



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département De Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Ingénierie de la maintenance en instrumentation

Thème

**Les techniques d'optimisation appliquées
à la commande de réacteur chimique**

Présenté et soutenu publiquement par :

BOUKAFOUSSA Manel et MEKKI Meroua

Devant le jury composé de :

| Nom et Prénom | Grade | Etablissement | Qualité |
|-------------------------|-------|--------------------------|-----------|
| TITAH Mawloud | MCB | IMSI-Université D'Oran 2 | Président |
| MEKKI Ibrahim El Khalil | MCA | IMSI-Université D'Oran 2 | Encadrant |
| BENFEKIR Abderrahim | MCB | IMSI-Université D'Oran 2 | Examineur |

Année 2023/2024

Dédicace :

Je dédie ce travail avec mes vœux de bonheur et de sante ;

À mes chers parents

À mes sœurs

À mon frère

À mes amis tout a son nom

Et a tous qui ont enseigne mois au long de ma cursus

Un grand merci À moi !

Dédicace :

Avant tout, je tiens à remercier ALLAH, de m'avoir donné la volonté pour terminer ce mémoire.

Je dédie ce modeste travail à toute la famille MEKKI et TAIBI.

À la lumière de mes jours à celle qui a partagé mes joies et mes soucis, et qui a consacré sa vie pour mes études ma mère.

À mon à mon super-héros mon père qui a sacrifié tous ce qu'il pouvait pour nous voir heureux.

*À mes chères sœurs pour tout l'amour quel m'ont apporté et leurs
Encouragement.*

À mon bras droit mes frères.

À mes petits princes et princesses mes neveux et nièces que dieu les garde.

À mon partenaire de vie mon fiancé.

À tous ma belle-famille.

À tous ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin, même s'il s'agit d'un mot d'encouragement et de gentillesse.

Remerciements

Tout d'abord nous remercions dieu tout puissant qui nous a gardé en bonne santé afin de faire ce modeste travail et qui nous a permis de vivre ce bonheur.

Tout nos vifs remerciements vont vers notre encadreur Mr. Mekki Ibrahim El khalil pour ses conseils chaleureux, son encadrement, sa disponibilité et son aide précieuse pour réaliser ce modeste travail, pour cela on l'assure de notre sincère gratitude et notre respect le plus profond.

Nous remercions les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner notre modeste travail.

Merci à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce projet.



Nomenclature :

| Symbole | Description | Unité |
|----------------|--------------------------------------|------------------------|
| A | Surface d'échange | $[m^2]$ |
| A_i | Constituant chimique | - |
| D | Opérateur différentiel | - |
| E | Energie d'activation | $[J/mol]$ |
| F_{AE} | Débit molaire initial | $[mol/s]$ |
| F_A | Débit molaire | $[mol/s]$ |
| F_{ie} | Débit molaire entrant | $[mol/s]$ |
| F_{is} | Débit molaire sortant | $[mol/s]$ |
| H | L'enthalpie | $[J/mol]$ |
| $g(c)$ | Fonction de concentration | - |
| J | Elévation de température adiabatique | $[K]$ |
| K | Constant de la vitesse | $[1/s]$ |
| K_B | Constant de Boltzmann | - |
| L | Distance | $[m]$ |
| N | Ordre de la réaction | - |
| n_i | Nombre de moles à un instant donné | $[mol]$ |
| N_{io} | Nombre de mole initial | $[mol]$ |
| P | Pression | $[Pascal]$ |
| P | La masse volumique | $[kg/m^3]$ |
| Q | Débit volumique | $[m^3/s]$ |
| Q_s | Débit volumique du soutirage | $[m^3/s]$ |
| r_i | Vitesse de la réaction i | $[mole.m^{-3}.s^{-1}]$ |

| | | |
|------------------|--|-------------------|
| R | Constante des gaz parfait | [8.31 J/mol K] |
| R_i | Vitesse de transformation du composé i | [s] |
| τ_c | Temps de refroidissement | [m] |
| S | La section droite du tube | [s] |
| t_R | Temps de réaction | [s] |
| t_{RO} | Temps initiaux de réaction | [m ³] |
| V | Volume | [m ³] |
| V_R | Volume de réacteur | |
| X_i | Le taux de conversion | |
| X_s | Taux de conversion a la sortie | |
| Δ | Opérateur différence | |
| Σ | Opérateur somme | |
| X_e | Taux de conversion à l'entrée | |
| PID | Proportionnelle Intégrale Dérivée | |
| $CSTR$ | Continuos Stirred Tank Reactor | |
| $Z(t)$ | Perturbation | |
| $W(t), Y_c(t)$ | Consigne | |
| $\varepsilon(t)$ | Erreur | |
| $Y(t)$ | La mesure de la variable à réguler. | |
| K_p | Gain proportionnel | |
| T_i | Temps d'intégration | [s] |
| $C(p), H(p)$ | fonction de transfert | |
| T_d | Temps dérivatif seconde | [s] |
| GA | Algorithme génétique (Genetic Algorithm) | |

Résumé :

L'objectif de ce projet est de résoudre un problème d'optimisation d'un réacteur chimique isotherme continu ,ce mémoire porte sur l'adaptation des méthodes d'optimisations Intelligentes pour le réglage du contrôleur PID, avec comme objectif d'avoir une réponse optimale du système contrôlé. Les méthodes d'optimisation que nous utiliserons sont les algorithmes génétiques (GA) et optimisation du loup gris .

La première partie du projet concerne la modélisation du système pour déduire sa fonction de transfert. Le contrôle de la concentration est obtenu par le régulateur PID appliqué sous environnement MATLAB/ SIMULINK. Les paramètres de régulateur PID sont calculés par deux méthodes : GWO et Algorithme Génétique, et en finale on a fait la comparaison entre les résultats obtenus par ces deux méthodes.

المخلص:

الهدف من هذا المشروع هو حل مشكلة تحسين ذاكرة المفاعل الكيميائي متساوي الحرارة المستمر والتي تركز على تكييف طرق التحسين الذكية لضبط وحدة التحكم PID، بهدف الحصول على استجابة مثالية للنظام المتحكم فيه. طرق التحسين التي سنستخدمها هي الخوارزميات الجينية (GA) وتحسين الذئب الرمادي.

الجزء الأول من المشروع يتعلق بنمذجة النظام لاستنتاج وظيفة النقل الخاصة به. يتم الحصول على التحكم في التركيز بواسطة منظم PID المطبق في بيئة MATLAB/SIMULINK. يتم حساب معاملات منظم PID بطريقتين: الذئب الرمادي والخوارزمية الجينية، وفي النهاية قمنا بإجراء المقارنة بين النتائج التي تم الحصول عليها بواسطة هاتين الطريقتين.

Abstract:

The objective of this project is to solve a real-time optimization problem of a perfectly stirred continuous isothermal chemical reactor “Van de Vusse”.

Our focus in this thesis is on adapting Intelligent Optimization methods for PID controller tuning, with the aim of achieving an optimal response from the controlled system. The optimization methods we'll be using are genetic algorithms (GA) and Grey Wolf Optimization.

The first part of the project involves modeling the system to deduce its transfer function.

Concentration control is achieved by the PID controller applied in the MATLAB/SIMULINK environment. The PID controller parameters are calculated by two methods: GWO and Genetic Algorithm, and finally a comparison is made between the results obtained by these two methods.

Table de matière :

| | |
|-----------------------------|-----|
| Dédicace | i |
| Remerciements | ii |
| Nomenclature | iii |
| Résumé | iv |
| Table de matière..... | v |
| Liste des figures | vi |
| Liste des tableaux | vii |
| Introduction générale | 1 |

CHAPITRE1 : Les reacteurs chimiques

| | | |
|--------|---|----|
| 1.1 | Introduction | 3 |
| 1.2 | Les types des réacteurs chimiques..... | 4 |
| 1.2.1 | <i>Réacteurs idéaux</i> | 4 |
| 1.2.2 | <i>Réacteurs à deux phases</i> | 5 |
| 1.2.3 | <i>Réacteurs particuliers</i> | 6 |
| 1.3 | Critères de classification des réacteurs chimiques | 7 |
| 1.3.1 | <i>Selon la nature des phases en présence</i> | 7 |
| 1.3.2 | <i>Selon le mode de fonctionnement</i> | 7 |
| 1.3.3 | <i>En géométrie</i> | 8 |
| 1.3.4 | <i>En régime thermique</i> | 9 |
| 1.4 | Association des réacteurs chimiques | 9 |
| 1.4.1 | <i>Association en série</i> | 9 |
| 1.4.2 | <i>Association en parallèle</i> | 10 |
| 1.5 | Domain d'application des réacteurs chimiques | 10 |
| 1.6 | Forme typique d'un réacteur chimique CSTR..... | 11 |
| 1.7 | Caractéristiques du réacteur chimique CSTR..... | 12 |
| 1.8 | Utilisations du réacteur chimique CSTR | 12 |
| 1.9 | Risques d'emballement thermiques..... | 12 |
| 1.9.1 | <i>Description du phénomène d'emballement thermique</i> | 12 |
| 1.9.2 | <i>Risques thermiques et sécurité des réacteurs</i> | 13 |
| 1.10 | Système chimique..... | 13 |
| 1.10.1 | <i>Définition de la réaction chimique</i> | 14 |
| 1.10.2 | <i>La cinétique chimique</i> | 14 |

| | | |
|--------|--------------------------------------|----|
| 1.10.3 | <i>Les facteurs cinétiques</i> | 14 |
| 1.11 | Choix d'un réacteur..... | 15 |
| 1.12 | Conclusion | 16 |

CHAPITRE2 : Modélisation d'un réacteur CSTR isotherme

| | | |
|-------|---|----|
| 2.1 | Introduction | 18 |
| 2.2 | Modélisation du procédés industriel..... | 18 |
| 2.2.1 | <i>Notion du modèle</i> | 18 |
| 2.2.2 | <i>Le rôle de la modélisation-simulation en génie de procédés</i> | 19 |
| 2.3 | Réacteur isotherme | 19 |
| 2.4 | Modélisation de réacteur continu parfaitement agité CSTR..... | 20 |
| 2.4.1 | <i>Réacteur continu parfaitement agité (CSTR)</i> | 20 |
| 2.4.2 | <i>Réacteur Van de Vusse CSTR</i> | 21 |
| 2.5 | Bilan de matière | 22 |
| 2.5.1 | <i>La forme générale des bilans de matière :</i> | 22 |
| 2.5.2 | <i>Les paramètres opératoires</i> | 22 |
| 2.5.3 | <i>Les bilans de matière :</i> | 23 |
| 2.6 | LINEARISATION DU MODELE MATHEMATIQUE DE CSTR | 24 |
| 2.6.1 | <i>Le calcul du point de fonctionnement ou l'état de l'équilibre (Etape 1)</i> :..... | 24 |
| 2.6.2 | <i>Modèle d'espace d'état (Etape 2):</i> | 26 |
| 2.7 | Le modèle dans le domaine de Laplace | 28 |
| 2.8 | Comparaison entre le système linéaire et non linéaire : | 29 |
| 2.9 | La simulation du réacteur en boucle ouverte : | 30 |
| 2.10 | Conclusion : | 31 |

CHAPITRE3 : Régulateur PID

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1 | Introduction | 33 |
| 3.2 | La Régulation | 33 |
| 3.3 | Éléments constitutifs d'une boucle de régulation | 33 |
| 3.3.1 | <i>Une boucle de régulation :</i> | 33 |
| 3.3.2 | <i>Les types de boucles de régulation :</i> | 34 |
| 3.3.3 | <i>Performances d'une régulation</i> | 34 |
| 3.4 | Le régulateur PID | 36 |
| 3.4.1 | <i>Définition</i> | 36 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 3.4.2 | <i>Description des régulateurs PID</i> | 36 |
| 3.4.3 | <i>Les différentes actions du régulateur PID</i> | 37 |
| 3.4.4 | <i>Structures de PID</i> | 38 |
| 3.4.5 | <i>Les avantages et les inconvénients d'un régulateur PID</i> | 39 |
| 3.5 | Méthode de synthèse du régulateur PID | 39 |
| 3.5.1 | <i>Approche de Ziegler-Nichols pour les systèmes en boucle fermée :</i> | 40 |
| 3.5.2 | <i>Régulation du système par PID avec les paramètres de Ziegler-Nichols</i> | 41 |
| 3.6 | Etude comparative de rejet de perturbation avec régulateur PID | 43 |
| 3.7 | Conclusion | 44 |
| CHAPITRE 4 : Optimisation des paramètres pid de réacteur chimique CSTR | | |
| 4.1 | Introduction | 46 |
| 4.2 | La méthode des loups gris (Grey Wolf Optimization) | 46 |
| 4.3 | Les opérateurs :..... | 47 |
| 4.4 | Étapes générales de l'algorithme GWO..... | 48 |
| 4.5 | Optimisation par GWO :..... | 50 |
| 4.5.1 | <i>Etude de perturbation (GWO)</i> | 51 |
| 4.6 | L'optimisation par l'algorithme génétique (AG)..... | 51 |
| 4.7 | Terminologie | 51 |
| 4.8 | Le principe de fonctionnement d'un GA | 52 |
| 4.9 | Les Opérateurs | 53 |
| 4.9.1 | <i>L'opérateur de sélection</i> | 53 |
| 4.9.2 | <i>L'opérateur de croisement</i> | 53 |
| 4.9.3 | <i>L'opérateur de mutation</i> | 54 |
| 4.9.4 | <i>Le codage</i> | 54 |
| 4.10 | La fonction d'évaluation ou objective (Fitness) | 55 |
| 4.11 | Régulation du système par régulateur PID optimisé par AG | 55 |
| 4.11.1 | <i>Etude de perturbation(AG) :</i> | 56 |
| 4.12 | Comparaison PID Z-N, PI GWO et PID AG | 57 |
| 4.13 | Conclusion | 58 |
| 5 | Conclusion generale | 59 |
| 6 | Bibliographie | 60 |

Liste des figures :

| | |
|--|----|
| Figure1.1: Réacteur chimique sous son aspect réel | 3 |
| Figure 1.2: Réacteur parfaitement agité CSTR | 5 |
| Figure 1.3: Schéma des différents types de réacteurs | 8 |
| Figure1.4: Schéma d'un réacteur tubulaire..... | 9 |
| Figure1.5: Schéma d'un réacteur étagé..... | 9 |
| Figure 1.6: Association des réacteurs en série | 10 |
| Figure 1.7: Associations des réacteurs en parallèle | 10 |
| Figure1.8: Forme typique d'un CSTR | 12 |
| Figure 2.1: Logigramme pour la modélisation_simulation d'un processus..... | 19 |
| Figure 2. 2: Réacteur CSTR (Continious_Stirred Tank Reactor) | 20 |
| Figure 2. 3: Schéma d'un réacteur van de vusse..... | 21 |
| Figure 2. 4: Comportement des concentrations du réacteur..... | 25 |
| Figure 2. 5: Schéma Simulink du réacteur CSTR linéaire et non linéaire | 29 |
| Figure 2. 6: Comparaison entre le système linéaire et non linéaire. | 29 |
| Figure 2. 7: Schéma simulink du réacteur en boucle ouverte..... | 30 |
| Figure 2. 8: Evaluation de la concentration C_b du réacteur en boucle ouverte..... | 30 |
| Figure3. 1: Représentation fonctionnelle d'une boucle de régulation | 50 |
| Figure3. 2: Système en boucle ouverte. | 34 |
| Figure3.3: Système en boucle fermée. | 34 |
| Figure3. 4: Systèmes instables dont la sortie diverge ou oscille sans se stabiliser | 35 |
| Figure3. 5: Systèmes stables dont les sorties vers une valeur | 35 |
| Figure3. 7: Rapidité de deux systèmes apériodiques | 36 |
| Figure3. 8: Schéma fonctionnel du régulateur PID | 37 |
| Figure3. 9: Réponse d'un système par méthode d'oscillation (Ziegler-Nichols)..... | 40 |
| Figure3. 10: Réponse du système par différentes configurations avec Ziegler-Nichols..... | 42 |
| Figure3. 11 : Schéma bloc du système avec perturbation..... | 43 |
| Figure3. 12: Réponse de rejet de perturbation par régulateur PID avec (Z_N) | 44 |
| Figure4. 1: Mécanisme de positionnement de l'agent de recherche | 48 |

| | |
|---|----|
| Figure4. 2: Organigramme de la méthode GWO. | 49 |
| Figure4. 3: L'optimisation d'un régulateur PI par GWO pour un système CSTR | 50 |
| Figure4. 4 : Réponse du système avec régulateur PI optimisé par GWO | 50 |
| Figure4. 5 : Réponse de rejet de perturbation par régulateur PI avec GWO | 51 |
| Figure4. 6: Le principe de l'algorithme génétique | 52 |
| Figure4. 7: Le tournoi entre deux individus avec rééligibilité | 53 |
| Figure4. 8: Croisement par deux points | 54 |
| Figure4. 9: Exemple d'une mutation en un point dans une chaîne binaire..... | 54 |
| Figure4. 10: Schéma illustre l'optimisation d'un régulateur PID par AG pour un système ... | 55 |
| Figure4. 11: Réponse du système avec régulateur PID optimisé par AG | 56 |
| Figure4. 12: Réponse de rejet de perturbation par régulateur PID avec AG | 56 |

Liste des tableaux :

| | |
|---|----|
| Tableau 1. 1: Classification des réacteurs avec différents mode d'opérations..... | 11 |
| Tableau 2. 1: Condition initiale à l'état d'équilibre | 26 |
| Tableau 2. 2: Les paramètres de réacteur van de vusse | 28 |
| Tableau 3. 1: Différentes structure des régulateur PID..... | 38 |
| Tableau 3. 2: Les avantages et les inconvénients d'un régulateur PID | 39 |
| Tableau 3. 3: Paramètres de conception de contrôleurs P,PI,PID avec Ziegler-Nichols..... | 41 |
| Tableau 3. 4: Paramètre calculés des contrôleurs P, PI, PID avec Ziegler Nichols..... | 41 |
| Tableau 3. 5: Les performances de régulateur PI-ZN..... | 42 |
| Tableau4. 1 : Les performances de régulateur PI GWO | 50 |
| Tableau4. 2: Les performances de régulateur PID AG | 56 |
| Tableau4. 3: Comparaison des performances de PID Z-N, PI GWO et PID AG | 57 |

Introduction générale

Introduction générale :

La production dans l'industrie chimique repose depuis longtemps sur l'expérience, mais en raison de raisons économiques, on a tendance à éviter de réaliser ou de se lancer dans des expériences coûteuses. Il est devenu indispensable d'utiliser des méthodes de simulation qui utilisent des modèles mathématiques pour prédire les liens entre les modifications des paramètres expérimentaux ou de production et les résultats observés dans la pratique.

Dans ce mémoire, on présente comment modéliser et régler un réacteur chimique. En effet les réacteurs chimiques sont les unités les plus influents et les plus importants dont les chimistes pourraient trouver pour assurer les opérations successives.

Notre travail s'intéresse particulièrement à l'étude d'un réacteur parfaitement agité isotherme continu (CSTR), ce dernier fonctionne à une température constante. Ce système est complexe, il est toujours difficile pour l'ingénieur de le contrôler à cause de son comportement non linéaire.

Dans le premier chapitre on va donner un bref rappel sur les différents types des réacteurs chimiques avec la concentration sur la présentation du réacteur chimique CSTR.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation d'un réacteur isotherme appelé Van de Vusse non linéaire et linéarisation des systèmes ou tour de point de fonctionnement est présenté avec une fonction de transfert qui nous permet de simuler le comportement du système et le contrôler par des différentes types de régulateur

Le troisième chapitre nous présenterons des généralités sur le régulateur PID ses aspects fonctionnels et leurs principes de fonctionnement, puis nous citons les différentes méthodes de synthèse d'un régulateur P, PI, PID parmi les méthodes nous avons cité la méthode de Ziegler -Nichols. Une comparaison des résultats de performance du système obtenus par simulation.

Dans le dernier chapitre, on va présenter l'approche d'optimisation basée sur les algorithmes génétiques et optimisation du loup gris qui seront utilisée pour l'amélioration des performances du régulateur PID et de la technique de commande du CSTR.

Chapitre 1 :

Les réacteurs chimiques

1.1 Introduction

Un réacteur industriel est un dispositif qui permet de réaliser une conversion chimique ou biochimique afin de transformer des composants moléculaires en d'autres composants. Toutefois, cette idée est restreinte aux situations où la transformation est réalisée.

Avec pour but de générer une ou plusieurs substances chimiques préétablies. Le terme "réacteur chimique" est souvent utilisé dans une installation industrielle pour désigner un ensemble de produits industriels tels que des pompes, des vannes, des réservoirs, des échangeurs de chaleur, des chaudières, etc. Ces éléments, situés en amont et en aval, facilitent le traitement physique des réactifs et des produits des réactions en cours [BOU11].

