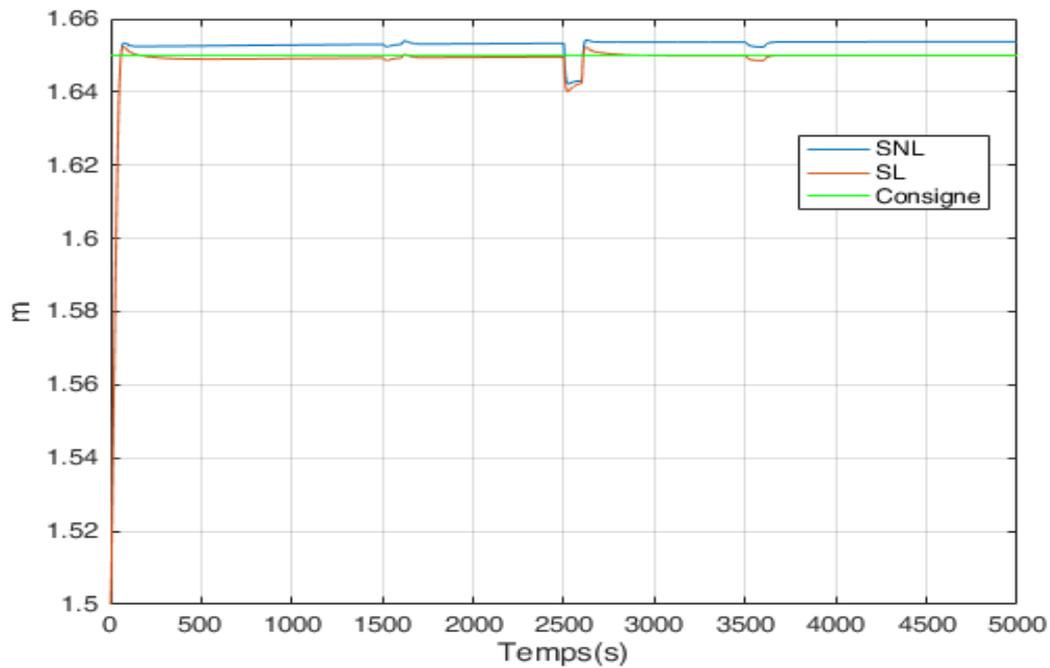


Figure V-23 : Résultat de simulation de l'évolution du niveau H_2 a la présence de la perturbation