Tous réacteurs doivent répondre aux conditions principales suivantes :

- Assurer un rendement élevé.
- Fournir un taux de transformation le plus grand possible dans les conditions de sélectivité maximale du procédé.
- Consommer une énergie minimale pour le transport et l'agitation des réactifs.
- Être suffisamment simple et peu cher.
- Utiliser au mieux la chaleur des réactions exothermiques et la chaleur amenée de l'extérieur pour les processus endothermiques.
- Avoir un fonctionnement sûr.
- Présenter la mécanisation la plus complète possible et permettre un contrôle automatique du procédé [BEN20]



Figure1.1: Réacteur chimique sous son aspect réel

1.2 Les types des réacteurs chimiques

1.2.1 Réacteurs idéaux

A. Réacteurs monophasiques discontinus

Un réacteur monophasique discontinu est un dispositif simple qui peut être utilisé pour traiter de petites quantités de produits coûteux ou pour des recherches et des avancées. Son fonctionnement ponctuel est relativement coûteux. La charge initiale du réacteur est constituée de réactifs. Au cours de la réaction, la matière n'est pas échangée avec l'extérieur. Les produits sont prélevés à la fin de la procédure. Le mode de fonctionnement est interrompu [TRA02].

• Les avantages :

- Facilité d'utilisation
- Diverses fonctionnalités.
- Convient aux corps solides, liquides et gazeux.

• Les inconvénients : [web1]

- Faible performance globale
- Coût de fonctionnement élevé
- Variabilité de la qualité finale
- Surveillance accrue

B. Les réacteurs en continu

Ce système ne concerne que les réacteurs ouverts. Les paramètres restent stables, la variable temps s'éteint. Il est également dit que le réacteur fonctionne en permanence. Il s'agit du régime le plus captivant dans le domaine de l'industrie.

• Les avantages :

- Performance énergétique améliorée
- Coût de fonctionnement réduit
- Qualité finale constante
- Possibilité d'automatisation

• Les inconvénients

- La fiabilité de chaque équipement est plus sensible.
- Il est peu adapté aux solides et aux pâtes.
- Il manque également de flexibilité (changement de produits) [web1]

C. Réacteur tubulaire à écoulement piston

Le réacteur à écoulement piston représente parfaitement le réacteur tubulaire réel, où le mélange réactionnel se déplace en faisant une tranche parallèle [red17]

- **Les avantages :**

- Mécaniquement simple
- Les tubes sont faciles à nettoyer

- **L'inconvénient :**

- Température du réacteur difficile à contrôler [BEN20]

d. Réacteur continu parfaitement agité

Un réacteur de ce type (figure 1.1) est principalement constitué d'une cuve équipée d'un système d'agitation, d'une tubulaire d'alimentation et d'une tubulaire de soutirage.

Un réacteur parfaitement agité fonctionne de manière simple, en supposant que les variables intensives telles que la concentration ou la température ont la même valeur à chaque point de l'appareil [red17]

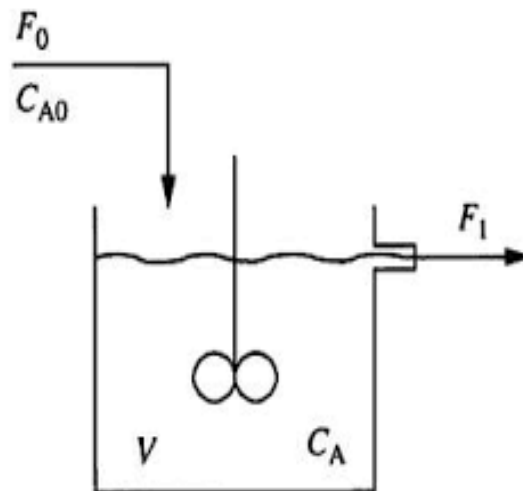


Figure 1.2:récteur parfaitement agité CSTR

1.2.2 Réacteurs à deux phases

a). Réacteurs catalytiques

Les réacteurs catalytiques sont les plus couramment utilisés parmi les réacteurs polyphasiques. Ils se caractérisent à la fois par la manière dont ils sont chauffés, le mode de fonctionnement (continu, périodique, cyclique), la nature du catalyseur (solide, liquide), ainsi que le processus de récupération ou de régénération [MEN20].

b). Réacteurs à lit fixe

Un réacteur de type lit fixe est un réacteur à écoulement piston. La structure des réacteurs à lit fixe est cylindrique avec des têtes convexes. Ils sont généralement verticaux. Les réactions catalytiques hétérogènes sont principalement utilisées avec ces agents. Les réactifs réagissent en contact avec les pastilles de catalyseur, ce qui entraîne la formation de produits qui sont ensuite éjectés du réacteur vers le fond.

Dans cette situation, les réactifs se déplacent dans le réacteur grâce à la force de gravité autour du lit de catalyseur [jea05].

Le réacteur à lit fixe comporte plusieurs désavantages

- **Les inconvénients :**

- Coût élevé

- Il est nécessaire de prendre plusieurs réacteurs en parallèle pour les grandes usines.

- Faible facteur d'efficacité à cause de la nécessité de grande particule de catalyseur pour éviter une chute de pression élevée dans le tube de réacteur.

- Faible transfert de chaleur du lit de catalyseur et variation de température dans les tubes.

- **Les avantages :**

- Facile à construire

- Plus de contact entre le réactif et le catalyseur

c). Réacteur à lit mobile

Un réacteur à lit mobile est un réacteur dans lequel une couche de catalyseur sous forme de granulés est déplacée entre une zone de réaction et une zone de régénération. Il peut être coûteux [jea05].

d). Réacteur à lit fluidisé

Les réacteurs à lit fluidisé sont les plus utilisés dans les industries de transformation du pétrole et des produits chimiques. L'apport de matière première est introduit et se déplace à travers des particules chauffées par introduction de gaz sous pression au fond du réacteur.

- **Les avantages :**

- Contrôle de la température et transfert de chaleur au cours des réactions

- Limite la vitesse de la réaction.

- Grâce à la fluidisation on obtient un meilleur mélange des particules

1.2.3 Réacteurs particuliers

a. Réacteur isotherme

Dans ce type de réacteurs, la localisation de la surface d'échange thermique dépend souvent des variations d'apparence. Par conséquent, il est possible d'effectuer l'échange thermique : à l'intérieur du réacteur ; à travers les parois du réacteur ; à l'extérieur du réacteur [TRA84].

b. Réacteur adiabatique

Souvent observés dans le domaine industriel, ils ne sont qu'un cas spécifique du cas général, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de surface d'échange entre le réacteur et le milieu extérieur, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de transfert de chaleur entre le réacteur et le milieu extérieur [TRA84].

1.3 Critères de classification des réacteurs chimiques :

1.3.1 Selon la nature des phases en présence

a) Réacteurs monophasiques : où le mélange réactionnel (considéré homogène) est alors sous forme d'une seule phase qui peut être gazeuse ou liquide.

b) Réacteurs polyphasiques : appelés aussi réacteurs hétérogènes, le mélange Réactionnel est constitué de plusieurs phases. On distingue deux types de mélanges :

1- Mélanges polyphasiques composés de trois phases : Gaz + Liquide + Solide.

2- Mélanges polyphasiques composés de deux phases appelés aussi mélanges

Biphasiques [BOU11].

1.3.2 Selon le Mode de fonctionnement

Ce critère est fixé par les exigences pratiques de l'exploitation du processus chimique. Nous avons deux modes de fonctionnement.

a. En continu :

Les appareils fonctionnant en continu, qualifiés de systèmes ouverts, sont dotés d'une ou plusieurs entrées pour introduire les réactifs, et d'une ou plusieurs sorties par lesquelles les produits de la transformation sont évacués.

Ainsi, il est possible de caractériser les deux modes d'opération définis ci-dessus par le fait que le système discontinu opère d'une manière non stationnaire, alors que le système continu est généralement conçu pour travailler en régime stationnaire.

b. En discontinu :

On qualifie parfois ces appareils de systèmes fermés, car durant le laps de temps pendant la réaction se déroule il n'y a pas de flux de matière entrant ou sortant du système; ce type d'appareil a la faveur des industriels pour les opérations jugées très délicates et les petites productions.

c. En semi continu :

Dans certains systèmes polyphasiques, on trouve des régimes en semi continu. Une opération est dite en semi-continu lorsqu'il y a chargement des matières premières et vidange de l'appareil de manière périodique, mais il y a évacuation continue d'un produit ou sous-produit de telle sorte que pendant une période relativement longue, on peut rajouter de nouvelles quantités de matières premières.

Le réacteur en semi-continu ne diffère de la marche en discontinu que par les appareils annexes [MEN20].

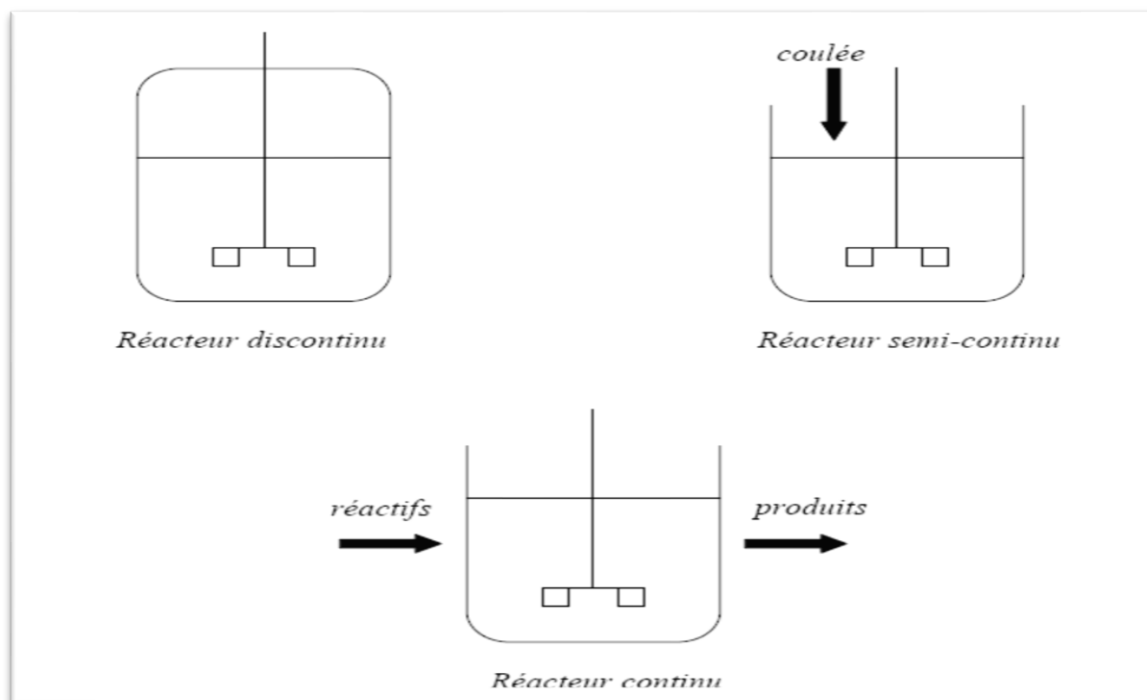


Figure 1.3: Schéma des différents types de réacteurs

1.3.3 En géométrie

On distingue deux grandes catégories de réacteurs :

a. Le réacteur agité : (« Stirred Tank » en anglais) est une cuve dans laquelle un fluide est agité à l'aide d'un système mécanique constitué d'un arbre en rotation supportant un agitateur. Les réacteurs agités sont exploités en mode continu et discontinu.

b. Le réacteur tubulaire : (« Tubular Reactor » en anglais) est simplement constitué d'une canalisation, en général assez longue (jusqu'à plusieurs dizaines de mètres). Il est par nature exploité en mode continu [MEN20].

Parmi les principaux avantages des réacteurs tubulaires sont :

- Les polymérisations peuvent être poussées jusqu'à des taux de conversion très élevés.
- La qualité du produit varie faiblement.
- Le rapport surface sur volume y est important, ce qui est un atout dans le contrôle et la régulation de la température.
- Il est possible de programmer la température le long du tube afin d'obtenir des polymères aux propriétés spécifiques.

Malgré tous ces avantages ce type de réacteurs présente quelques défauts. En effet, l'hypothèse d'un écoulement purement piston n'est pas toujours applicable pour des solutions très visqueuses de polymère [BEN20].

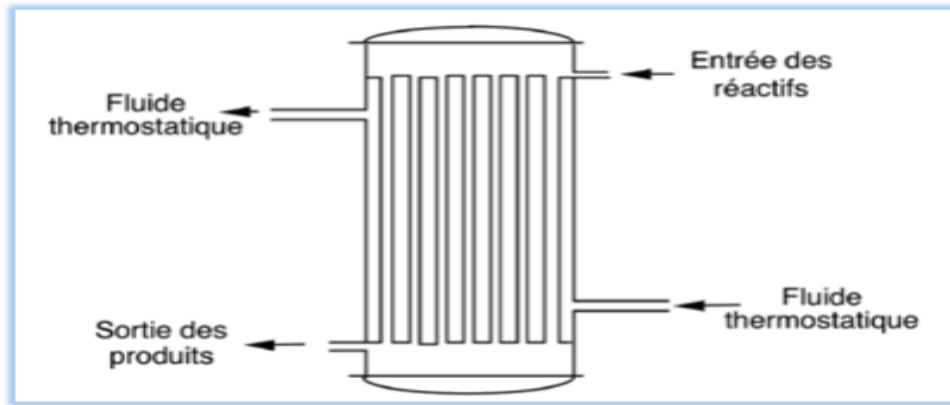


Figure1.4: Schéma d'un réacteur tubulaire

Un cas intermédiaire entre ces deux modèles idéaux est ce qu'on appelle réacteur étagé, constitué par une série de zones parfaitement agitées. Au lieu d'avoir une brusque discontinuité moindre à l'entrée de chacune des zones parfaitement agitées [BEN20].

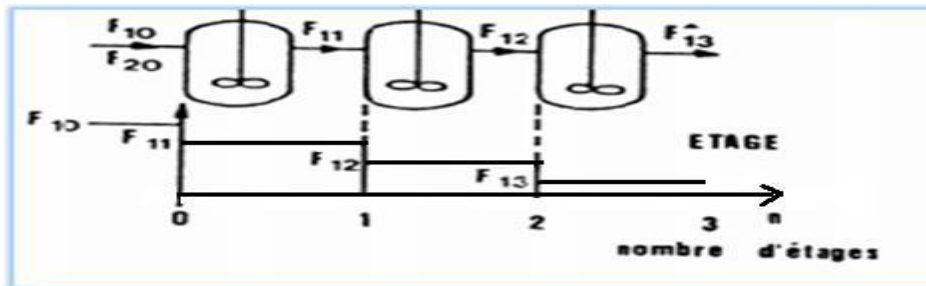


Figure1.5: Schéma d'un réacteur étagé

1.3.4 En régime thermique

a. Réacteur isotherme : est réalisé si l'on utilise un réacteur continu parfaitement agité en régime stationnaire, alors que c'est un cas limite idéal dès lors que l'on considère un réacteur du type tubulaire. Là encore, l'assimilation d'un cas pratique à un réacteur tubulaire idéal et isotherme peut parfois constituer une approximation acceptable.

b. non isotherme : correspond à une température de fonctionnement variable au cours du temps. Utilisé dans le cas de la mise en marche d'un réacteur agité continu et dans le cas d'un réacteur agité discontinu.

c. Réacteur adiabatique : constitue par contre simplement un cas particulier du cas général correspondant à une surface d'échange nulle [MEN20].

1.4 Association des réacteurs chimiques

Association des réacteurs chimiques est de les disposer en parallèle ou en série.

1.4.1 Association en série

L'association des réacteurs en série permet une intervention extérieure entre chaque réacteur. Dans cette association, chaque réacteur de la cascade fait progresser l'avancement de la réaction.

L'ajout des réacteurs en série n'accroît pas la capacité de production mais permet d'augmenter le temps de passage, donc la conversion [CHE17].

Soit la série de « n » réacteurs de même type associés en série suivante :

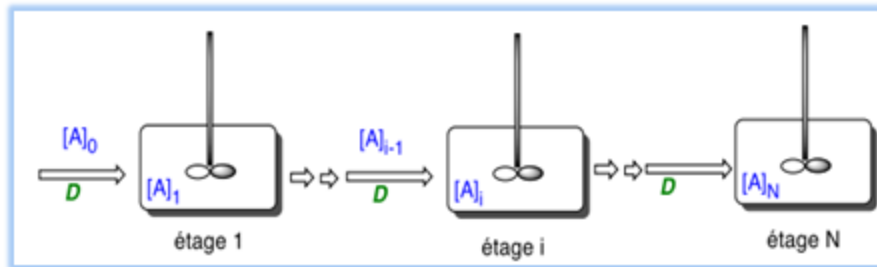


Figure 1.6: Association des réacteurs en série

1.4.2 Association en parallèle

Association des réacteurs en parallèle vise à augmenter la capacité de production de la section rationnelle. Soit l'association de « n » réacteurs continus de même type en parallèle suivante :

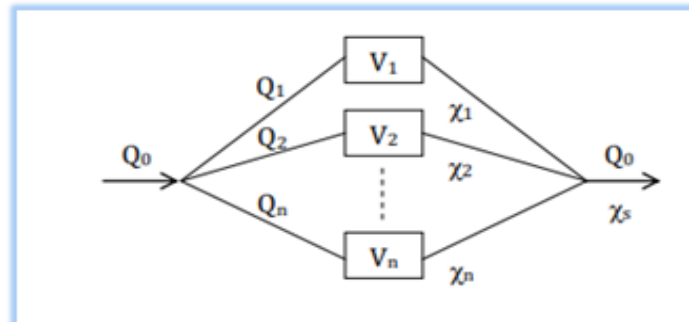


Figure 1.7: Associations des réacteurs en parallèle

- Cette association ne permet pas d'augmenter le taux de conversion mais elle est particulièrement intéressante :
- Lorsque la vitesse de réaction est lente.
- Lorsque la conversion que l'on peut obtenir est faible [CHE17].

1.5 Domain d'application des réacteurs chimiques :

La plupart des réacteurs industriels fonctionnent en mode continu au lieu du mode discontinu car les réacteurs continus produisent plus de produits avec un matériel plus léger, qui exige moins de main d'œuvre et d'entretien, et fréquemment produit une qualité supérieure de contrôle.

Il est plus compliqué de démarrer et d'arrêter les processus continus par rapport aux réacteurs batch, mais ils permettent d'élaborer les produits sans cesse pour changer les batch et nécessitent un minimum de main-d'œuvre. Il est possible d'adapter les processus discontinus afin de produire des petites quantités du produit si nécessaire.

Il est également parfait d'utiliser des processus discontinus pour évaluer les taux et les cinétiques afin de modéliser les processus continus : seul un seul souhaite obtenir rapidement les informations sans produire plusieurs produits qui seront ensuite éliminés.

Dans les produits pharmaceutiques, il est parfois nécessaire d'utiliser des processus discontinus afin de garantir la qualité du contrôle :

Chaque lot peut être examiné et approuvé ou rejeté lors de la contamination, ce qui entraîne inévitablement la production de nombreux produits inutiles avant que la pureté certifiable est restaurée.

La nourriture et les boissons sont encore fabriqués dans les processus discontinus dans des situations nombreuses parce que réactions biologiques sont jamais vraiment reproductibles.

Les types des réacteurs sont montrés dans le tableau 1.1 [MEN20]

Tableau 1. 1: Classification des réacteurs avec différents mode d'opérations

| Phase en présence | | Mode d'opération | | | |
|-------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | | Discontinu | Continu | | |
| | | | Tubulaire | Agité | Parfaitement agité |
| Une seule phase liquide | Liquide | Polymérisation | Production durée | Polymérisation | Estérification |
| | Gaz-liquide | Fermentation | Absorption de polluants | Oxydation des hydrocarbures | Traitement biologique d'eaux |
| Deux phases fluides | Liquide-liquide | Sulfonation d'aromatique | Hydrolyse d'esters | Polymérisation en émulsion | Nitration d'aromatique |
| | Fluides +solide catalyseur | Hydrogénation | Lit fixe Lit mobile Reformage | Lit fluide à étages | Lit fluide cracking catalytique |
| Fluides + solides | | Régénération de catalyseurs | Lit mobile Haut fourneau | Lit fluide grillage de minerais | Combustion en lit fluidisé |

1.6 Forme typique d'un réacteur chimique CSTR

Un réacteur à cuve agité (figure 1.8) est un réacteur batch équipé d'un impulseur ou un autre instrument de mixage afin de fournir un mixage efficace, dans le génie chimique le nom CSTR est souvent utilisé pour référer un réacteur à réservoir agité idéalisé utilisé pour modéliser les variables de fonctionnement requises afin d'atteindre une sortie spécifiée [MEN20].