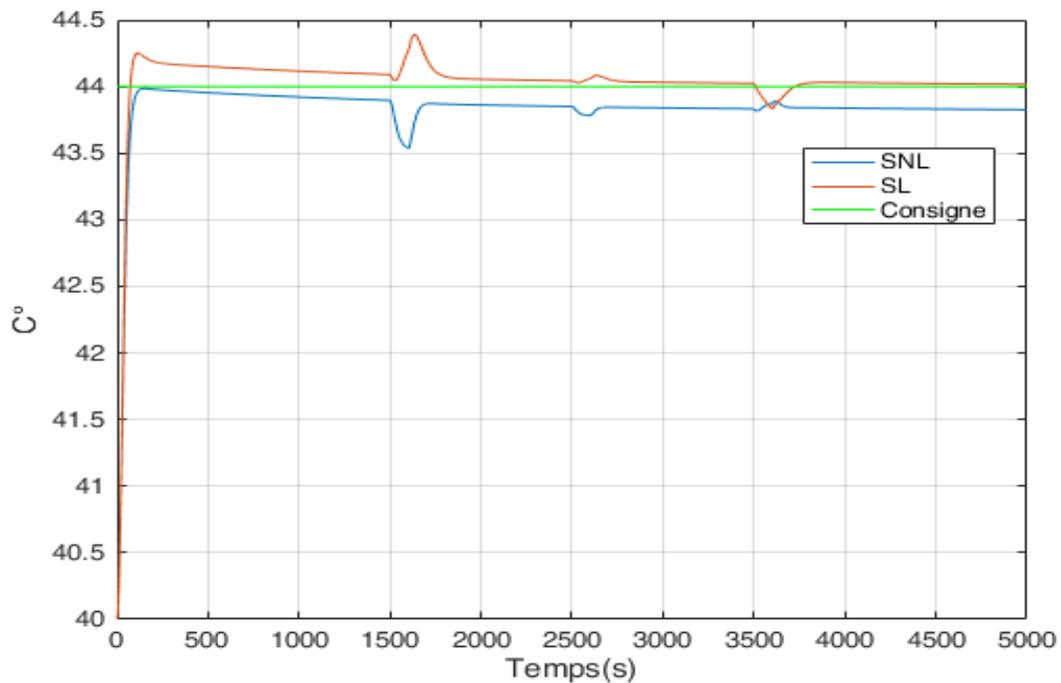


Figure V-24 : Résultat de simulation de l'évolution du température T_2 a la présence de la perturbation

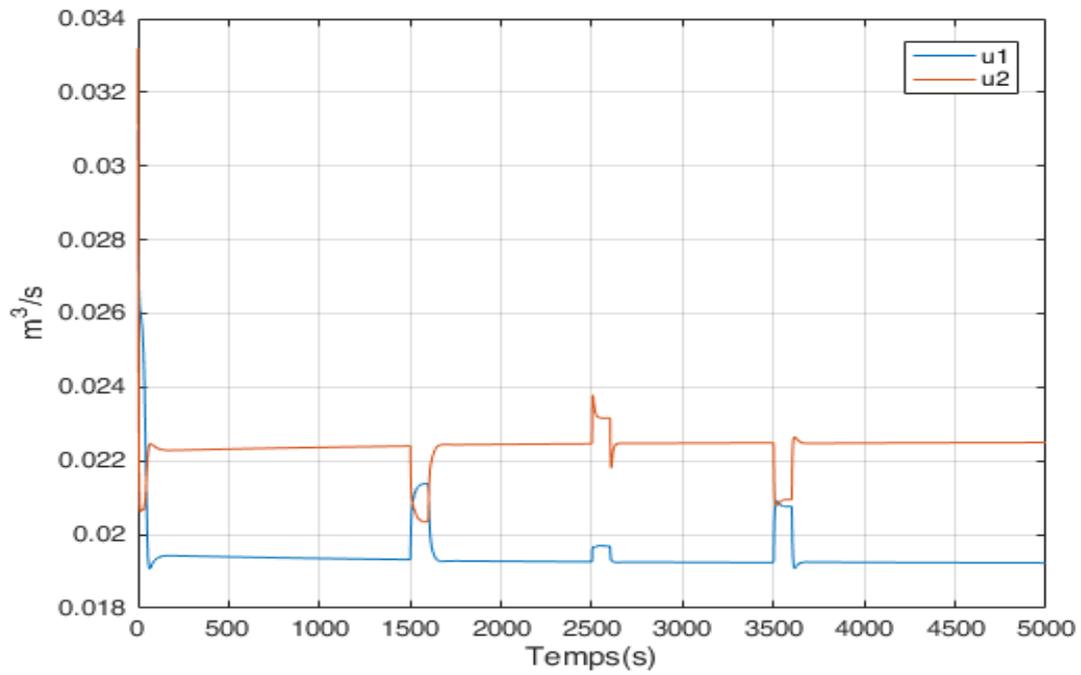


Figure V-25 : Simulation de la commande u_1 et u_2

b- Deuxième cas : $e = y_r - y_{nl}$

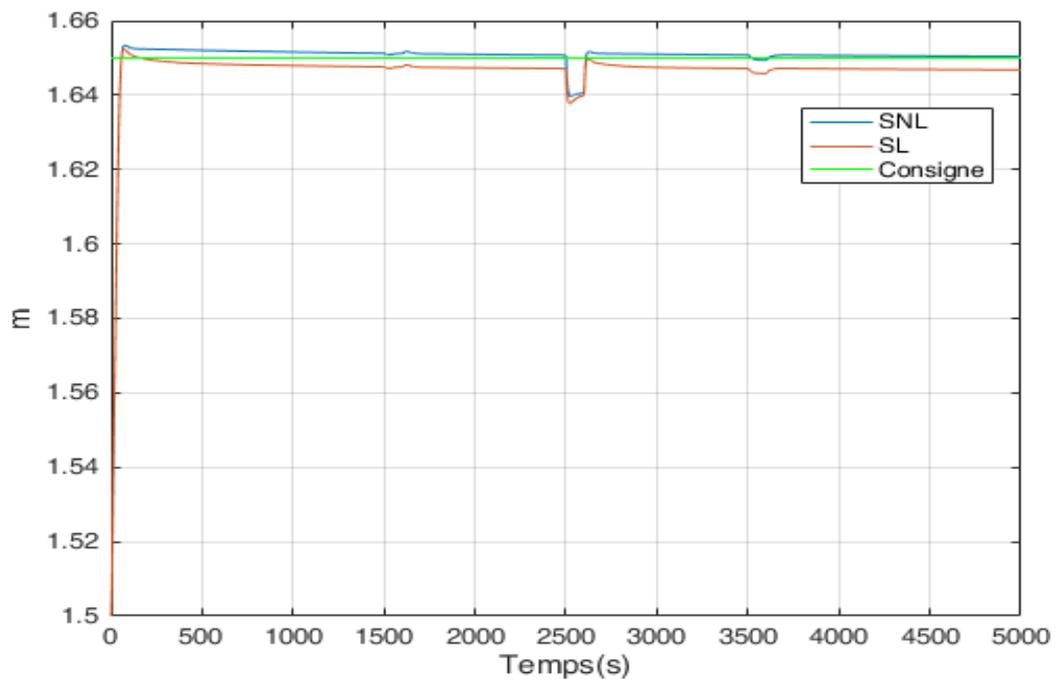


Figure V-26: Résultat de simulation de l'évolution du niveau H_2 à la présence de la perturbation

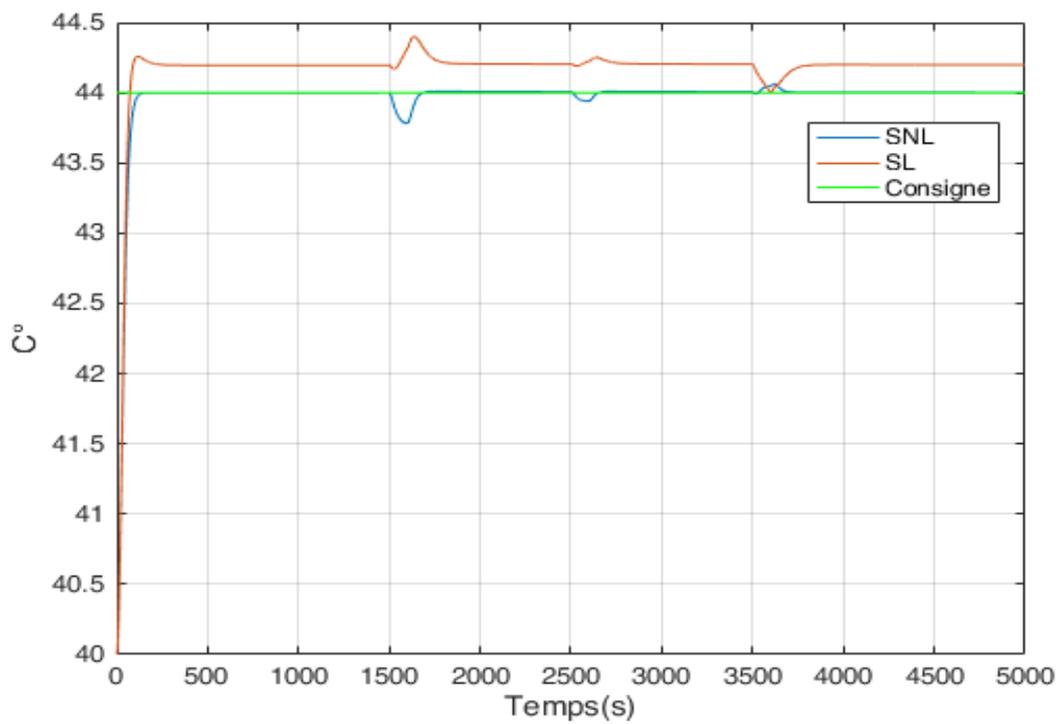


Figure V-27: Résultat de simulation de l'évolution du température T_2 a la présence de la perturbation