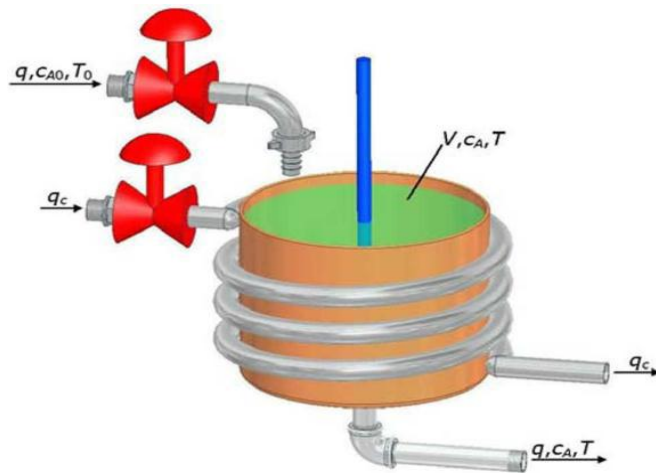


Figure1.8: Forme typique d'un CSTR

1.7 Caractéristiques du réacteur chimique CSTR

Les caractéristiques principales d'un réacteur continu parfaitement agité (CSTR) sont :

- Il peut travailler à toute température et à forte pression.
- Le fonctionnement auto thermique peut présenter un énorme avantage, puisqu'il permet d'éliminer un échange de chaleur et d'utiliser directement la chaleur produite par la réaction.
- L'uniformité de la température et de la concentration pour l'ensemble du volume réactionnel peut apporter un certain avantage.
- Ces systèmes sont bien adaptés pour réaliser des réactions en phase liquide, dont la vitesse est modérée ou faible.
- Comme le temps de réaction est déterminé par le temps de séjour du mélange réactionnel dans le réacteur. Le réacteur parfaitement agité se situe dans une gamme des temps de séjour facile à réaliser entre 10mn et 4h [MEN20] .

1.8 Utilisations du réacteur chimique CSTR

Les réacteurs à cuve agitée sont généralement utilisés dans les processus de traitement des eaux usées. Les CSTR facilitent des taux de dilution rapides qui les rendent résistants aux déchets d'acides gras volatils à pH élevé et à pH faible. Les CSTR sont moins efficaces par rapport à d'autres types de réacteurs, car ils nécessitent des volumes de réacteur plus importants pour atteindre la même vitesse de réaction que d'autres modèles de réacteurs tels que les réacteurs à écoulement piston [MEN20].

1.9 Risques d'emballement thermiques

1.9.1 Description du phénomène d'emballement thermique

L'emballement d'un réacteur survient lorsque son système de refroidissement ne parvient plus à évacuer la chaleur produite par la réaction chimique. La température augmente, alors cette augmentation non contrôlée provoque une accélération de la réaction, qui à son tour augmente la puissance thermique de la réaction. Dans la mesure où cette

dernière augmente exponentiellement avec la température, tandis que la puissance de refroidissement n'augmente que linéairement, la température du milieu réactionnel va croître de plus en plus rapidement : c'est l'emballement de la réaction qui peut mener à des situations extrêmement graves.

Ce phénomène d'emballement est un problème qui concerne principalement les réacteurs fermés et tubulaires, puisqu'ils contiennent au début de la réaction une quantité énorme d'énergie sous forme de réactifs. Les réacteurs continus de type cuve agité, ainsi que les réacteurs semi-ouverts, ne sont concernés par ce point que dans une moindre mesure, car les réactifs ne sont généralement présents qu'en faibles concentrations résiduelles au sein de la cuve. Le principal danger d'un emballement de température est l'amorçage, notamment des réactions de décompositions des réactifs ou des produits. Ce type de réactions est très exothermique, c'est-à-dire qu'il produit une très grande chaleur.

De plus, les réactions de décompositions produisent en grande partie des gaz. Ces gaz sont dangereux pour deux raisons :

La première consiste en une augmentation de la pression dans le réacteur, augmentation qui peut conduire à l'explosion du réacteur.

La deuxième raison de la dangerosité des gaz est leur possibilité d'inflammation, notamment si la surpression dans le réacteur conduit à un dégagement via une rupture dans l'étanchéité du réacteur. [MAR13]

1.9.2 Risques thermiques et sécurité des réacteurs

Les catastrophes industrielles sont causées par des réactions chimiques, en raison des puissances énergétiques qu'elles nécessitent. En cas de conduite non contrôlée, elles peuvent provoquer des explosions qui peuvent causer des décès. L'accident survient généralement lorsque le volume de chaleur produit dans le milieu réactionnel dépasse le volume de chaleur évacuable vers l'extérieur. Ceci provoque une accumulation d'énergie par une hausse de température et de pression, ce qui peut provoquer l'explosion.

L'énergie libérée par les réactions chimiques ne pose pas nécessairement de problèmes de sécurité au laboratoire, mais se manifeste plus tard lors du passage à l'échelle industrielle. La sécurité des processus chimiques concerne notamment les réacteurs.

1.10 Système chimique

Un système chimique est un ensemble d'espèces chimiques (molécules, atomes ou ions) qui peuvent interagir entre eux. L'état d'un système chimique précis par :

- L'état physique (Gaz (G), solide(S) et liquide(L)).
- La température.
- La pression.
- La quantité de matière et des espèces chimiques et l'évolution d'un système est modélisée par réaction chimique.

1.10.1 Définition de la réaction chimique

La réaction chimique est la transformation d'espèces chimiques en d'autres espèces chimiques, dans laquelle la réaction conserve les éléments chimiques et la charge électrique totale, autrement dit les noyaux des éléments chimiques ne sont pas modifiés, seuls participent les électrons des niveaux externes des atomes [OUL21].

1.10.2 La cinétique chimique

La cinétique chimique est l'étude des éléments qui influencent les taux de réaction chimique et l'évaluation des systèmes chimiques dans le temps lors d'un passage de l'état initial à l'état final, sans passer par un processus instantané.

La cinétique chimique permet d'établir les lois d'avancement des réactions, qui dépendent du temps de séjour des réactifs dans le réacteur. Ce paramètre de temps est essentiel pour évaluer le volume réactionnel nécessaire pour réaliser une transformation chimique jusqu'à un certain stade [BEN20].

a. Vitesse de réaction

La vitesse d'une réaction est la dérivée par rapport au temps de l'avancement de la réaction chimique, sa vitesse de disparition est égale à l'opposé de sa vitesse de formation.

$$V_r = \frac{dn}{dt} \quad (1.1)$$

b. vitesse de disparition :

$$v_{rd} = \frac{-dn}{dt} \quad (1.2)$$

c. vitesse de formation :

$$v_{rf} = \frac{dn}{dt} \quad (1.3)$$

Unité de vitesse de réaction(mol/s)

1.10.3 Les facteurs cinétiques

Les paramètres qui agissent sur l'évolution d'un système chimique sont :

- Les concentrations des réactifs.
- La température du milieu.
- L'éclairement.
- La présence des catalyseurs.

a). Facteur de concentration

L'influence de la concentration sur la vitesse de la réaction est une relation directe, lorsque la concentration des réactifs augmente automatiquement la vitesse augmente.

Il a été constaté expérimentalement que dans le cas d'une réaction mettant en jeu un catalyseur solide, la vitesse de réaction sera définie comme une masse de réactif consommée

par unité de temps et de masse de catalyseur, donc la vitesse s'exprime en fonction des concentrations des réactifs A et B [BEN20].

Si on considère l'équation stœchiométrique dans le cas général : $aA + bB \rightarrow cC + dD$

On peut écrire : $r_a = \frac{-1}{a} \frac{dc_A}{dt} = k C_A^n C_B^m$

- K : constante de vitesse de la réaction.
- n, m : ordres partiels par rapport aux réactifs A et B.

b). Facteur de température

L'influence de la température sur la vitesse de la réaction obéit à une relation directe, est une fonction exponentielle avec la température.

La constante de vitesse K d'une réaction dont l'unité dépend de l'ordre de la réaction, varie avec la température, en première approximation selon la loi d'Arrhenius [BEN20].

$$K = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

K : Constante de vitesse de la réaction.

k_0 : Facteur de fréquence.

E : Energie d'activation de la réaction (j/mol).

R : Constante des gaz parfait (=8.314 j/mol.k ou 2cal/mol.k).

T : Température (k).

Il est souvent préférable d'utiliser la relation d'Arrhenius sous une forme différente :

$$K_T = K_{T_0} \exp\left(\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right)$$

T_0 : Température à l'entrée du réacteur ou au début de la réaction, température moyenne du fluide de refroidissement...etc.

1.11 Choix d'un réacteur

Afin de choisir le meilleur réacteur possible pour réaliser une réaction donnée (spécifique), il faut d'abord tenir les facteurs essentiels qui peuvent être :

- Le taux de conversion d'un réactif donné.
- Le rendement en produit cherché.
- La maximisation de la capacité de production, le coût d'investissement.
- La minimisation de la formation d'une impureté très difficile à séparer, ou susceptible de créer des problèmes (pour la sécurité, l'environnement, sa destruction, etc..)
- La sécurité de fonctionnement, c'est-à-dire la qualité du produit obtenu et le tonnage demandé autrement dit qu'un fort tonnage favorisant le choix d'un réacteur fonctionnant en continu, et vice versa.
- La nature des réactifs et des produits de la réaction, le type de réaction entre deux phases liquides, entre gaz-liquide, entre des solides fondus, ...etc.
- La gamme de température et pression.
- La quantité de chaleur.

- Le choix d'un réacteur peut influencer fortement les grandeurs auxquelles on veut accorder une priorité :
- Taux de conversion, sélectivité, volume et coût des appareils. [RAH11]

1.12 Conclusion

Ce chapitre présente une analyse bibliographique non exhaustive assez générale sur les Réacteurs chimiques. Différents types des réacteurs chimiques ainsi que leurs critères de classification ont été présentés. Le réacteur parfaitement agité dont on s'intéresse dans ce travail a été présenté. La modélisation du réacteur facilitera la bonne compréhension de comportement du réacteur afin de mettre les lois de commande.

Chapitre 2 :

Modélisation d'un réacteur CSTR
isotherme

2.1 Introduction

La modélisation des réacteurs chimiques isothermes occupe une place très importante dans la recherche scientifique et l'industrie chimique, car dans de nombreux cas d'expériences irréalisables ou trop chers donc on fait recours à la technique de modélisation qui permettra de déduire les résultats. En d'autres termes la modélisation est une méthode pour étudier le comportement d'un système (dans ce cas de réacteur) à l'aide d'un modèle qui est une représentation à l'abstrait du système.

Dans ce chapitre, on représente premièrement les notions de modélisation. Ensuite nous allons faire l'étude à la modélisation de notre modèle de réacteur (réacteur parfaitement agité continu isotherme CSTR). Pour réaliser cette modélisation, il faut d'abord donner une description détaillée du réacteur CSTR. On fait le bilan massique et la linéarisation de notre modèle de réacteur mathématiquement sans régulation, enfin on va mettre une stratégie de régulation en boucle ouverte qui va permettre de stabiliser la concentration du réacteur autour du point de fonctionnement.

2.2 Modélisation du procédés industriel

La modélisation est la représentation d'un système par un autre plus facile à comprendre. On peut encore définir la modélisation comme une technique d'identification qui consiste à construire un modèle d'un système réel, c'est-à-dire l'expérimentation indirecte sur un modèle et non sur un système lui-même, Cette technique peut prendre des différentes formes telles que la modélisation mathématique, physique ou graphique. Elle est nécessaire à l'étude, la réalisation et le contrôle des systèmes ou des unités industrielles. [BEN20]

En génie des procédés, la modélisation consiste à un ensemble d'équations mathématiques construit sur la base de données expérimentales et permettant de représenter les relations entre les sorties et les entrées du système [Xu09].

2.2.1 Notion du modèle

Un modèle est une structure formalisée pour rendre compte d'un ensemble de phénomènes à l'aide d'une représentation mathématique-physique ou graphique. Donc la modélisation est une combinaison entre les connaissances acquises sur la physique et la chimie du système (rôle du physicien). Elle est la capacité de résoudre les équations résultant de cette analyse (rôle du mathématicien).

- Pour modéliser un procédé chimique, on dispose plusieurs possibilités parmi les différents types de modèles :

A. Modèle phénoménologique Ce modèle est basé sur les principes physico-chimiques de conservation de matière de la quantité de mouvement et du bilan d'espèces.

B. Modèle mathématique Le modèle mathématique prend en compte des termes différentiels caractéristique du comportement dynamique du réacteur, cet outil donne alors accès à l'évolution, au cours du temps, des différentes variables du réacteur (concentration, température) [Xu09], [BEN20]

C. Modèles empiriques

Les modèles empiriques sont décrits sur la base d'expérience et ils sont souvent employés en automatique. Ils décrivent en temps continu ou discret le comportement dynamique des systèmes concernés.

Les modèles empiriques doivent faire l'objet d'une identification de leurs propres paramètres pour reproduire un comportement plus proche au comportement réel du système modélisé. Parmi ces modèles, le modèle entrée-sortie est le modèle qui consiste la relation linéaire entre l'entrée et la sortie des systèmes [BEN20].

2.2.2 Le rôle de la modélisation-simulation en génie de procédés

Les techniques de modélisation-simulation dans le domaine des procédés représentent des simplifications qui permettent une meilleure analyse du procédé grâce à des modèles. Le modèle mathématique permet d'approcher la compréhension de système par la résolution des relations mathématiques entre les entrées et sorties du système [EDU12].

La simulation représente un système réel pour effectuer des expériences, il s'agit d'utiliser des logiciels pour la programmation des modèles analytiques ou descriptifs et leur manipulation afin de réaliser et visualiser des expérimentations.

On constate que la modélisation-simulation cherche à imiter le comportement d'un système réel. Ce modèle permet d'analyser son fonctionnement et d'évaluer les effets des phénomènes qui y interviennent [BEN20].

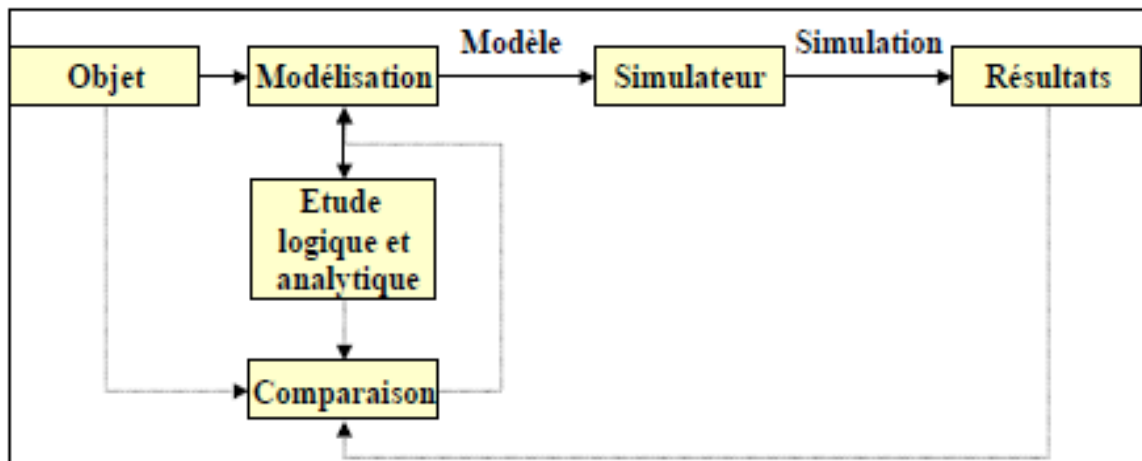


Figure 2. 1: Logigramme pour la modélisation simulation d'un processus

2.3 Réacteur isotherme

Dans le réacteur isotherme, il y' aura un changement entre la quantité de chaleur et le milieu environnant, mais seulement si la température de la matière reste constante, si la réaction est exothermique, la chaleur dégagée dans le réacteur est transmise au milieu environnant.

Par contre, dans le cas d'une réaction endothermique, la situation est inversée, on chauffe le réacteur de l'extérieur pour compenser la chaleur absorbée par la réaction. Il faut que la température du réacteur soit supérieure à celle du milieu environnant.

C'est cette différence de température ΔT qui est relativement faible, qui caractérise les réacteurs isothermes. [RHA11]

Trambouze a également indiqué que :

- Dans le domaine thermique :
 - La température doit être constante.
 - La circulation de la chaleur tend vers la chaleur de réaction.
- On peut réaliser l'échange thermique :
 - à l'intérieur du réacteur.
 - à l'extérieur du réacteur [BEN20]

2.4 Modélisation de réacteur continu parfaitement agité CSTR

Le réacteur parfaitement agité continu que nous utilisons dans ce travail appartient à une classe de réacteurs idéaux où les conditions hydrodynamiques et physiques sont supposées idéalisées et bien déterminées.

Ce type de réacteur permet d'approcher le fonctionnement des réacteurs industriels et constitue la base des méthodes utilisés pour les décrire.

Avant de développer le modèle mathématique du réacteur, il est important de donner une description du processus (réacteur) considéré [MEN20].

2.4.1 Réacteur continu parfaitement agité (CSTR)

A. Description du processus

Les réacteurs CSTR « en anglais (Continuous-StirredTank Reactor) ou « les réacteurs continus parfaitement agités » sont des équipements très importants dans l'industrie, ils appartiennent à la classification des réacteurs idéaux, ils sont des simples récipients cylindriques munis dans un dispositif d'agitation interne ainsi que d'une tubulure d'alimentation et d'une tubulure de soutirage comme illustré ci- dessous (figure 2.2).

Appelés réacteurs à cuve, réacteurs à Back mix. Ils sont principalement utilisés pour la réaction en phase liquide.



Figure 2. 2: Réacteur CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor)

B. Caractéristiques de réacteur CSTR :

- fonctionnement en état stationnaire.
- Parfaitement mélangé (mélange jusqu'au niveau moléculaire).
- Volume et densité constants (débit d'entrée = débit de sortie).
- Température et concentration constantes et sont les mêmes dans le cuve.
- Les conditions ne changent pas avec le temps de réaction.

2.4.2 Réacteur Van de Vusse CSTR

A. Description

Le réacteur de Van de Vusse est très connu comme un processus non linéaire et fréquemment utilisé comme référence pour diverses stratégies de contrôle.

Dans cette réaction, la substance A dans le réacteur réagit avec une autre substance pour produire la substance B en continu isotherme CSTR.

La substance B devient dégradée en substance C. cette dernière produit une autre substance D'un schéma simplifié de tel appareil est représenté dans la figure suivante [HIR02].

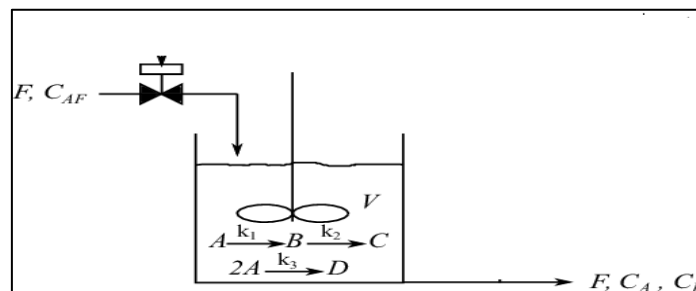
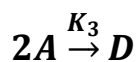
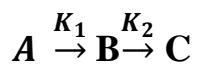


Figure 2. 3: Schéma d'un réacteur van de vusse

En plus de cette réaction consécutive, une réaction parallèle d'ordre élevé se produit A est Converti en substance D et sous-produit par la réaction de Diels-Alder. Ci-dessous on présente le schéma de réaction : [HIR02]



B. Principe du fonctionnement du procédé et de la problématique d'opération

La figure 2.3 présente le réacteur parfaitement mélangé où se produit la réaction Van de Vusse dont il est question dans cette section. La problématique principale de ce réacteur consiste à réguler la concentration de l'espèce intermédiaire B (CB) en jouant sur la variable manipulée du débit d'alimentation de l'espèce A (F) à concentration fixe. Aux conditions nominales d'opération indiquées au tableau 2.1, Afin de simplifier la problématique, on fait l'hypothèse d'un mélange parfait à l'intérieur du réacteur. Cette hypothèse permet de considérer que les concentrations CA et CB des espèces A et B sont les mêmes à l'intérieur et

à la sortie du réacteur. On considère aussi que le réacteur est exploité en mode continu, ce qui signifie que le débit d'entrée F est le même que le débit de sortie [BEN20]

2.5 Bilan de matière :

Ce bilan est écrit au moyen de quantité ou de débits mesurés en moles, masse, nombre d'atomes etc, et chaque espèce obéit à une équation de bilan. [RAH11].