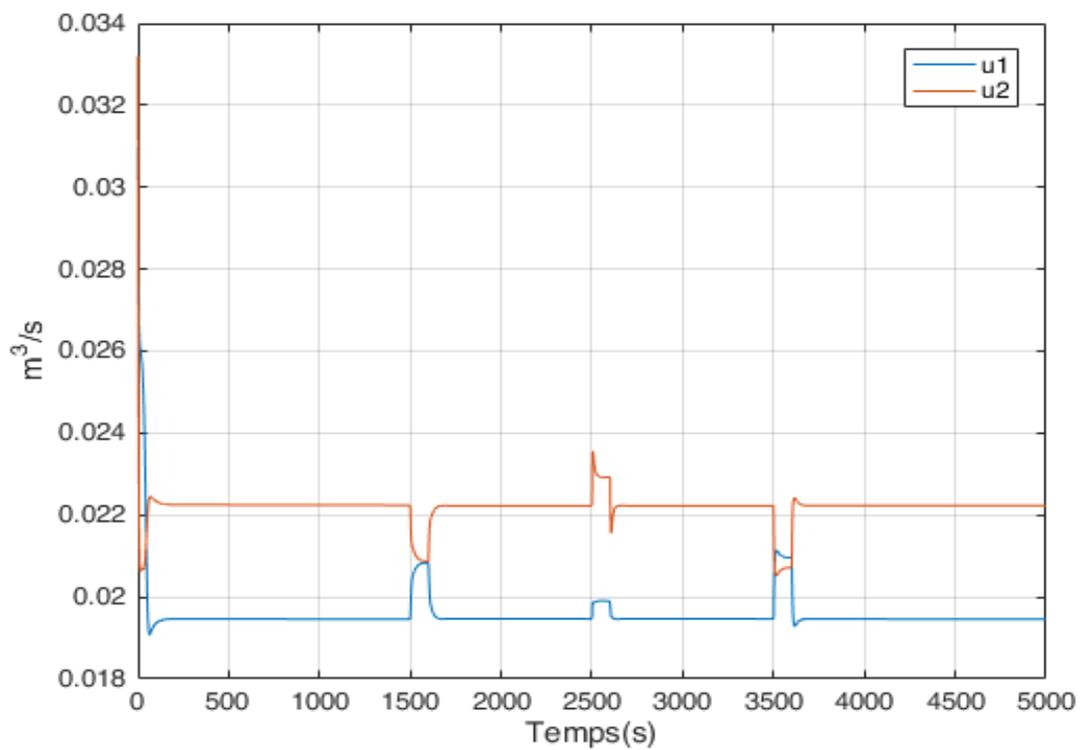


Figure V-28: Simulation de la commande u_1 et u_2

V.3.5 Interprétation des résultats

- Comparaison entre les résultats obtenue dans les deux cas respectivement

$$e = y_r - y_l \text{ et } e = y_r - y_{nl} :$$

		Effet des perturbations (%)			
		$e = y_r - y_{nl}$		$e = y_r - y_l$	
		NL	L	NL	L
$H_2(m)$	dv_1	5.3	6.12	8	6.6
	dv_2	0.5	0.5	0.1	0.12
	dv_3	0.14	0.14	0.13	0.14
$T_2(^{\circ}C)$	dv_1	1	1.2	1.2	1
	dv_2	5.5	7.6	7.83	8.75
	dv_3	1	4.75	1.2	4.75

Tableau V-3 : Comparaison l'effets de perturbation sur le système L et NL pour $e = y_r - y_{nl}$ et $e = y_r - y_l$

On notera qu'après utilisation de l'intégrale de l'erreur $e = y_r - y_{nl}$ pour le calcul de l'effet de perturbation, les résultats obtenus par le système non-linéaire sont largement plus satisfaisant. Cependant, si on implémente $e = y_r - y_l$ pour le même calcul, les résultats obtenues par le système linéaire seront plus précis.

		$e = y_r - y_{nl}$		$e = y_r - y_l$	
		Erreur statique	Temps de Réponse	Erreur statique	Temps de Réponse
$H_2(m)$	SL	2	35.3	0	48
	SNL	0	36.4	2.6	52.3
$T_2(^{\circ}C)$	SL	5	71.4	0.4	64.1
	SNL	0	81.5	4.25	70.2

Tableau V-4: Comparaison l'erreur statique et temps de Réponse pour $e = y_r - y_{nl}$ et $e = y_r - y_l$

On notera qu'après utilisation de $e = y_r - y_{nl}$ pour le calcul de l'écart statique, les résultats obtenus par le système non-linéaire sont largement plus satisfaisant car l'erreur statique égale à 0. Cependant, si on implémente $e = y_r - y_l$ pour le même calcul, les résultats obtenues par le système linéaire seront plus précis, mais il n'y a pas un grand écart entre eux pour le temps de repense.

- Comparaison entre les résultats obtenue par utilisation de la commande glissant avec l'observateur et les résultats après l'utilisation de l'action intégrale.

		Effet des perturbations (%)			
		Avec action intégrale		Sans action intégrale	
		NL	L	NL	L
$H_2(m)$	dv_1	5.3	6.12	5.96	4.76
	dv_2	0.5	0.5	0.66	1.36
	dv_3	0.14	0.14	0.3	0.4
$T_2(^{\circ}C)$	dv_1	1	1.2	1.2	1.3
	dv_2	5.5	7.6	7.9	7.54
	dv_3	1	4.75	3.06	2.91

Tableau V-5: Comparaison les résultats obtenus avant et après l'ajout de l'action intégrale pour l'effet de perturbation.

Dans l'étude des effets de perturbation et dans la tentative de les minimiser, on établira une comparaison avant/après l'introduction de l'action intégrale pour les deux systèmes, linéaire et non-linéaire. Les résultats auxquels on aboutit sont comme suit :

- Le système non-linéaire avec action Intégral se révélera plus performant dans la réduction des effets des perturbations.
- Néanmoins, dans le cas linéaire on notera une légère hausse de l'effet de perturbations après l'implémentation de l'action intégrale et cela revient à l'utilisation de l'intégrale de l'erreur égale à $e = y_r - y_{nl}$; Car c'est cette dernière qui représente le système réel.

		Erreur statique	Temps de réponse	Erreur statique	Temps de réponse
		Avec action intégrale		Sans action intégrale	
		$H_2(m)$	SL	2	35.3
	SNL	0	36.4	0.66	37.3
$T_2(^{\circ}C)$	SL	5	71.4	2.75	72.8
	SNL	0	81.5	2.25	84.8

Tableau V-6: Comparaison les résultats obtenus avant et après l'ajout de l'action intégrale pour l'écart statique et le temps de réponse.

Dans notre tentative de supprimer l'erreur statique, on a introduit une action intégrale, et les résultats ont été probants. Avec les systèmes non-linéaires, on observera une élimination de l'erreur statique. Cependant, dans le cas des système linéaire, l'erreur statique a connu une hausse, et cela revient au fait que l'intégrale de l'erreur égale à $e = y_r - y_{nl}$, utilisée est non représentative des cas réels.

V.4 Conclusion

Les résultats obtenus montrent que les sorties du modèle non-linéaire suivent leurs consignes ce qui prouve l'efficacité de la loi de commande.

On remarque aussi que les perturbations ont des effets sur la dynamique du modèle non linéaire, mais ils sont acceptables puisqu'ils n'ont pas une grande influence comme illustré dans les figures ils sont rapidement compensés.

On a trouvé que l'utilisation de l'observateur sur la base de $(y_{NL} - \hat{y})$ donne des résultats satisfaisant mieux que l'utilisation sur la base de $(y_L - \hat{y})$ pour le système non linéaire.