Dans ce type de réacteur, la quantité de matière est représentée par le débit molaire. Le réacteur est considéré comme un système ouvert, qui échange de la matière (après le début de la réaction chimique) avec le milieu extérieur à travers l'entrée (introduction continu des réactifs) et la sortie du réacteur (soutirage des produits de la réaction)

2.5.1 La forme générale des bilans de matière :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Débit de matière} \\ \text{entrant} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Débit de} \\ \text{production} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Débit} \\ \text{de matière} \\ \text{sortant} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Débit} \\ \text{d'accumulation} \end{array} \right\}$$

Les premiers et troisièmes termes sont des débits de matière. Le second terme traduit le rôle des réactions chimiques. Le débit de production est la différence entre le débit de réaction et le débit destruction par ces réactions. Enfin, le quatrième terme traduit l'évolution dans le temps.

Généralement on a deux modes de réacteurs continus parfaitement agités ce sont :

- Mode stationnaire (isotherme).
- Mode non stationnaire (non isotherme).

On s'intéresse particulièrement à étudier notre système (CSTR) en mode stationnaire. Alors le réacteur ouvert en régime permanent est l'état de ce réacteur qui est supposé indépendant du temps. C'est-à-dire, rien ne s'accumule

Le bilan se traduit à :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Débit de matière} \\ \text{entrant} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Débit de} \\ \text{production} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Débit} \\ \text{de matière} \\ \text{sortant} \end{array} \right\}$$

• Mathématiquement :

$$\frac{d(\rho v)}{dt} = \rho F_0 - \rho F \rightarrow F_0 = F \text{ car } V \text{ et } \rho \text{ constante} \quad (2.1)$$

Il existe deux types de systèmes réactionnels :

- Simple (ci-dessous).
- Multiples.

2.5.2 Les paramètres opératoires

Avant d'aborder le bilan de matière, il faut définir les paramètres opératoires permettant d'avoir un :

a) Taux de réaction r : représente la vitesse de consommation nombre de mole pour Former un autre produit, un autre terme taux de réaction est le produit entre la vitesse de réaction et la concentration du produit à la sortie. [CHE17]

$$r = k C_i \quad (2.2)$$

b) Temps de passage τ : c'est le rapport du volume et du débit volumique, définir par la relation suivante :

$$\tau = \frac{VR}{Q_0} \rightarrow \tau = \frac{C_0 (x_s - x_e)}{r} \quad (2.3)$$

c) Taux de conversion X_i : [CHE17]

$$X_i = \frac{C_{i0} - C_i}{C_{i0}} = \frac{n_{i0} - n_i}{n_{i0}} \quad (2.4)$$

2.5.3 Les bilans de matière :

La forme générale de bilan des substances est :

$$\frac{dC_i V}{dt} = C_i F_e - C_{is} F_s + r_i V \quad (2.5)$$

a. Bilan de la substance A :

$$\frac{d(V C_A)}{dt} = F C_{Af} - F C_A - V K_1 C_A - V K_3 C_A^2 \quad (2.6)$$

Taux de réaction du produit A est :

$$r_A = -k_1 \cdot C_A K_3 C_A^2 \quad (2.7)$$

Alors après la simplification on aura :

$$\frac{d(C_A)}{dt} = \frac{F}{V} (C_{Af} - C_A) - k_1 C_A - K_3 C_A^2 \quad (2.8)$$

b. Bilan de la substance B :

$$\frac{d(C_B)}{dt} = -\frac{F}{V} C_B + K_1 C_A - K_2 \quad (2.9)$$

$$r_B = K_1 \cdot C_A - K_2 \cdot C_B \quad (2.10)$$

c. Bilan de la substance c :

$$\frac{d(C_C)}{dt} = -\frac{F}{V} C_C + K_2 C_B \quad (2.11)$$

Taux de réaction de produit c :

$$r_C = k_2 \cdot C_B \quad (2.12)$$

d. Bilan de la substance D :

Taux de réaction du produit D est :

$$r_C = \frac{1}{2} k_3 \cdot C_A^2 \quad (2.13)$$

Alors on a :

$$\frac{d(C_D)}{dt} = -\frac{F}{V}C_D + \frac{1}{2}K_3C_A^2 \quad (2.14)$$

Dans notre expérience, Puisque nous voulons obtenir le modèle du Composant B par rapport au produit d'entrée Composant A, observons que ces deux bilans énergétiques NE dépendent PAS des bilans C et D, nous ne nous intéresserons donc qu'à ces deux équations différentielles:

$$\frac{d(C_A)}{dt} = FC_{Af} - FC_A - VK_1C_A - VK_3C_A^2 \quad (2.15)$$

$$\frac{d(C_B)}{dt} = -\frac{F}{V}C_B + K_1C_A - K_2C_B \quad (2.16)$$

Ces deux équations représentent le phénomène non linéaire du réacteur Van de Vusse.

2.6 Linéarisation du modèle mathématique de CSTR

La linéarisation est une étape importante dans l'analyse des réacteurs chimiques à cuve agitée continue (CSTR) afin de simplifier l'étude de leur comportement dynamique.

L'objectif de cette partie est linéarisation de système à l'état stationnaire. Les équations de bilan que nous avons étudiées maintenant seront écrites sous la forme matricielle.

- On suppose qu'en état stationnaire l'accumulation est égale à 0.
- système isotherme $T_e = T_s$.
- On remplace les concentrations par :

$$\begin{aligned} C_A &= x_1 \text{ et } C_B = x_2 \\ u &= F/V \end{aligned} \quad (2.17)$$

2.6.1 Le Calcul du point de fonctionnement ou l'état de l'équilibre (Etape 1) :

Identifier les variables clés du système, comme les concentrations et la température. Avant linéarisation de modèle non linéaire pour trouver la forme de l'espace d'état, nous devons trouver les valeurs des variables d'état à l'état stationnaire.

L'état d'équilibre est obtenu en résolvant les équations dynamiques pour

La substance A :

$$\frac{F_S}{v}(C_{AFS} - C_{AS}) - K_1C_{AS} - K_3C_{AS}^2 = 0 \quad (2.18)$$

Alors On a :

$$C_{AS} \left(K_1 + \frac{F_S}{v} \right) + K_3 C_{AS}^2 - \frac{F_S}{v} C_{AFS} = 0$$

Pour résoudre l'équation ci-dessus en utilisant la formule générale et on prend la racine positive.

Finalement on a :

$$C_{AS} = \frac{-\left(k_1 + \frac{F_S}{v}\right) + \sqrt{\left(k_1 + \frac{F_S}{v}\right)^2 + 4K_3 \frac{F_S}{v} C_{AFS}}}{2K_3}$$

$$C_{AS} = -\frac{\left(\frac{5}{6} + \frac{4}{7}\right)}{2\left(\frac{1}{6}\right)} + \frac{\sqrt{\left(\frac{5}{6} + \frac{4}{7}\right)^2 + 4 \frac{1}{6} \frac{4}{7} 10}}{2\left(\frac{1}{6}\right)} \quad (2.19)$$

$$C_{AS} = 3 \text{ mol/l}$$

- **La Substance B :**

$$-\frac{F_S}{V} C_{BS} + K_1 C_{AS} - K_2 C_{BS} = 0$$

$$\frac{F_S}{V} C_{BS} + K_2 C_{BS} = K_1 C_{AS} \rightarrow C_{BS} = \frac{\left(\frac{5}{6}\right)3}{\frac{4}{7} + \frac{5}{3}} \quad (2.20)$$

$$C_{BS} = \frac{1.117 \text{ mol}}{\text{l}}$$

- Pour déterminer les points de fonctionnement à l'état d'équilibre graphiquement :

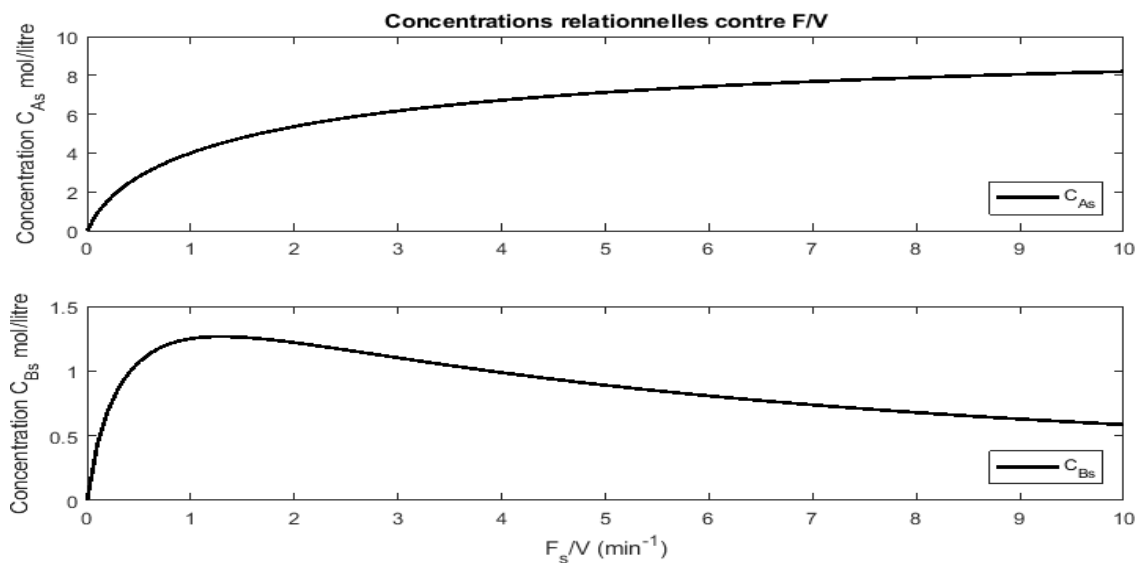


Figure 2. 4: Comportement des concentrations du réacteur

.La figure ci-dessus représente le comportement des concentrations par rapport à l'entrée

$$u = \frac{FS}{V}$$

On remarque que lorsque l'entrée u devient supérieure à une certaine valeur la sortie (la Concentration C_B) commence à diminuer.

Tableau 2. 1: Condition initiale à l'état d'équilibre

| Variable | Description | Valeur Mathématique | Valeur graphiquement (la projection) |
|----------|-----------------------------|---------------------|--------------------------------------|
| C_A | Concentration de l'espèce a | 3 mol/l | 3 mol/l |
| C_B | Concentration de l'espèce b | 1.117 mol/l | 1.2 mol/l |

2.6.2 Modèle d'espace d'état (Etape 2):

Le modèle d'espace d'états linéaire est représenté par :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases}$$

A : matrice d'état.

B : matrice de command.

C : matrice d'observation.

x : représente les variables d'état (x_1, x_2).

Y : représente la sortie.

$$\text{Avec : } \begin{cases} x_1 = C_A; x'_1 = \frac{dC_A}{dt} \\ x_2 = C_B; x'_2 = \frac{dC_B}{dt} \\ u = \frac{F}{V} \end{cases}$$

Ecriture matricielle : On va écrire les deux équations des bilans massiques sous la forme matricielle en suivant la matrice Jacobienne.

➤ Matrice Jacobienne :

Écrite sous la forme suivante :

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Matrice A :

$$A_{11} = \frac{\partial f_1}{\partial x_1} = -\frac{F_S}{V} - K_1 - 2K_3 C_{AS} \quad A_{21} = \frac{\partial f_1}{\partial x_2} = k_1$$

$$A_{12} = \frac{\partial f_2}{\partial x_1} = 0 \quad A_{22} = \frac{\partial f_2}{\partial x_2} = -\frac{F_S}{V} - K_2$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{F_S}{V} - K_1 - 2K_3 C_{AS} & 0 \\ K_1 & -\frac{F_S}{V} - K_2 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Matrice B :

$$B_{11} = \frac{\partial f_1}{\partial u} = C_{AFS} - C_{AS}$$

$$B_{21} = \frac{\partial f_2}{\partial u} = -C_{BS}$$

$$B = \begin{bmatrix} C_{AFS} - C_{AS} \\ -C_{BS} \end{bmatrix}$$

Matrice de sortie et d'entrée :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{F_S}{V} - K_1 - 2K_3 C_{AS} & 0 \\ K_1 & -\frac{F_S}{V} - K_2 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} C_{AFS} - C_{AS} \\ -C_{BS} \end{bmatrix} u$$

$$y = [0 \quad 1]x$$

$$u = \left(\frac{F}{V} - \frac{F_S}{V} \right)$$

Avant de calculer la fonction de transfert, Il faut d'abord déterminer les paramètres du système.

Tableau 2. 2: Les paramètres de réacteur Van de vusse

| Paramètre | Valeur | Unité |
|-----------|--------|--------------|
| F/V | $4/7$ | min^{-1} |
| K_1 | $5/6$ | $1/min$ |
| K_2 | $5/3$ | $1/min$ |
| K_3 | $1/6$ | $1/min$ |
| C_{AFS} | 10 | $mol.m^{-3}$ |

Les points de fonctionnement à l'état d'équilibre :

$$C_{A0} = 3mol/l \quad C_{B0} = 1.117mol/l$$

$$A = \begin{bmatrix} -2.4048 & 0 \\ 0.8333 & -2.2381 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 7 \\ 1.117 \end{bmatrix}$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \quad 1]$$

On étudie la stabilité du système par le calcul des valeurs propres de la matrice A (par

L'instruction de Matlab.

$$\det(\lambda I - A) = 0 \Rightarrow \begin{cases} \lambda_1 = -2.4053 \\ \lambda_2 = -2.2379 \end{cases} \quad (2.24)$$

Les deux valeurs propres sont négatives ou appartiennent au demi-plan gauche, ce qui signifie que notre système est stable.

2.7 Le modèle dans le domaine de Laplace :

Dans le domaine de Laplace, ce modèle se présente sous forme d'une matrice de transfert, représentée ci-dessous (2.23).

La matrice de fonction de transfert qui lie les entrées et les sorties est :

$$Y(s) = G(s).U(s)$$

D'où :

$$G(s) = G(SI - A)^{-1} B$$

On peut calculer théoriquement ou bien utilisée MATLAB.

Donc la fonction de transfert est :

$$G(s) = \frac{-1.117s + 3.1472}{s^2 + 4.6429s + 5.3821}$$

2.8 Comparaison entre le système linéaire et non linéaire :

Dans ce schéma Simulink, on a voulu confirmer la modélisation de notre système non linéaire avec le modèle linéarisé présenté par la fonction de transfert $G(s)$:

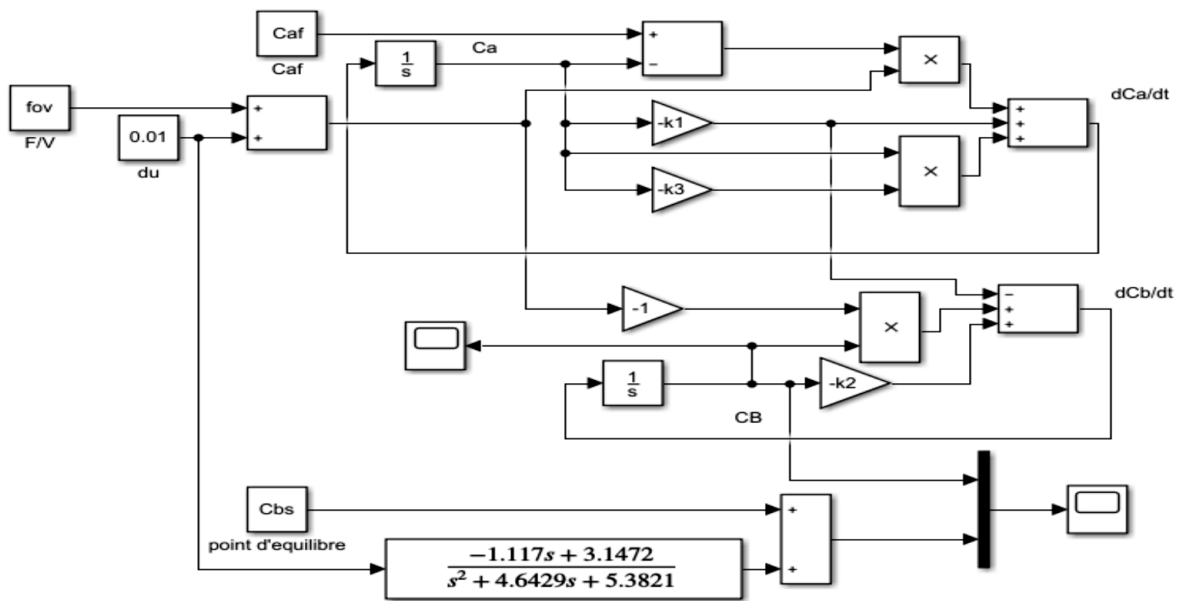


Figure 2. 5: Schéma Simulink du réacteur CSTR linéaire et non linéaire

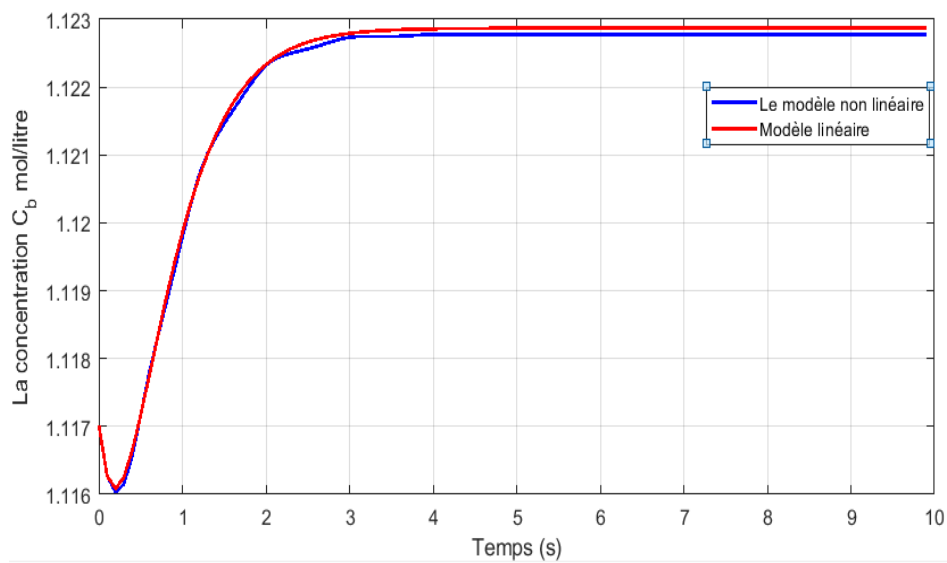


Figure 2. 6: Comparaison entre le système linéaire et non linéaire.

Remarque : On remarque que le système linéaire et non linéaire au point d'équilibre est presque identique.

2.9 La simulation du réacteur en boucle ouverte :

Le réacteur Van de Vusse est connu comme un processus non linéaire et fréquemment utilisé comme test référence pour diverses stratégies de contrôle, pour cela notre but avant de développer différents algorithmes de régulation, il est important d'avoir une idée de comportement du réacteur en boucle ouverte afin de montrer que le réacteur ne peut pas fonctionner sans régulation.