Dans le but, d'améliorer les performances en boucle fermée du système considéré, d'éliminer l'écart statique et de réduire les effets des perturbations, nous avons utilisé la commande à régime glissant avec action intégrale en utilisant une loi de commande optimale.

Dans le but de réguler les systèmes non-linéaire représentatifs des cas réels, l'utilisation de la formule $e = y_r - y_{nl}$ apportera des résultats satisfaisants, pour l'élimination et la réduction de l'écart statique et effet de perturbation respectivement. Cependant si on cherche à réguler les cas idéal (Linéaire) on usera de $e = y_r - y_l$

Les résultats de simulation obtenus ont montré l'efficacité de cette technique de commande a régime glissant avec action intégrale, au changement de consigne et aux effets de perturbations sur le système non linéaire. Étant donné que ce type de commande nécessite la disponibilité de tous les états du système, un estimateur de ces états sur la base d'un observateur est indispensable.

Conclusion générale

Le travail de ce mémoire a été réalisé pour étudier la synthèse d'une loi de commande à régime glissant à base d'un observateur dont la surface de glissement dépend de l'erreur de poursuite augmentée par l'intégrale de l'erreur de sortie, appliquée en simulation au modèle dynamique d'un système hydro-thermique à deux réservoirs.

Le système hydro-thermique considéré est un système multivariable, à deux entrées et deux sorties, qui sont respectivement les débits d'eau froide et chaude des deux pompes, et le niveau et la température du deuxième réservoir. La commande à régime glissant développée sera utilisée pour contrôler en mode de poursuite ces deux sorties.

Nous avons introduit tout au début de ce mémoire, quelques notions de base sur l'instrumentation et la régulation, et en particulier l'instrumentation qui est présente dans le système hydro-thermique à deux réservoirs. Par la suite, une phase de modélisation a été abordée, qui nous a permis d'aboutir le modèle dynamique non linéaire du système physique considéré. Puis une linéarisation autour d'un point de fonctionnement en utilisant le développement limité en séries de Taylor d'ordre un, sur la base du modèle dynamique non linéaire. Le modèle linéaire obtenu a été validé avec une erreur de modélisation acceptable en réglage automatique.

Nous avons donné dans une autre étape, la formulation et les concepts de bases de la commande à régime glissant, permettant ainsi de l'exploiter pour la commande du système hydro-thermique. Cependant, cette méthode présente un inconvénient qui est le phénomène de broutement. Ce dernier a été éliminé par l'utilisation d'une forme continue au lieu du terme discontinu dans la loi de commande.

Les résultats obtenus en simulation montrent que cette loi de commande a permis une réduction considérable des perturbations et une bonne poursuite des consignes. En effet, ce qui confirme le caractère robuste de ce type commande à structure variable vis-à-vis les perturbations externes Nous pouvons attester donc, que la commande à régime glissant est robuste, fiable et efficace. Cependant pour accomplir cette tâche, il faudra bien choisir les paramètres et la structure la surface de glissement, qui dépendent énormément des performances désirées, ainsi que les paramètres de la commande du terme discontinu à utiliser. Cela, tout en assurant la stabilité du système bouclé en satisfaisant la condition de convergence.

L'incapacité d'appliquer cette loi de commande en raison de l'indisponibilité de tous les états du système, dans le réglage des deux grandeurs de sorties qui sont le niveau et la température du deuxième réservoir, la synthèse d'un observateur d'état linéaire de Luenberger dans notre cas pour la construction des variables d'états non mesurables qui sont le niveau et la température du premier réservoir s'impose. La matrice des gains de l'observateur est obtenue de la même manière comme pour le calcul de la matrice des gains du correcteur, à condition que les pôles doivent être plus rapide que ceux choisis pour la commande à régime glissant.

Conclusion générale

Dans le but d'améliorer les performances en boucle fermée du système considéré, en matière d'élimination de l'écart statique et de réduction des effets de perturbations, nous avons utilisé une deuxième loi de commande à régime glissant plus performante qui fait intervenir un état supplémentaire en fonction de l'intégrale de l'erreur de sortie dans la surface de glissement.

Nous pouvons conclure, que la deuxième loi de commande à régime glissant développée dans ce travail a permis de répondre à toutes les attentes en matière de réglage en boucle fermée, en termes d'efficacité, de vitesse d'exécution et de robustesse.

Les perspectives que nous pouvons lancer au terme de ce travail, ce résume en trois points principales :

- Concevoir un correcteur et un observateur non-linéaire pour le système réel (SNL), et faire une comparaison avec les résultats obtenus dans le cas linéaire.
- Utiliser la commande quadratique linéaire pour déterminer la surface de glissement pour avoir des résultats améliorés (utilisation des méthodes d'optimisation comme l'algorithme génétique).
- Faire l'étude du système et utiliser les méthodes proposées dans ce mémoire en discret.

Références bibliographiques

- [1] B. Michel, « Chaînes de régulation types », édition Techniques de l'Ingénieur, 1997.
- [2] A. Sayeh, « Commande en réseau des systèmes retardés avec observateur linéaire et simulation sur un moteur électrique « DC » », Mémoire de Magister, Université d'Oran, 11 octobre 2012.
- [3] J. Charles GILLE, « Systèmes et signaux déterministes », 10 avril 1995.
- [4] P. Prouvost, « Instrumentation et régulation en 30 Fiches », Dunod, Paris 2010.
- [5] Société Total, « Maintenance instrumentation : le régulateur et ses fonctions », *Man. Form. EXP-MN-SI070*.2008.
- [6] A. Hubert, « Commande des système dynamique (Introduction à la modélisation et au contrôle des systèmes automatiques) », 2008.
- [7] A. Khelassi, « Cours sur l'Automatisation des Systèmes Industriels », UMBB-Boumerdès, novembre 2014.
- [8] Société Total, « Instrumentation capteur transmetteurs », *EXP-MN-SI050-FR*.2008.
- [9] A. Bsata, instrumentation et automation dans le contrôle des procédés, 2^{ème} édition, 1994.
- [10] M. Sahraoui, « Cours capteurs de température et capteur de niveau », page 15, Université de Mohamed Khider Biskra, 2012-2013.
- [11] Société Totale, « Maintenance et instrumentation : Vannes et actionneurs » *Man. Form. EXP-MN-SI040-FR*.2008.
- [12] Société Totale, « Maintenance mécanique : pompe » *Man. Form. EXP-MN-SM110-FR*.2008.
- [13] E. Hendricks, Jannerup, Sorensen, « Linear systems control », page 36, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2002.
- [14] S. V. Emelyanov, « Variable structure control systems », Moscow Nauka, 1967.
- [15] E. Slotine and A. Coetsee, « Adaptive sliding controller synthesis for non-linear systems », *Int. J. Control*, no. 6, pp. 1631-1651, 1986.
- [16] W. Gao, J. C. Hung, « variable structure control system », *IEEE Trans. Indust. Applic.*, vol. 40, no. 1, pp. 45-55, 1993.

Références bibliographiques

- [17] B. R. Bachir, « Synthèse commande équivalente par mode du glissement par orientation du champ », Génie électrique, école national polytechnique d'Alger, 1994.
- [18] F. Benchabane, « Commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé a aimants permanents avec minimisation du chattring », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Mohammed Khider de Biskra, Algérie, 2005.
- [19] I. Deghboudj, « Commande des systèmes non linéaires par mode glissant d'ordre supérieur », Mémoire de Magister de l'Université de Constantine1, 2013.
- [20] B. NICOLAS, « Contribution à la commande de loi de commutation à l'aide de la théorie des mode glissant », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France 1996.
- [21] F. Thierry , « Contributions a la commande par modes glissants d'ordre supérieur », thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 20 Décembre 2000.
- [22] K. Slotine, J.-J. and Li., « Applied Nonlinear Control », London: Prentice-Hall, Inc. 1991.
- [23] E. Godoy , « Régulation industrielle », Dunod, 2007.