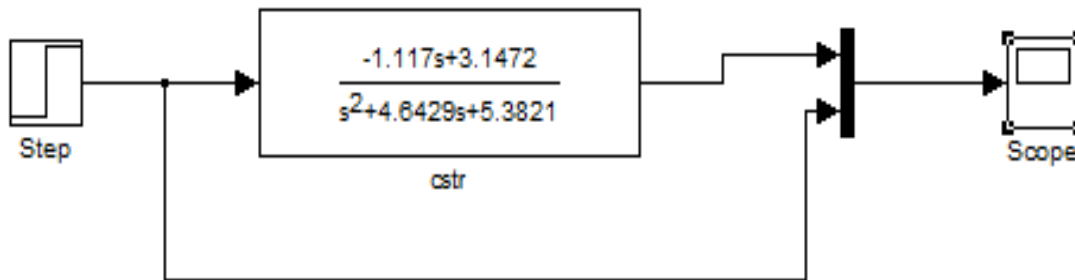


Figure 2. 7: Schéma Simulink du réacteur en boucle ouvert

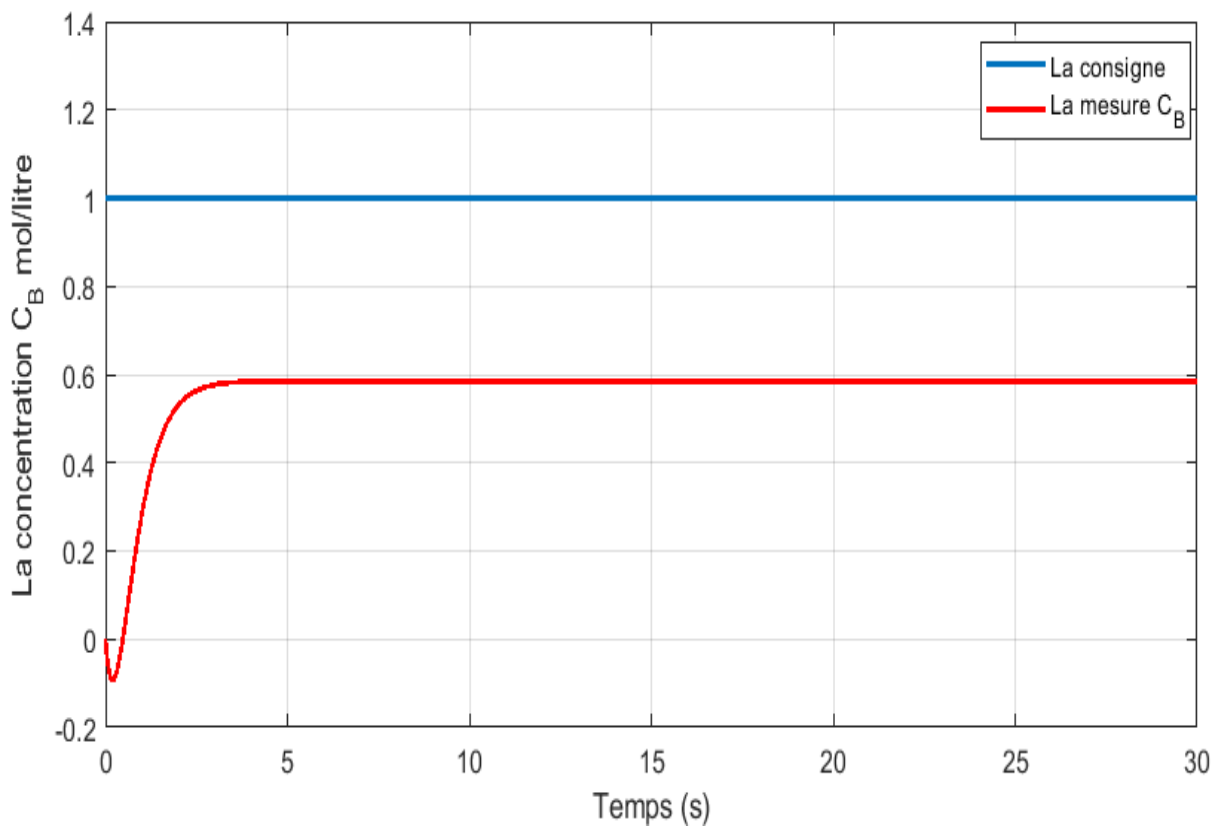


Figure 2. 8: Evaluation de la concentration C_b du réacteur en boucle ouverte

La réponse sur Matlab : Dans cette figure, on voit que la mesure C_B ne suit pas la consigne d'où la nécessité d'introduire un régulateur en boucle fermée.

2.10 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons représenté les modèles mathématiques du réacteur parfaitement agité isotherme Van de Vusse pour les deux régimes de fonctionnement, stationnaire et dynamique. Ce modèle concerne le réacteur en boucle ouverte (sans régulation), notre objectif est de connaître les comportements dynamiques avant de passer à la régulation qui sera détaillée dans les chapitres suivants.

Chapitre 3:

Régulateur PID

3.1 Introduction

La majorité des processus nécessitent le contrôle d'un certain nombre de grandeurs tel que la température la pression, la vitesse, la position etc.

Il existe plusieurs types de commande qui diffèrent par leurs principes et leurs mises en œuvre. En contrepartie plusieurs paramètres doivent être prises en compte tels que : la précision, la stabilité, le temps de réponse, la fiabilité et la robustesse. La commande d'un système doit être robuste en grande partie de telle sorte que celle-ci garde un bon fonctionnement du processus quel que soit l'erreur de modélisation ou de perturbation.

Il existe nombreuses méthodes de réglage disponibles et il est bien que jusqu'à présent le contrôleur proportionnel, intégral et dérivé (PID) est le plus utilisé dans l'industrie en raison de sa structure. D'autre part le régulateur PID répond à plus du 90 % des besoins industriels. Malheureusement, il été très difficile de régler le gain de régulateur PID correctement parce que beaucoup d'installation industrielles sont souvent accablés par des problèmes tel que l'ordre supérieur, les retards, et les non-linéarités, il est difficile de déterminer le paramètre PID optimal ou presque optimale avec les méthodes de réglage classique.

Pour toutes ces raisons il est très souhaitable d'augmenter les capacités du contrôleur PID en ajoutant des nouvelles caractéristiques, pour cela on peut déterminer les paramètres de PID en utilisant la règle de Ziegler-Nichols

Ce chapitre consacré à l'optimisation des paramètres du régulateur PID pour le contrôle de la concentration d'un réacteur chimique continue parfaitement agiter CSTR isotherme.

3.2 La Régulation

La régulation automatique est l'ensemble des techniques qui permettent de contrôler une grandeur physique (température, vitesse, pression), sans intervention humaine, pour la maintenir à une valeur donnée, appelée consigne. C'est une branche de l'automatisme. Ces techniques ne sont pas seulement un moyen de commander des processus mais aussi un moyen de réduire les pertes de production, d'augmenter la qualité et la quantité des produits, d'augmenter la disponibilité des unités et de diminuer les coûts marginaux de production. Un automatisme bien pensé, surtout si son étude intervient en amont de la conception des unités de production, aura une implication économique importante [BOU22] .

3.3 Éléments constitutifs d'une boucle de régulation

3.3.1 Une boucle de régulation :

Dans le cas général la boucle de régulation doit comporter au minimum les éléments suivants [AOU14] :

- Un capteur de mesure
- Un transformateur
- Un régulateur
- Un actionneur

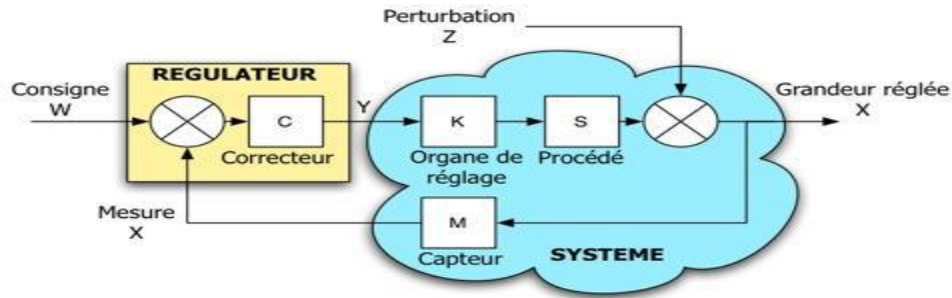


Figure3.1: Représentation fonctionnelle d'une boucle de régulation.

3.3.2 Les types de boucles de régulation :

- **Boucle ouverte :**

Dans la régulation en boucle ouverte, la variable de sortie ne provoque aucune influence sur la variable d'entrée

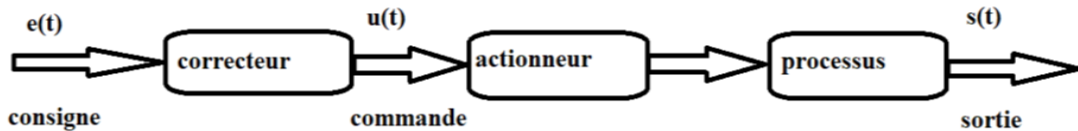


Figure3. 2: Système en boucle ouverte.

- **Boucle fermée :**

La régulation en boucle fermée représente un processus de commande dont la valeur mesurée est souvent surveillée et comparée par rapport à la consigne (avec feedback). Ainsi, elle provoque la génération d'un signal de commande afin d'ajuster la variable de commande à la consigne en dépit des perturbations [ALI20].

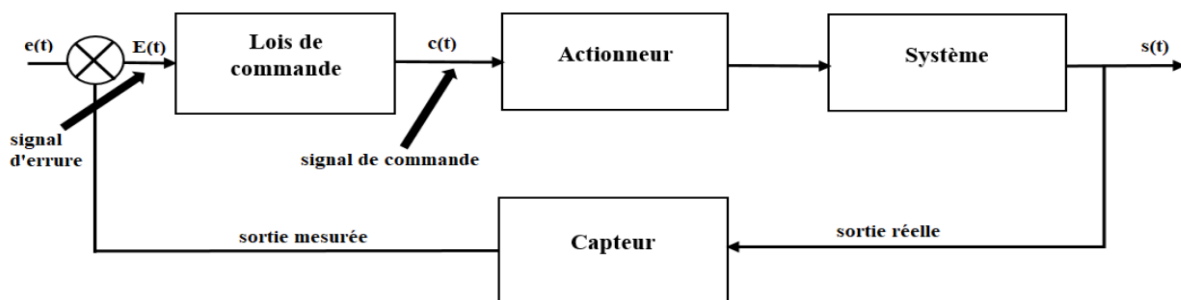


Figure3. 3: Système en boucle fermée.

3.3.3 Performances d'une régulation

A. Stabilité : Un système est stable si pour une entrée bornée la sortie est bornée. Les deux figures suivant (3.4) représenté un système instable :

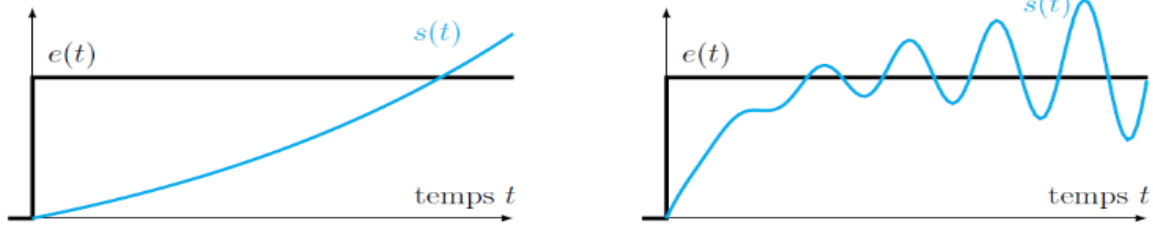


Figure3. 4: Systèmes instables dont la sortie diverge ou oscille sans se stabiliser
La figure (3.5) représenté un système stable :

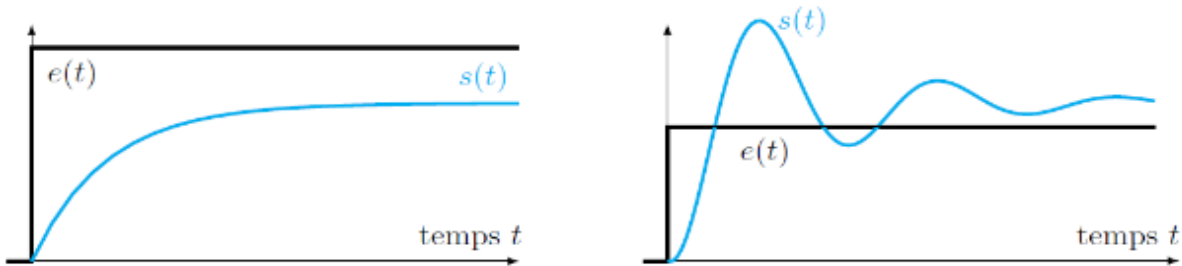


Figure3. 5: Systèmes stables dont les sorties vers une valeur

B. Précision

La précision qualifie l'aptitude du système à atteindre la valeur de consigne à convergence. L'erreur $\mu(t)$ est la différence entre la consigne $e(t)$ et la sortie $s(t)$. Elle n'est définie que si la consigne et la sortie sont de mêmes natures.

$$m(t) = e(t) - s(t) \quad (3.1)$$

Un système est précis si l'erreur statique e_s est nulle. [ALI20]

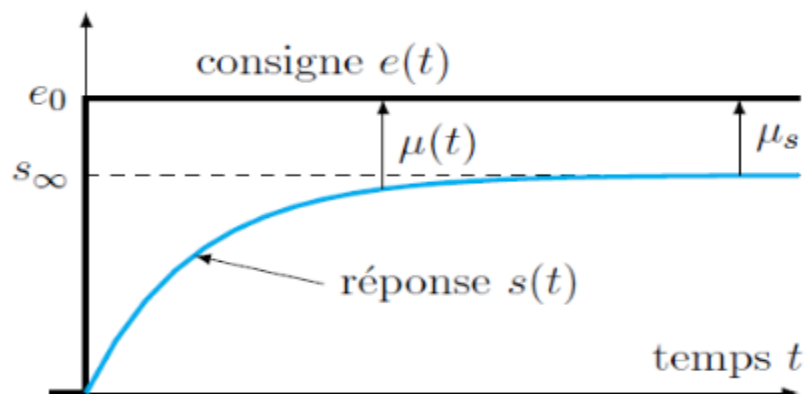


Figure3. 6: Caractéristique de la précision d'un système

C. La rapidité

Un système est rapide si son temps de réponse est jugé satisfaisant, la sortie doit atteindre la valeur de consigne le plus rapidement possible. Le temps de réponse d'un système dans l'intervalle [95%,105%] de la valeur finale [BEN20].

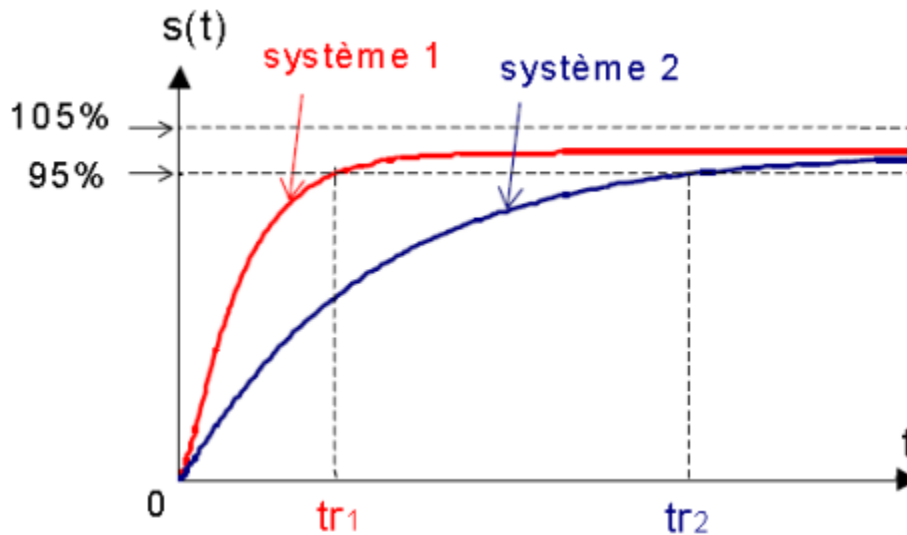


Figure3. 6: Rapidité de deux systèmes aperiodiques

3.4 Le régulateur PID

3.4.1 Définition

Le régulateur PID, appelé aussi correcteur PID (proportionnel, intégrateur, dérivateur) est un système de contrôle, il est constitué d'un comparateur pour observer l'écart (erreur) entre la mesure et la consigne, et d'un correcteur dont l'algorithme permet d'obtenir une loi d'évolution de la mesure du procédé conforme au cahier des charges. Il permettant d'effectuer un asservissement en boucle fermée d'un système industriel ou « procédé » [BOU22].

$e = \text{consigne} - \text{mesure}$

Loi de commande d'un régulateur PID :

$$u(t) = k_p \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_{-\infty}^t e(\tau) + T_d \cdot \frac{de}{dt} \right) \quad (3.1)$$

Fonction de transfert du régulateur PID :

$$C(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = K_p \cdot \frac{1 + p \cdot T_i + p^2 \cdot T_i \cdot T_d}{p \cdot T_i} \quad (3.2)$$

3.4.2 Description des régulateurs PID

Un régulateur PID remplit essentiellement trois fonctions :

1. Il fournit un signal de commande $u(t)$ en tenant compte de l'évolution du signal de sortie $y(t)$ par rapport à la consigne $w(t)$.
2. Il élimine l'erreur statique grâce au terme intégrateur.
3. Il anticipe les variations de la sortie grâce au terme dérivateur

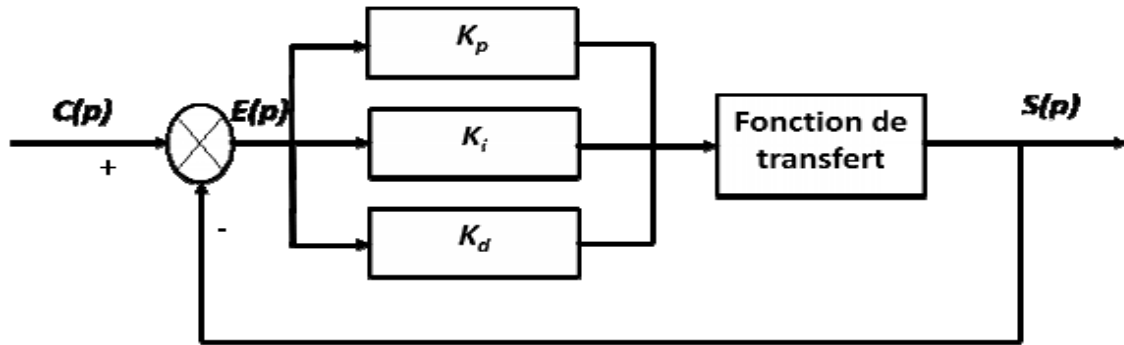


Figure3. 7: Schéma fonctionnel du régulateur PID

3.4.3 Les différentes actions du régulateur PID

A. Action proportionnelle (P)

L'action est dite proportionnelle lorsque le signal de commande est proportionnel au signal d'erreur, elle corrige de manière instantanée tous écarts de la grandeur à régler. Afin de Diminuer l'écart de réglage et rendre le système plus rapide, on augmente le gain mais on est Limité par la stabilité du système.

- Le régulateur P est utilisé lorsqu'on désire régler un paramètre dont la précision ce N'est pas important.

Loi de commande du régulateur P :

$$u(t) = K_p .e(t) \quad (3.3)$$

Fonction de transfert du régulateur P :

$$H(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = K_P \quad (3.4)$$

B. Action intégral (I)

L'action est dit intégrale lorsque le signal de commande est proportionnel à l'intégrale du signal d'erreur. Elle complète l'action proportionnelle et permet d'éliminer l'erreur résiduelle en régime permanent.

On diminue l'action Intégrale ce qui provoque l'augmentation du déphasage ce qui génère l'instabilité en état fermé pour rendre le système plus dynamique (diminuer le temps de réponse).

- L'action intégrale est utilisée lorsqu'on désire avoir une précision parfaite, elle permet aussi de filtrer la variable à régler d' où l'utilité pour le réglage de variables bruitées.

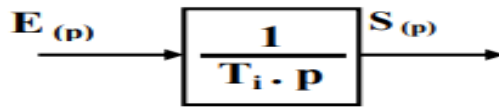
Loi de commande du régulateur I :

$$u(t) = \frac{K_P}{T_i} \int_{-\infty}^t e(t') dt = K_i . \int_{-\infty}^t e(\tau) . d\tau \quad (3.5)$$

Fonction de transfert du régulateur I :

$$H(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = \frac{K_P}{P \cdot T_i} = \frac{K_i}{P} \quad (3.6)$$

Schéma fonctionnel du régulateur I :



C. Action dérivé (D)

L'action est dite dérivée lorsque le signal de commande est proportionnel à la dérivée du Signal d'erreur. Elle accélère la réponse du système et améliore la stabilité de la boucle, en Permettant notamment à l'amortissement rapide des oscillations dues à l'apparition d'une Perturbation ou à une variation de la consigne.

Dans la pratique l'action dérivée est appliquée aux variations de la grandeur à régler seul et non de l'écart mesure-consigne afin d'éviter les à-coups dus à une variation subit de la consigne.

➤ L'action D est utilisée dans l'industrie pour le réglage des variables lentes telle que la Température, elle n'est pas recommandée pour le réglage d'une variable bruitée ou trop dynamique.

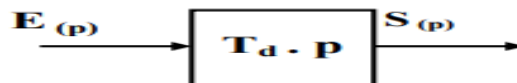
Loi de commande du régulateur D :

$$u(t) = K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.7)$$

Fonction de transfert du régulateur D :

$$H(p) = K_p T_d p \quad (3.8)$$

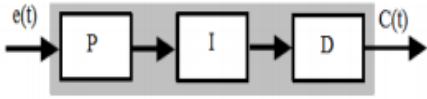
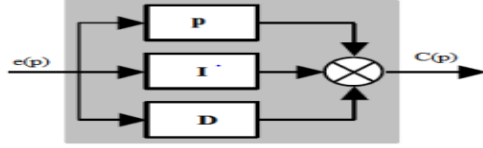
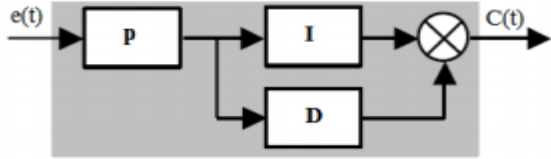
Schéma fonctionnel du régulateur D :



3.4.4 Structures de PID

Dans un régulateur PID, il existe plusieurs façons d'associer les paramètres P, I et D. En effet le correcteur PID peut avoir une structure série, parallèle ou mixte, illustrés dans le tableau suivant.

Tableau 3. 1: Différentes structure des régulateur PID

| Structure de régulateur PID | Schéma | Fonction de transfert |
|-----------------------------|--|---|
| Série |  | $H(p) = \frac{T_i T_d}{T_i} + \frac{1}{p T_i} + p T_d$ |
| Parallèle |  | $H(p) = k_p + \frac{1}{p T_i} p T_d$ |
| Mixte |  | $H(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{p T_i} + p T_d \right)$ |

3.4.5 Les avantages et les inconvénients d'un régulateur PID

La régulation par PID est l'un des régulations les plus utilisés en raison de sa structure de contrôle simple, sa conception facile, et son coût très faible, et s'avère efficace pour la plupart des systèmes réels.

D'une autre part il est limité par un certain nombre de contraintes. Tout d'abord, il peut s'avère inefficace pour certains systèmes qui contient du bruit ou qui ne sont pas linéaires. Dans le tableau si dessous on résume les avantages et les inconvénients de PID classées par les effets de chaque action.

Tableau 3. 2: Les avantages et les inconvénients d'un régulateur PID

| Action | Avantages | Inconvénient |
|----------|---|--|
| P | Dynamique | Ne permet pas d'annuler une erreur statique |
| I | Annulation d'erreur statique, amélioration de la robustesse | Action lente, ralentit le système (effet déstabilisant) |
| D | Action très dynamique, améliore la rapidité (effet stabilisant) | Sensibilité aux bruits forte sollicitation de l'organe de commande |

3.5 Méthode de synthèse du régulateur PID

Les méthodes expérimentales permettent d'avoir de bonnes estimations génériques pour un système raisonnablement simple (c'est à dire réglable par un PID). Cependant il faut très

souvent procéder à un réglage des coefficients jusqu'à obtenir un système respectant le cahier des charges.

3.5.1 Approche de Ziegler-Nichols pour les systèmes en boucle fermée :

Pour notre système de fonction de transfert suivante :

$$G(s) = \frac{-1.117s + 3.1472}{s^2 + 4.6429s + 5.3821}$$

Principe :

Amener le système dans un état d'oscillations puis en déduire les valeurs des coefficients

Protocole :

Fixer K_i et K_d à 0 puis faire varier K_p jusqu'à obtenir des oscillations périodiques stables, c'est à dire non amorties et non amplifiées.

On ajuste le gain K à une valeur faible. On augmente ensuite le gain K jusqu'à ce que Le Système soit marginalement stable (limite de stabilité). On note le gain critique : K_u .

On doit aussi mesurer la période des oscillations (T_u) comme montre la figure 3.9, et on a trouvé que : $K_u= 4.16$ et $T_u=1.45$.

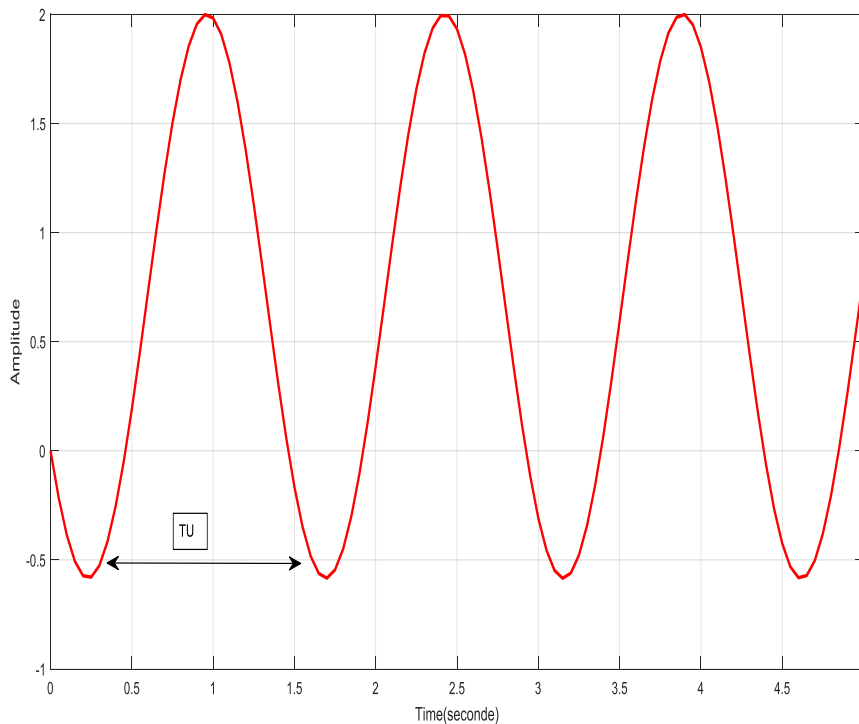


Figure3. 8: Réponse d'un système par méthode d'oscillation (Ziegler-Nichols)
Cela étant, on utilise les valeurs du tableau 3.3 pour calculer les paramètres des contrôleurs.

Tableau 3. 3: Paramètres de conception de contrôleurs P,PI,PID avec Ziegler-Nichols

| | k_p | k_i | k_d |
|------------|-----------|----------------------|---------------|
| P | $0.5 Ku$ | - | - |
| PI | $0.45 Ku$ | $\frac{0.54 Ku}{Tu}$ | - |
| PID | $0.6 Ku$ | $\frac{1.2 Ku}{Tu}$ | $0.075 Ku Tu$ |

On a trouvé les paramètres de contrôleur P, PI et PID comme suivant :

Tableau 3. 4:Paramètre calculés des contrôleurs P, PI, PID avec Ziegler Nichols

| | k_p | k_i | k_d |
|------------|-------|-------|-------|
| P | 2.07 | - | - |
| PI | 1.87 | 1.54 | - |
| PID | 2.49 | 3.44 | 0.45 |

3.5.2 Régulation du système par PID avec les paramètres de Ziegler-Nichols

Afin de comparer les performances du système, nous allons simuler l'utilisation de trois types de contrôleurs : proportionnel (P), proportionnel-intégral (PI) et proportionnel-intégral-dérivé (PID), en utilisant les valeurs spécifiées dans le tableau 3.4.

Les résultats de ces simulations seront présentés dans la figure 3.10.

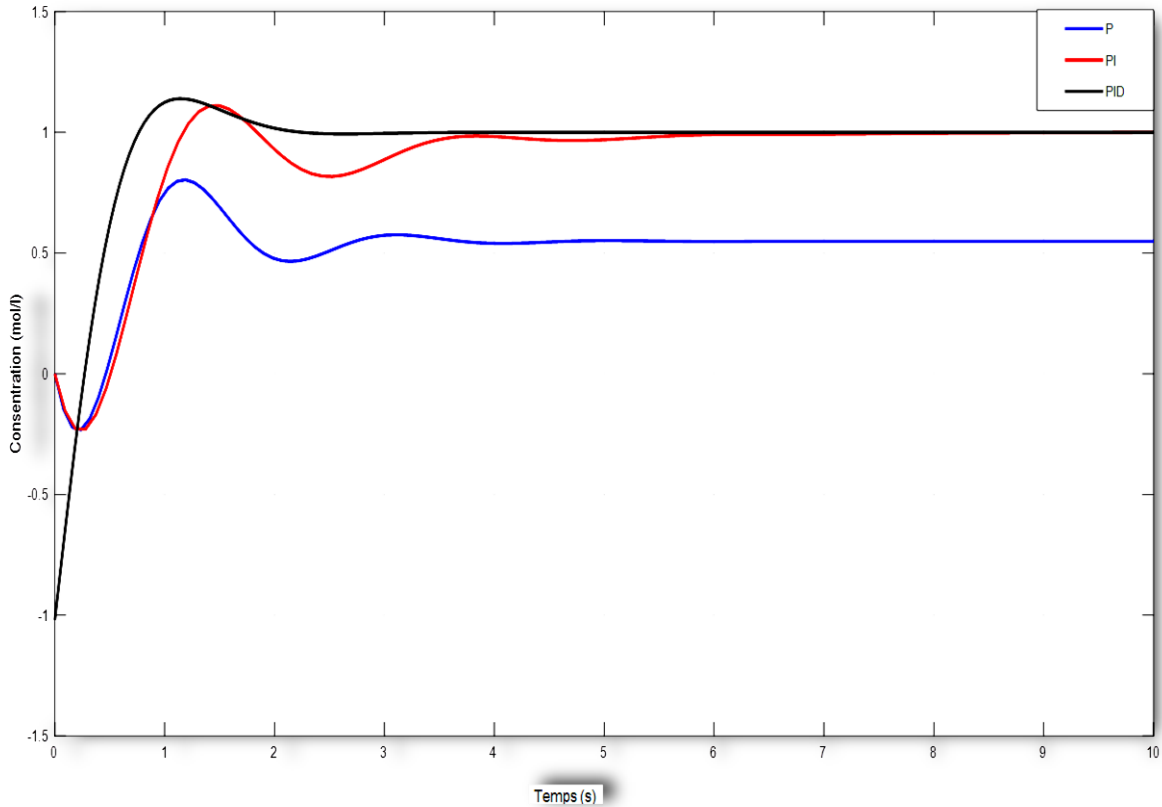


Figure3. 9: Réponse du système par différentes configurations avec Ziegler-Nichols

D'après la figure on remarque :

✚ Lorsque il n'y a pas de contrôle du système, il y a une réponse inversée de valeur - et Une erreur statique de 0.7.

✚ Si on ajoute le contrôleur P seulement, on remarque qu'il n'y a pas beaucoup d'effet Sur la réponse de sortie par rapport au système non contrôlé, on obtient une réponse inversée et une erreur statique de 0.5.

✚ Si on utilise le régulateur PI avec les paramètres de K_p et K_i obtenus dans le tableau 3.5 On obtient les résultats suivants :

Tableau 3. 5: Les performances de régulateur PI-ZN

| Les performances | Temps de montée (min) | Dépassement (%) | Temps de réponse à 5% (min) | IAE | ITAE | ISE | ITSE |
|------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------------|-------|-------|--------|--------|
| PI-ZN | 0.494 | 11.1% | 3.26 | 1.203 | 1.356 | 0.9112 | 0.3828 |

On remarque que le temps de stabilité est élevé, alors on va essayer d'ajouter une action D pour minimiser le temps de réponse et avoir un temps de stabilisation du système plus bas

Tableau 3. 6: Les performances de régulateur PID-ZN

| Les performances | Temps de montée (min) | Dépassement (%) | Temps de réponse à 5% (min) | IAE | ITAE | ISE | ITSE |
|------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------------|-------|--------|-------|-------|
| PID-ZN | 0.548 | 13.9% | 1.46 | 1.104 | 0.7567 | 1.052 | 0.342 |

On remarque que le temps de réponse est diminué ainsi que la valeur du temps de Stabilisation du système à une valeur de 2.39 min, c'est plus bas à celle obtenue par le régulateur PI.

Ce régulateur nous permet aussi à diminuer la réponse inverse. Alors le régulateur PID nous a fourni la stabilité du système et la rapidité de réponse.

Les paramètres donnés dans le tableau 3.4 ne sont que des valeurs nominales, et non pas Optimales. Il est nécessaire de varier ces paramètres afin d'obtenir une meilleure réponse.

3.6 Etude comparative de rejet de perturbation avec régulateur PID (par des Paramètres de Z-n)

Pour valider la fiabilité des paramètres du système, nous introduisons une perturbation, et examinons ses effets sur la vitesse de réaction. Cette variation est représentée par une fonction de transfert :

$$H(s) = \frac{0.4762}{s^2 + 4.6429s + 5.3821}$$

Les paramètres du système simulé sont :

• Par la méthode de Ziegler Nichols :

La consigne (Step1) = 1 ; perturbation (Step2) =1 à l'instant t=15 min ;

Paramètres du PID : $\begin{cases} k_p = 2.49 \\ k_i = 3.41 \\ k_d = 0.45 \end{cases}$

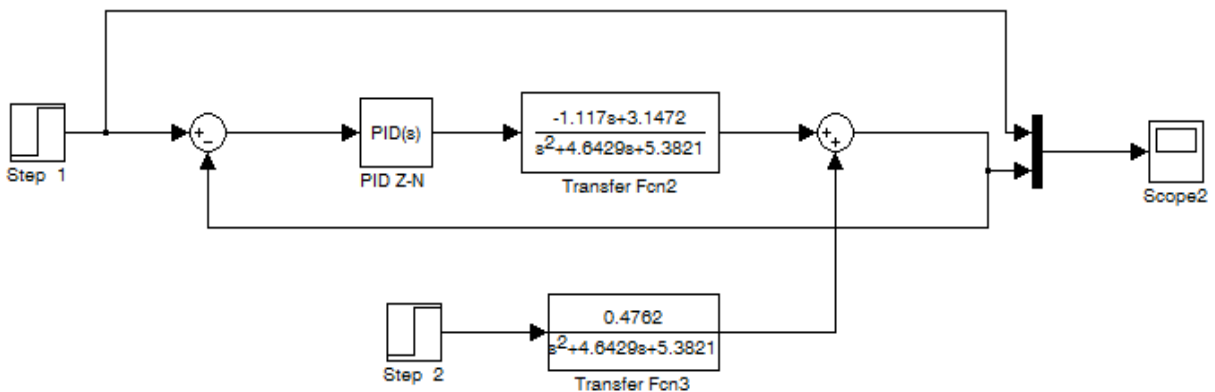


Figure3. 10 : Schéma bloc du système avec perturbation

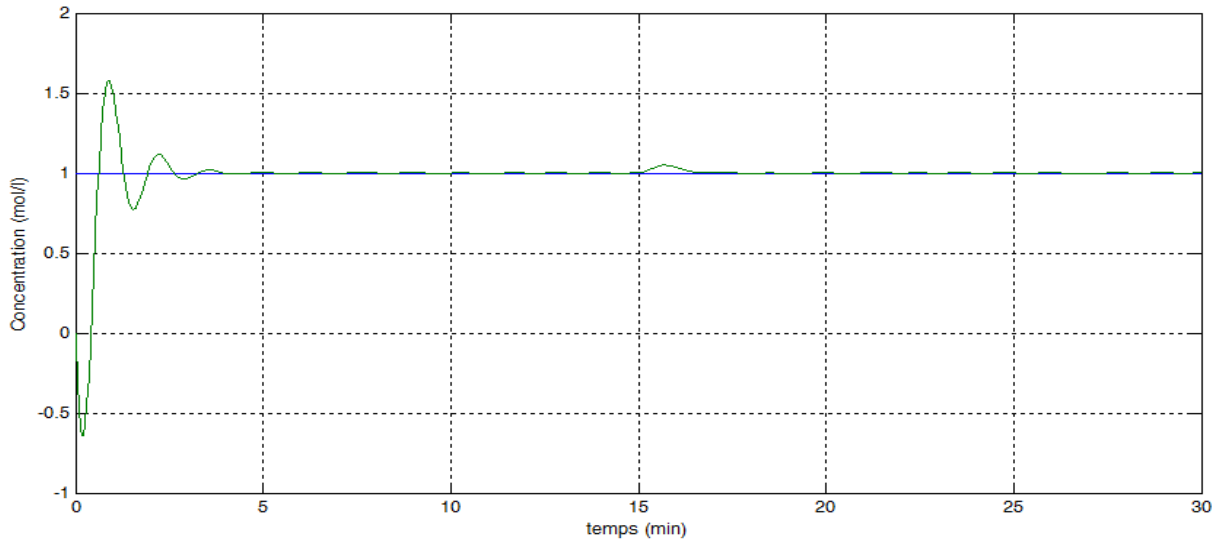


Figure3. 11: Réponse de rejet de perturbation par régulateur PID avec Z_N

On remarque que le régulateur PID avec les paramètres de Ziegler-Nichols réagit avec la Perturbation rapidement (après 1.02 s) mais toujours la réponse avec méthode de Ziegler-Nichols présente un dépassement lors du changement de consigne.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, les concepts fondamentaux de régulation ont été exposés, ainsi que le régulateur PID et ses diverses actions P, PI et PID.

Ensuite, les paramètres ont été modifiés à l'aide de deux méthodes : Ziegler-Nichols. Dans ce dernier cas, il faut poursuivre Varier les coefficients jusqu'à ce que la réponse soit satisfaisante aux exigences du cahier des charges. Ainsi, nous avons respecté les règles de PID :

- Quand K_p augmente, le temps de montée augmente, mais il y a davantage de dépassement.
- Avec une augmentation de K_i , le temps de montée augmente, mais le régime stationnaire reste plus long avec une erreur statique réduite.
- Une augmentation de K_d entraînera une réduction de la surcharge, mais une augmentation de la sensibilité au bruit.

Chapitre 4 :

Optimisation des paramètres PID de
réacteur chimique CSTR

4.1 Introduction

Dans le monde de l'industrie, on trouve plusieurs types de commandes utilisées, dont les travaux de recherche sont en développement continu pour améliorer les performances de chacune type de commande.

Malheureusement, il a été très difficile de régler le gain de régulateur PID correctement parce que beaucoup d'installations industrielles sont souvent accablés par des problèmes tels que l'ordre supérieur, les retards et les non-linéarités. Il est difficile de déterminer le paramètre PID optimale ou presque optimale avec les méthodes de réglages classique. Pour toutes ces raisons, il est très souhaitable d'augmenter les capacités du contrôleur PID en ajoutant de nouvelles caractéristiques. Plusieurs approches ont été documentées dans la littérature pour déterminer les paramètres du PID, d'abord trouvés par Ziegler Nichols (ZN) réglage. Réseau de neurones, l'approche floue, et les techniques d'optimisation d'essaim de particules (PSO), algorithme génétique ne sont que quelques-uns parmi de nombreuses œuvres.

Le réacteur chimique agité continu (CSTR) est un sujet important dans le processus chimique et offrant un intervalle large de recherches dans le domaine de l'ingénierie et la chimie. Dans la littératures divers approches de contrôle ont été appliquées sur CSTR pour contrôler ses paramètres, Nous nous intéressons dans ce chapitre à deux de ces méthodes, l'algorithme génétique (GA), et la méthode de loups gris (GWO) pour la conception et la mise en œuvre d'un contrôleur intelligents à un système CSTR en minimisant l'intégrale quadratique de l'erreur (ISE) et intégrale absolue de l'erreur (IAE) .

4.2 La méthode des loups gris (Grey Wolf Optimization)

Optimisation par la méthode des loups gris (GWO) est une technologie intelligente en essaim développée par Mirjalili en 2014, qui simule la hiérarchie de leadership des loups connus pour leur chasse de groupe. Cet algorithme simule le comportement de chasse au leadership social des loups gris dans la nature. Dans cet algorithme, la population est divisée en quatre groupes : alpha, bêta, delta et oméga!

Les loups gris forme des groupes de taille varie de 5 à 12 en moyenne. Ce groupe est le point fort pour subvenir aux besoins de vie (Fournir de la nourriture et la protection), et il est particulièrement important qu'ils aient une hiérarchie sociale très stricte.

Le niveau hiérarchique est bêta et delta, et gamma est le membre le plus faible du groupe, l'alpha c'est un male et une femelle sont principalement responsable de prendre des décisions sur la chasse, le lieu de sommeil, le temps de se réveiller et dans la gestion de l'énergie domestique, il est considéré comme l'élément le plus approprié pour atteindre la fonction de minimisation des coûts objective.

Les décisions de l'alpha sont dictées au groupe, mais il y a un type de comportement démocratique á également été observé, dans lequel un alpha suit les autres loups dans le groupe.

De plus, il existe différentes étapes principales de la chasse : détection des proies, attaque de proies et encerclement. Selon la hiérarchie vivante des loups, la solution la plus appropriée á cette pratique est alpha, puis bêta, puis delta et oméga [Khe21].

4.3 Les opérateurs :

Afin de modéliser mathématiquement la hiérarchie sociale des loups lors de la conception de GWO, nous considérons la solution la plus adaptée comme l'alpha, par conséquent les deuxièmes et troisièmes meilleures solutions sont respectivement nommées beta et delta. Les autres solutions candidates sont supposées être des omégas, Dans l'algorithme GWO, la chasse (optimisation) est guidée par α , β et Ω . Les loups suivent ces trois loups [MEC20].

- **Hiérarchie sociale**

Pour un modèle mathématique de la hiérarchie sociale des loups lors de la conception d'un GWO, nous considérons que la solution la plus appropriée est alpha comme la première solution et la deuxième et troisième meilleure solution c'est nommé beta (b) et delta (d), les solutions candidates qui reste sont supposés être des omégas (x).

Dans l'algorithme GWO, la chasse (optimisation) est dirigée par a, b et d. Les loups suivent ces trois loups.

- **Encercler les proies**

Dans cette étape donne la modélisation mathématiquement de le comportement d'encercler les équations sont proposées :

$$\vec{D} = |\vec{C} * \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (4.1)$$

$$\vec{X}(t + 1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} * \vec{D} \quad (4.2)$$

Ou t indique l'itération en cours, \vec{A} et \vec{C} sont des vecteurs de coefficients X_p est le vecteur de position de proie est le vecteur de position. on calcule \vec{A} et \vec{C} par :

$$\vec{A} = 2a * \vec{r}_1 \quad (4.3)$$

$$\vec{C} = 2 * \vec{r}_2, \vec{X}_p \quad (4.4)$$

\vec{a} est diminué linéairement de 2 à 0 , et \vec{r}_1, \vec{r}_2 sont des vecteurs aléatoires dans [0,1].

- **Chasse**

Les loups gris ont une énorme capacité à reconnaître l'emplacement et les environs des proies. La recherche est généralement gérée par alpha, bêta et delta qui peut également participé à la chasse de temps en temps. Cependant, dans l'espace de recherche abstrait, nous n'avons aucune idée de l'endroit de l'optimum (la proie). Pour simuler mathématiquement le comportement de chasse des loups gris, nous supposons que alpha (meilleure solution candidate) beta et delta ont une meilleure vue de l'emplacement potentiel de la proie.[MEC20]

C'est pour ça on prend les trois premières solutions obtenues jusqu'à présent et obligeons les autres agents (y compris les omégas) à mettre à jour leurs positions en fonction de la position des meilleurs agents de recherche. Les formules suivantes ont été proposées à cet égard :

$$\vec{D}_\alpha = \vec{C}_1 * \vec{X}_\alpha(t) - \vec{X}(t) \quad (4.5)$$

$$\vec{D}_\beta = \vec{C}_2 * \vec{X}_\beta(t) - \vec{X}(t) \quad (4.6)$$

$$\vec{D}_\delta = \vec{C}_3 * \vec{X}_\delta(t) - \vec{X}(t) \quad (4.7)$$

$$\vec{X}(t + 1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (4.8)$$

C_1 et C_2 et C_3 Sont des vecteurs au hasard et X indique la position de la nouvelle solution.

Nous pouvons voir que la position finale sera dans un emplacement aléatoire dans un cercle défini par les positions alpha, bêta et delta dans la zone de recherche. En d'autres termes, alpha, bêta et delta estiment l'emplacement de la proie, et d'autres loups mettent à jour au hasard leur emplacement autour de la proie.

- **Attaque de proie**

Les loups gris terminent la chasse en attaquant la proie lorsqu'elle cesse de se déplacer. Afin de modèle mathématique approchant la proie dont nous diminuons la valeur a. Notez que la plage de fluctuation de A est également diminuée de a, en d'autre terme A est une valeur aléatoire dans l'intervalle [-a, a] ou a est diminué de 2 à 0 au cours des itérations. Lorsque les valeurs aléatoires de sont dans intervalle [-1, 1], la position suivante d'un agent de recherche peut être dans n'importe quelle position entre sa position actuelle et la position de la proie.

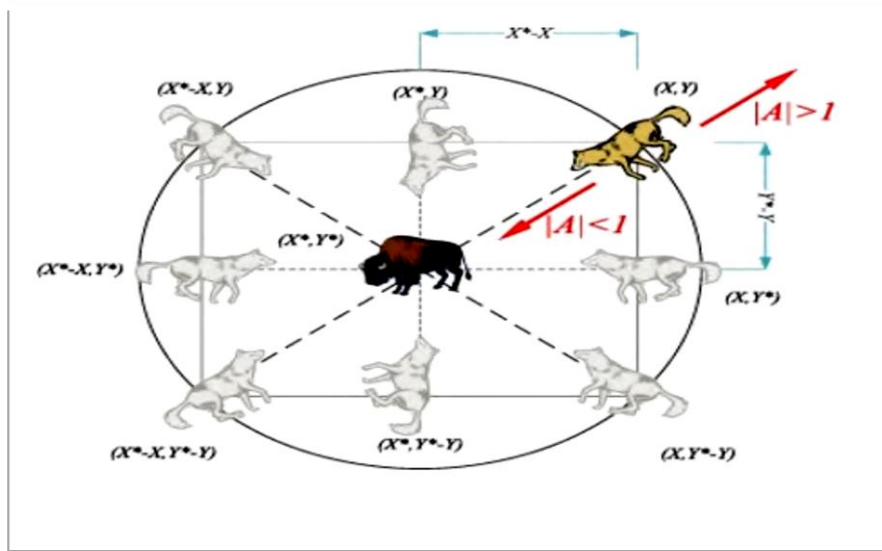


Figure4. 1: Mécanisme de positionnement de l'agent de recherche

4.4 Étapes générales de l'algorithme GWO

Les étapes générales de l'algorithme GWO sont les suivantes :

- Créez un groupe aléatoire de loups en fonction des limites supérieure et inférieure des variables.
- Calculer la valeur objective correspondante pour chaque Loup.
- Dans cette étape Choisi les trois premiers meilleurs loups et gardez-les sous α , β et δ .
- Mettez à jour la position du reste de la population (loups) à l'aide de les équations (4.5), (4.6), (4.7) et (4.8).
- Actualiser les paramètres A, B et C
- Passez à l'étape deux si le critère final n'est pas satisfait.
- Renvoie la position de α comme optimum optimal approximé

La figure (4.2) représente les étapes de l'algorithme de l'optimisation de loup gris GWO. L'algorithme GWO est capable de fournissent des résultats très compétitifs par rapport à d'autres méta-heuristiques bien connues. L'exploration de cet algorithme est très élevée et nécessite d'éviter les optima locaux [Khe21].

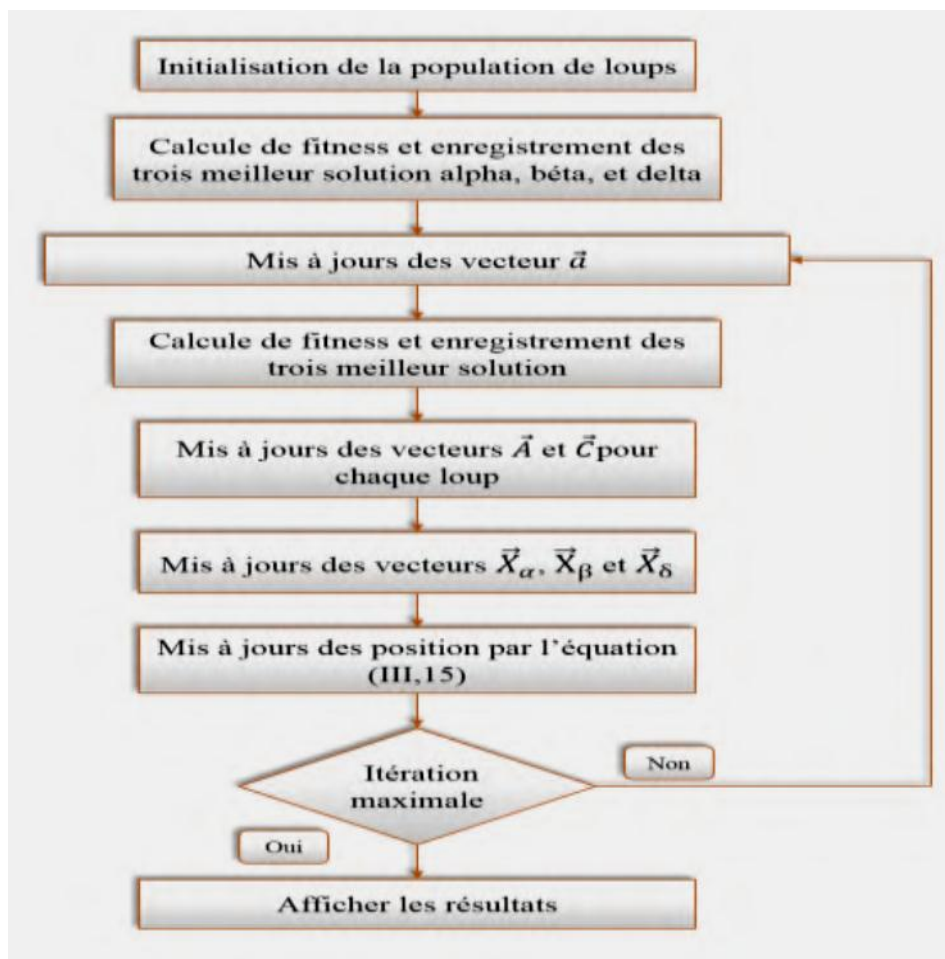


Figure4. 2:Organigramme de la méthode GWO.

4.5 Optimisation par GWO :

Le contrôleur PID nouvellement formé est placé en cascade avec la fonction de transfert du système CSTR ‘vanne de vusse’ dans une boucle à retour unitaire donné par le bloc de diagramme de la figure (4.3).

Les indices de performances utilisés dans ce travail sont l’intégrale de l’erreur quadratique (ISE) et l’intégrale de la valeur absolue de l’erreur (IAE)

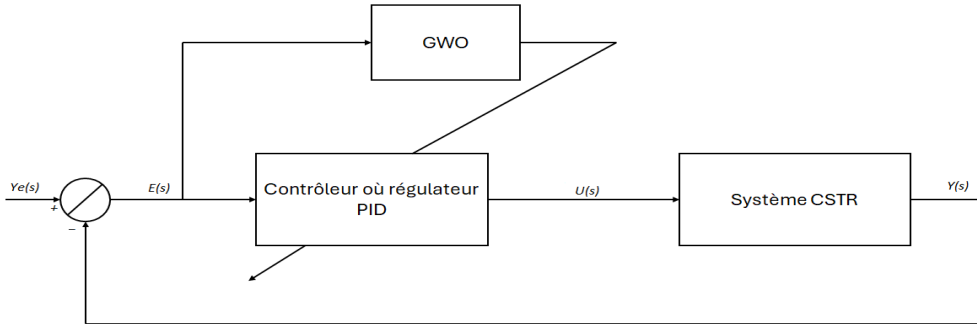


Figure4. 3: L’optimisation d’un régulateur PI par GWO pour un système CSTR
Après simulation du régulateur PI optimisé par GWO on a trouvé les résultats suivant :

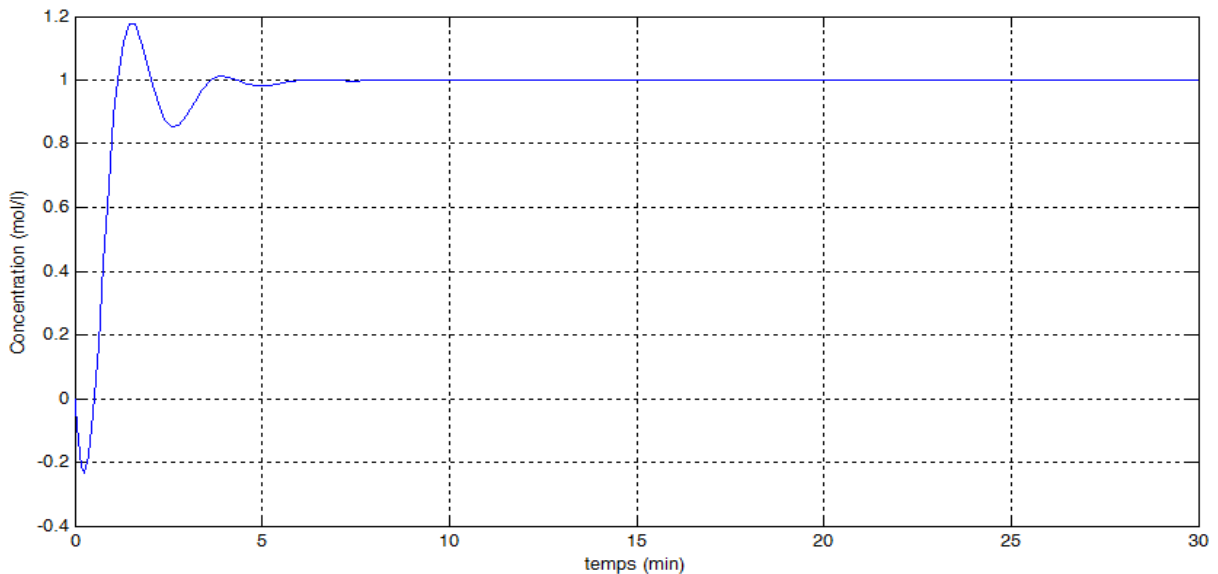


Figure4. 4 : Réponse du système avec régulateur PI optimisé par GWO

Tableau4. 1 :Les performances de régulateur PI GWO

| Les performances | Temps de montée (min) | Dépassement (%) | Temps de réponse à 5% (min) | IAE | ITAE | ISE | ITSE |
|------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------------|-------|-------|--------|--------|
| PI GWO | 1.46 | 11.9% | 3.26 | 1.164 | 1.055 | 0.9199 | 0.3746 |

4.5.1 Etude de Perturbation (GWO)

La consigne (Step1) = 1 ; perturbation (Step2) =1 à l'instant t=15 min ;

Paramètres du PI : $\begin{cases} k_p = 1.81 \\ k_i = 1.81 \end{cases}$

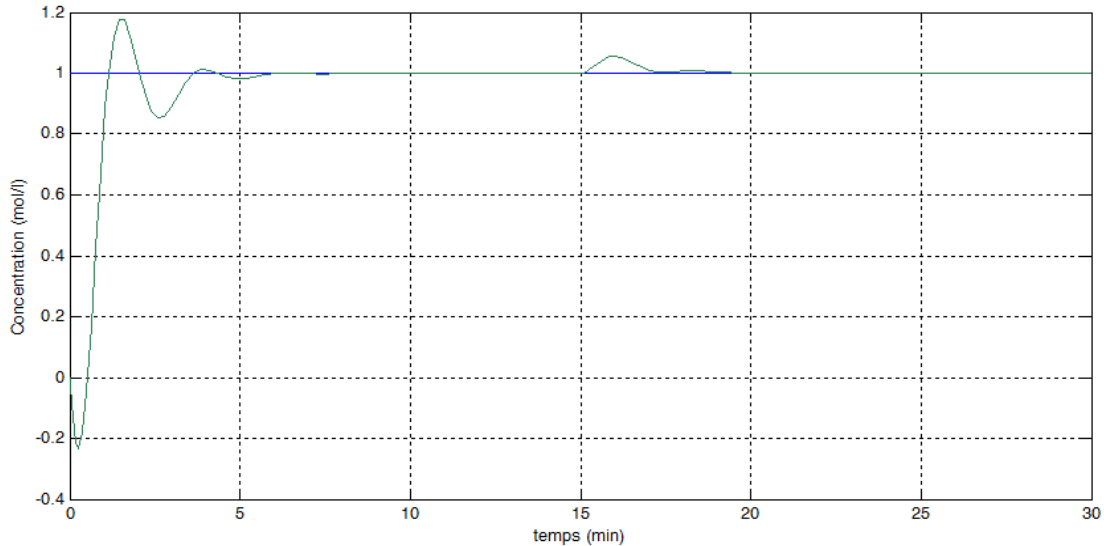


Figure4. 5 :Réponse de rejet de perturbation par régulateur PI avec GWO

4.6 L'optimisation par l'algorithme génétique (AG)

Les AG sont des algorithmes d'exploration fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Ils utilisent à la fois les principes de la survie des structures les mieux adaptées et les échanges d'information pseudo-aléatoires, pour former un algorithme d'exploration qui possède certaines des caractéristiques de l'exploration humaine. A chaque génération, un nouvel ensemble de créatures artificielles (des chaînes de caractères) est créé en utilisant des parties des meilleurs éléments de la génération précédente ; ainsi que des parties innovatrices. Ils exploitent efficacement l'information obtenue précédemment pour spéculer sur la position de nouveaux points à exploiter, avec l'espoir d'améliorer les performances [KED19].

4.7 Terminologie

Afin de comprendre ce qu'est un algorithme génétique, on doit se familiariser avec leur vocabulaire.

Environnement :

L'espace de recherche caractérisé en termes de performance correspond à chaque individu possible.

Population :

L'ensemble de tous les individus (nombres, dispositifs, points, ...) dans la recherche.

Une génération :

Ensemble d'individus tirés aléatoirement ou sélectionnés parmi la population.

Un individu :

Entité contenant des gènes, pour des problèmes d'optimisation numériques. Ils sont des nombres réels convertis en binaire.

Les gènes :

Contiennent les paramètres permettent d'évaluer une fonction (un ou plusieurs bits dans le cas d'un codage binaire par exemple).

La fonction d'évaluation :

S'appelle le fitness. Les AG's génèrent une recherche de maximum ou de minimum sur cette fonction. La pertinence des paramètres (des gènes) est donc proportionnelle à la fonction.

Les chromosomes :

Sont les éléments à partir desquels sont élaborées les solutions (croisement génétique, mutation) dans le cas le plus simple, l'individu est représenté par un seul chromosome qui contient plusieurs gènes.

4.8 Le principe de fonctionnement d'un GA

Un algorithme génétique recherche le ou les extrêmes d'une fonction définie sur un

Espace de données. Pour l'utiliser, on doit disposer des cinq éléments suivants :

- ✓ Un principe de codage de l'élément de population. Il faut choisir un bon codage qui aide à obtenir l'objectif.
- ✓ Génération de la population initiale avec une taille fixe, formée d'un ensemble fini de Solutions.
- ✓ Une fonction à optimiser. Celle-ci retourne une valeur appelée fitness ou fonction D'évaluation de l'individu.
- ✓ Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état.
- ✓ Des paramètres de dimensionnement : taille de la population, nombre total de générations, ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation.

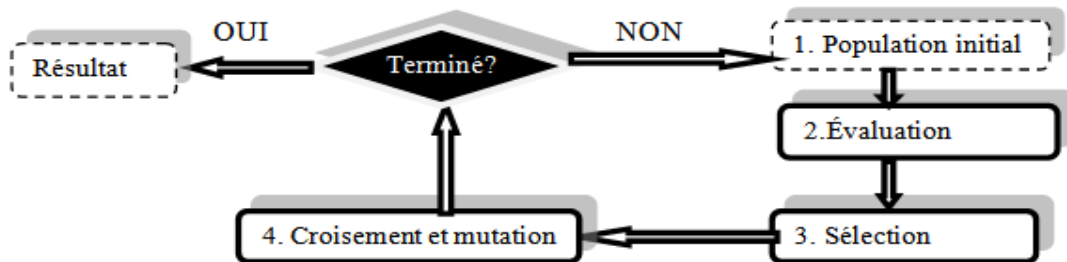


Figure4. 6: Le principe de l'algorithme génétique

4.9 Les Opérateurs

Les opérateurs jouent un rôle prépondérant dans la possible réussite d'un GA. Nous en dénombrons trois principaux : l'opérateur de sélection, de croisement et de mutation. Si le principe de chacun de ces opérateurs est facilement compréhensible :

4.9.1 L'opérateur de sélection

Cet opérateur est chargé de "favoriser" les meilleurs individus. Plus formellement, va générer à partir de la population courante une nouvelle population par copie des individus choisis de la population courante. La copie des chaînes s'effectue en fonction des valeurs de la fonction d'adaptation. Ce procédé permet de donner aux meilleures chaînes, une probabilité élevée de contribuer à la génération suivante ; il y a deux types de sélection :

- **La sélection par classement :**

Elle consiste à ranger les individus de la population dans un ordre croissant selon l'objectif et seuls les individus les plus forts sont conservés.

- **La sélection par tournoi :**

Le tournoi le plus simple consiste à choisir aléatoirement un nombre k d'individus dans la population et à sélectionner celui qui a la meilleure performance et qui participe à un tournoi (avec une probabilité $p \in [0 ; 1]$) sont remis ou sont retirés de la population [ATT19].

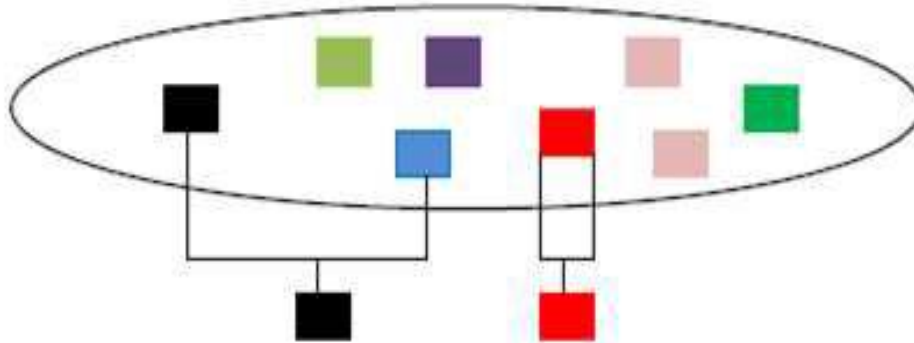


Figure4. 7:Le tournoi entre deux individus avec rééligibilité

4.9.2 L'opérateur de Croisement

C'est un processus crucial pour explorer l'éventail des solutions envisageables. Pour cela, la naissance d'une nouvelle personne se produit en sélectionnant aléatoirement une partie des gènes de chacun des deux parents.

Après la sélection, les personnes sont réparties aléatoirement en couples. Ainsi, les chromosomes parents sont copiés et recombinaison pour donner naissance à deux descendants qui possèdent les caractéristiques des deux parents.

Afin de conserver quelques parents dans la prochaine population, l'algorithme génétique associe une probabilité de croisement, qui permet de déterminer si les parents seront croisés entre eux ou simplement recopiés dans la prochaine population [ATT19].

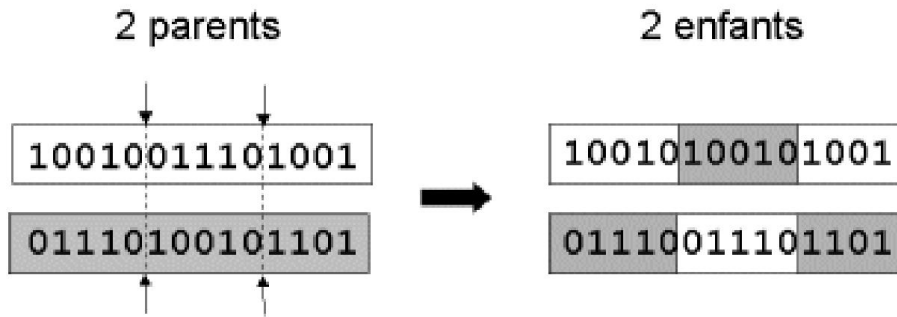


Figure4. 8: Croisement par deux points

4.9.3 L'opérateur de mutation

La mutation permet de transformer au hasard le codage d'un individu afin d'apporter une certaine diversité dans la population et empêcher que celle-ci converge trop vite vers un seul type d'individu parfait, incapable de sortir d'un minimum local. Dans les Algorithmes Génétiques, la mutation est considérée comme un opérateur secondaire par rapport au croisement [DOU14].

❖ *Exemple d'une mutation :*

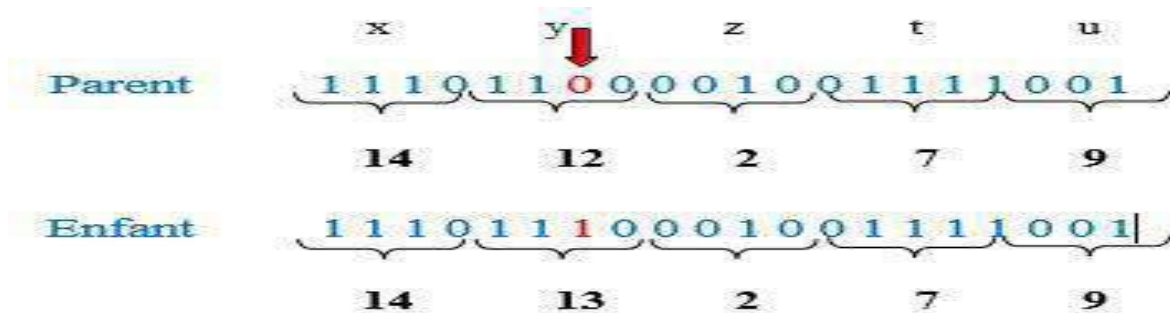


figure4. 9: Exemple d'une mutation en un point dans une chaîne binaire

4.9.4 Le codage

Le premier pas dans l'implantation des algorithmes génétiques est de créer une population d'individus initiaux. En effet, les algorithmes génétiques agissent sur une population d'individus, et non pas sur un individu isolé. Par analogie avec la biologie, chaque individu de la population est codé par un chromosome ou génotype. Une population est donc un ensemble de chromosomes. Chaque chromosome code un point de l'espace de recherche.

L'efficacité de l'algorithme génétique va donc dépendre du choix du codage d'un chromosome. [DOU14]

- **Le codage binaire :**

C'est le plus utilisé. Chaque gène dispose du même alphabet binaire {0,1}. Si un gène est représenté par un entier long (par exemple 32 bits), les chromosomes qui sont des suites de gènes sont représentés par des tableaux de gènes et les individus de notre espace de recherche sont représentés par des tableaux de chromosomes.

- **Le codage réel :**

Il a le mérite d'être simple. Chaque chromosome est en fait un vecteur dont les composantes sont les paramètres du processus d'optimisation. Par exemple, si on recherche l'optimum d'une fonction de n variables $f(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n)$, on peut utiliser tout simplement un chromosome contenant les n variables: $(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n)$, avec ce type de codage, la procédure d'évaluation des chromosomes est plus rapide vu l'absence de l'étape de transcodage (du binaire vers le réel) [DOU14].

4.10 La fonction d'évaluation ou objective (fitness)

La fonction objective est nécessaire pour évaluer le meilleur régulateur PID pour le système. Une fonction objective pourrait être créée pour trouver un régulateur PID qui donne un dépassement le plus petit, un temps de montée ou un temps de stabilisation le plus rapide. Cependant, afin de combiner l'ensemble de ces objectifs, il a été décidé de concevoir une fonction objective qui permettra de minimiser l'erreur du système commandé.

Chaque chromosome de la population sera évalué par la fonction objective une seule fois. Les chromosomes sont formés par trois valeurs qui correspondent aux trois gains à ajuster pour avoir un comportement satisfaisant du régulateur PID. Les gains K_p , K_i et K_d sont des nombres réels qui caractérisent l'individu à évaluer [KED19]

4.11 Régulation du système par régulateur PID optimisé par AG

L'objectif de cette partie est d'appliquer la stratégie d'optimisation par (Algorithmes génétiques) dont le but de calculer les coefficients du régulateur PID pour avoir une meilleure réponse indicielle.

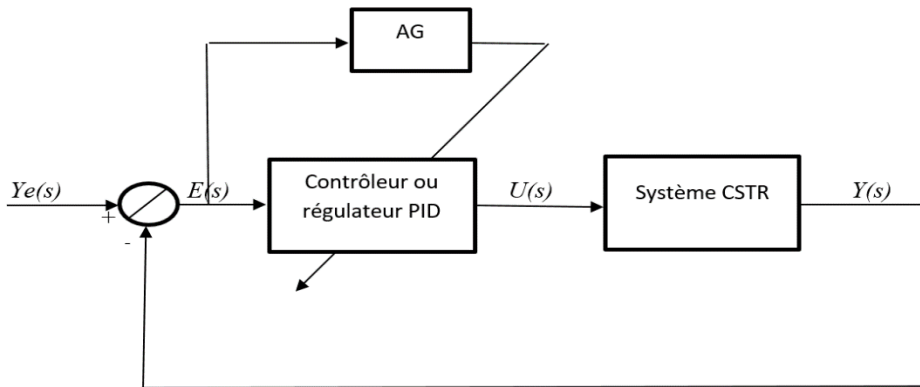


Figure4. 10:Schéma illustre l'optimisation d'un régulateur PID par AG pour un système

Après simulation du régulateur PID optimisé par AG on a trouvé les résultats suivants :

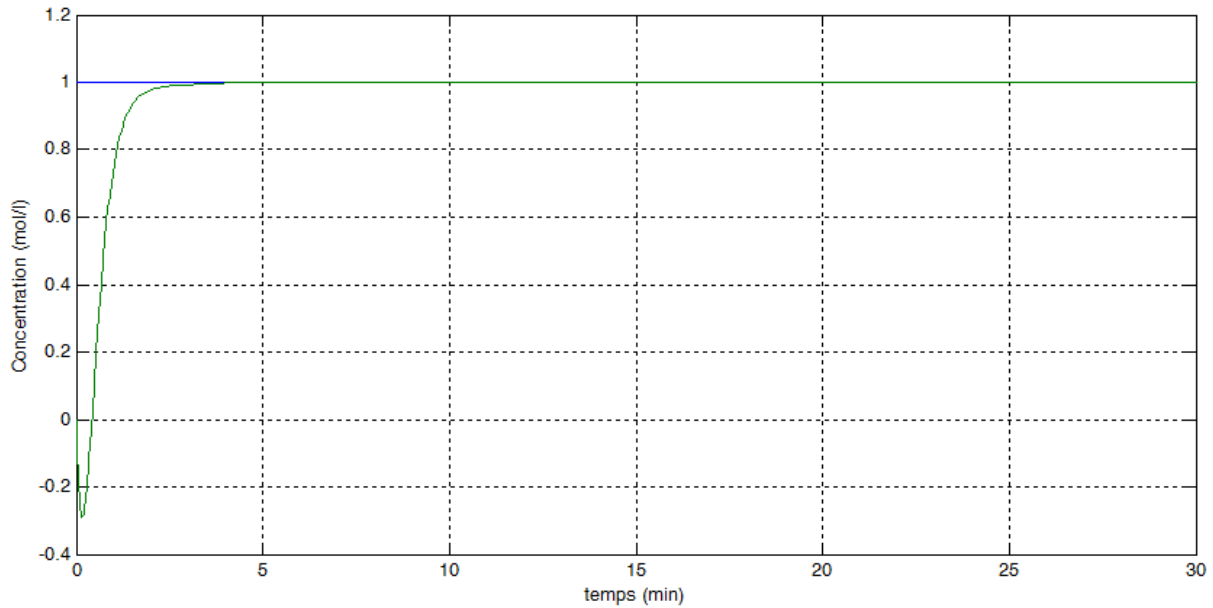


Figure4. 11:Réponse du système avec régulateur PID optimisé par AG

Tableau4. 2: Les performances de régulateur PID AG

| Les performances | Temps de montée (min) | Dépassement (%) | Temps de réponse à 5% (min) | IAE | ITAE | ISE | ITSE |
|------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| PID AG | 0.88 | 0 | 1.6 | 0.9362 | 0.4902 | 0.8218 | 0.2637 |

4.11.1 Etude de Perturbation(AG) :

La consigne (Step1) = 1 ; perturbation (Step2) =1 à l'instant t=15 min ;

$$\text{Paramètres du PID : } \begin{cases} k_p = 1.93 \\ k_i = 1.82 \\ k_d = 0.42 \end{cases}$$

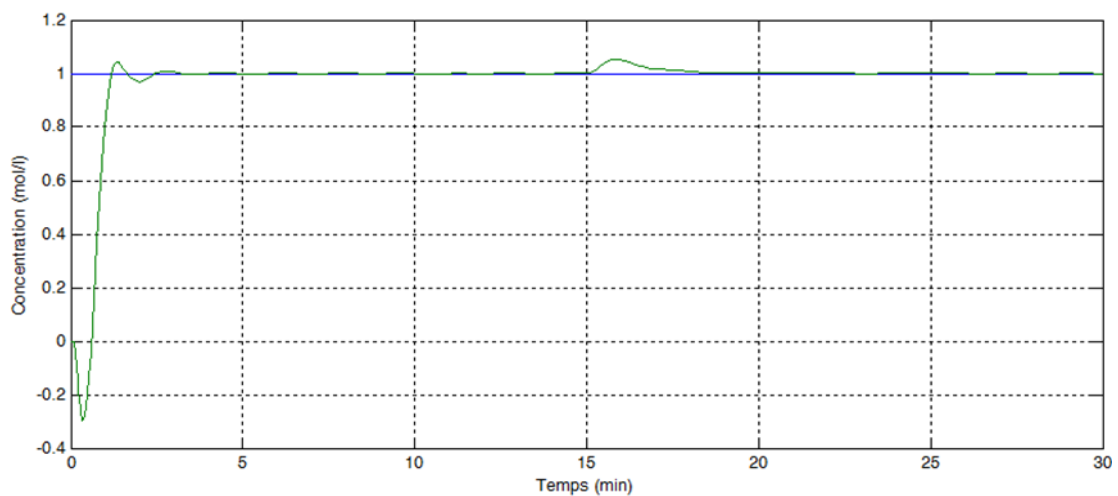


Figure4. 12:Réponse de rejet de perturbation par régulateur PID avec AG

On remarque que le régulateur PI_GWO réagit avec la perturbation rapidement que le régulateur PID_AG .mais toujours la réponse avec méthode d'AG présente un dépassement lors du changement de consigne.

4.12 Comparaison PID Z-N, PI GWO et PID AG

L'application de la commande PID sur la fonction de transfert G en utilisant des différentes méthodes classiques pour l'ajustage des paramètres et une méthode d'intelligence artificielle a déjà donné des résultats peu différents entre eux. L'observation à l'œil nu peut constater ce qui est mieux et ce qui ne l'est pas. Des fois et devant l'impossibilité de découvrir tous les détails, on est obligé d'utiliser les critères de performances notés dans ce chapitre.

Les résultats de simulation sur MATLAB/SIMULINK et le calcul des critères pour chaque méthode d'ajustage des paramètres a servi de construire le tableau (4.3) qui présentent les critères (IAE, ISE, ITAE, ITSE) assurés par la commande PID sur la fonction de transfert obtenue par linéarisation du CSTR.

Tableau4. 3:Comparaison des performances de PID Z-N, PI GWO et PID AG

| Les performances | Temps de montée (min) | Dépassement (%) | Temps de réponse à 5% (min) | IAE | ITAE | ISE | ITSE |
|------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| PID-ZN | 0.548 | 13.9% | 1.46 | 1.104 | 0.7567 | 1.052 | 0.342 |
| PID AG | 0.88 | 0 | 1.6 | 0.9362 | 0.4902 | 0.8218 | 0.2637 |
| PI-GWO | 0.46 | 11.9% | 3.26 | 1.164 | 1.055 | 0.9199 | 0.3746 |

Interruption des résultats

- D'après les résultats de tableau obtenue, on remarque une amélioration considérable obtenue grâce au PID_AG des bénéfiques de ISE, IAE, ITAE, ITSE par rapport PID_ZN et PI_GWO et une diminution de dépassement jusqu'à 0%.
- On observe aisément que le régulateur PI_GWO a les meilleurs performances coté temps de monté et dépassement que le régulateur PID_ZN et même si une augmentation du temps de réponse.
- Après la comparaison entre les régulateurs PID par Zeigler-Nichols PI_GWO et PID_AG on trouve que la meilleure réponse qu'on peut obtenir pour notre système c'est la régulation avec PID_AG puisqu'elle assure la stabilité et la rapidité, c'est-à-dire atteindre la valeur optimale de la concentration Cb.

4.13 Conclusion

Ce chapitre a introduit les notions de GWO et de l'AG afin de concevoir et de mettre en place un contrôleur intelligent pour le système CSTR. Selon les résultats de la simulation, il a été démontré que la méthode suggérée est une méthode astucieuse pour évaluer les paramètres optimaux du régulateur PID en utilisant GWO et l'AG pour le système CSTR. De plus, ils sont confirmés que le contrôleur suggéré peut réaliser une recherche efficace des paramètres optimaux du régulateur PID tout en réduisant au minimum les fonctions objectives telles que IAE et ISE. Selon la comparaison avec la méthode Ziegler Nichols et GWO, il est démontré que cette méthode peut améliorer de manière plus efficace la performance dynamique du système en choisissant une fonction objectif appropriée.

Conclusion générale

De nos jours, la simulation des systèmes chimiques est devenue indispensable afin d'assurer la sécurité des individus et de l'environnement professionnel. Ce travail vise à élaborer et à gérer un réacteur chimique à cuve parfaitement agitée (CSTR) isotherme afin de réguler la concentration de sortie de C_b .

L'approche employée consiste en une modélisation initiale suivie d'une simulation. La modélisation repose sur un modèle mathématique élaboré en utilisant le bilan de matière du réacteur afin de déduire sa fonction de transfert. Au cours de ce travail, nous nous sommes intéressés à la modélisation et à la commande d'un réacteur chimique parfaitement agité (CSTR).

Au début, nous avons rappelé des généralités sur les réacteurs chimiques, leurs caractéristiques et leurs classifications. Par la suite, nous avons présenté la modélisation du réacteur chimique CSTR.

Dans un objectif de commande du CSTR, nous avons conçu un régulateur PID en utilisant la méthode pour calculer ses réglages. Dans le but d'améliorer les performances des approches de commande développées, nous avons introduit l'optimisation basée sur les algorithmes génétiques et l'optimisation du loup gris. Les résultats des simulations montrent une amélioration des performances des commandes développées pour le CSTR.

BIBLIOGRAPHIE

- [ALI20]** : Alilich Loqman, Messadi Abdelkrim, Régulation PID par API et supervision du niveau d'un réservoir cylindrique ,université Mohammed benyahia Jijel, 2020
- [AOU14]** : AOUS Walid, SEDDAOUI Ghies «Conception et réalisation d'un régulateur PID numérique à base d'un microcontrôleur PIC 16f 877a ».Mémoire de MASTER, Université de Tizi-Ouzou, 2014.
- [ATT19]** : Attouti Fateh, méthodes d'optimisation pour l'auto-réglage de contrôleur PID d'ordre fractionnaire, mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme master, université Bordj Mokhtar Annaba département électronique ,2019.
- [BEN20]** : Bensadok Nacera Benyahlou Asmaa, modélisation et application des régulateurs PID et MPC sur un réacteur chimique institut de maintenance et sécurité industrielle2020.
- [Bou11]** : Bousahel Wassim Mohamed. Commande extrémal adaptative appliquée ou réacteur chimique, projet fin d'étude école nationale polytechnique 2011.
- [BOU22]** : Bougheza Abdelmalek, Mimoun Merouan, étude comparative en simulation entre régulateur PID classique et un régulateur PID intelligent centre universitaire Boussof ABDELhafid –Mila 2022.
- [DOU14]** Douadi Fadila, méthodologie d'optimisation par les techniques intelligentes d'un contrôleur PID pour un système CSTR, mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de master, université de Sétif, 2014.
- [EDU12]** : EDUARDO Roldan reyes.extraction et modélisation de connaissance :application à la conception de procédés doctorat de l'université de Toulouse <https://theses.hal.science/tel-00881534/file/hdr.pdf>. 2012
- [JEA05]** : Jean-Léon HOUZELOT, calcul des réacteurs catalytiques 2005
- [HIR20]** : K.HIROSHI, LI RONG « identification of volterrakermels of nonlinear van de vusse reactor»2 juin 2002, page consultée le 14/06/2020.
- [KAD19]** Keddi Tarek, Meghari Zakaria, optimisation de la commande vectorielle par algorithme génétique, mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme master, université Ouargla 2019.
- [Khe21]** : Kheladi mohamed el amine, Kheladi zoheir Techniques métaheuristiques pour l'optimisation des performances d'une commande pour moteur à courant continu pour l'obtention du diplôme de master Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen 2021.

-
- [MAR13]:** Marghsi Mohamed «Modélisation et simulation d'un réacteur chimique, 2013
- [MEC20]:** Mecene Hakim , Laissaoui Hamza. Contrôle actif du système structurel intelligent basé sur un contrôleur PID optimal en utilisant un optimiseur avancé de Grey Wolf Université Djilali Bounâama - Khemis Miliana 2020
- [MEN20]:** MENASSEL, Oussama. *Commande Optimale d'un Réacteur Parfaitement Agité CSTR en Utilisant les Algorithmes Génétiques* université Tébéssa 2020.
- [OUL21]:** Ould Moussa chaima boukaroucha hafssa, modélisation et simulation d'un réacteur continu parfaitement agité mémoire fin d'étude de master académique université Abdel Hamid ibn Badis- Mostaganem 2021.
- [RED17]:** REDJAL Mohamed, oud Hassiba, simulation d'un réacteur parfaitement agité continu non isotherme master 2017.
- [RHA 11]:** Rhaskil Ibteissam, Hamidani Salima, mémoire « modélisation et simulation D'un réacteur opérant en mode polytropique », Ome Bouaghi, 2011.
- [TRA02]:** Trambouze, Pierre et Euzen, Jean-Paul. *Réacteurs chimiques (Les)*. Editions OPHRYS, 2002.
- [TRA84]:** P.Trambouz, H. Vanlandegham, J.P. Walker(1984) (Les réacteurs chimiques conception/ calcul/ mise en œuvre).
- [WEB22]:** Les réacteurs chimique [PDF]disponible sur : https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/dai-fichsureindustrie_reacteurs_chimiques.pdf?ID=16795, page consulté le 08/04/2022.
- [XUA09]:** Xuân-Mi Truong-Meyer. Modélisation en génie des procédés page consulté le 15/02/2023,2009

