





Réalisé par: Mohammed JABBARI

Professeure : Mme A.JAI



بِسَمِ اللهِ الرَّحْمَٰ لِالرَّحِيمِ
الحمد لله الذي علم بالقلم علم الإنسان ما لم يعلم،
والصلاة والسلام على معلم الناس الاول
ومخرجهم من الضلالة إلى الهدى
أما بعد،

## Sommaire

#### Introduction (p4)

- 1. Théorie des Contrôleurs PID (p5)
- 1.1 Principe du Contrôleur PID
- 1.2 Variantes du PID
- 1.3 Comparaison entre PI, PD et PID
- 2. Étude de Cas : Régulation de Température d'une Chambre (p7)
- 2.1 Modèle du Système
- 2.2 Simulation sous MATLAB Simulink
- 2.2.1 Avant d'insérer le contrôleur PID
- 2.2.2 Influence du milieu extérieur Avant d'insérer

#### le contrôleur PID

- 2.2.3 Problématique
- 2.2.4 insertion du contrôleur PID
- 2.2.5 Utilisation du contrôleur PI
- 2.2.6 Utilisation du contrôleur PD
- 2.2.7 Utilisation du contrôleur P et I
- 2.2.8 Utilisation du contrôleur PID
- 3. Comparaison entre les trois contrôleurs et conclusion générale (p47)
- 3.1 comparaison entre PI, PD et PID
- 3.2 conclusion générale
- 3.3 conclusion générale (version anglaise)

## Introduction

Le contrôle PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) est une méthode couramment utilisée en automatisme pour la régulation de systèmes dynamiques. Grâce à sa capacité à combiner simplicité, robustesse et efficacité, il est présent dans de nombreuses applications industrielles telles que la régulation de température, la vitesse des moteurs, et la gestion de processus chimiques. Ce rapport vise à fournir une compréhension approfondie des contrôleurs PID et leurs variantes PI et PD. Il explore également le choix du contrôleur optimal pour une application spécifique : la régulation de la température d'une chambre.

La simulation sera réalisée à l'aide de MATLAB Simulink, un outil puissant pour la modélisation et la validation des systèmes dynamiques. L'objectif est d'évaluer et de comparer les performances des contrôleurs PI, PD et PID, en termes de rapidité, précision et capacité à répondre aux perturbations. Une attention particulière sera portée à l'adéquation du contrôleur PID pour garantir une régulation stable et fiable dans des conditions variées.

#### 1. Théorie des Contrôleurs PID

## 1.1 Principe du Contrôleur PID

Un contrôleur PID ajuste la sortie du système en fonction de trois termes :

- Terme Proportionnel (P) : Corrige en fonction de l'erreur actuelle.
- Terme Intégral (I) : Corrige en fonction de l'accumulation des erreurs passées.
- Terme Dérivé (D) : Anticipe les erreurs futures en fonction de la dérivée de l'erreur.

Si la consigne thermique est fixée à 50°C dans une chambre, le capteur de température mesure la valeur actuelle. Le contrôleur PID ajuste alors les entrées du système (chauffage, refroidissement) pour maintenir la température proche de cette référence thermique.

#### 1.2 Variantes du PID

- Contrôleur PI (Proportionnel-Intégral) : Combine les termes proportionnel et intégral pour éliminer les erreurs statiques mais sans anticiper les variations rapides.
- Contrôleur PD (Proportionnel-Dérivé) : Combine les termes proportionnel et dérivé, permettant une réponse plus rapide, mais ne corrige pas les erreurs de régime permanent.
- Contrôleur PID : Intègre les trois termes pour une régulation robuste et précise, avec des corrections rapides et une élimination des erreurs.

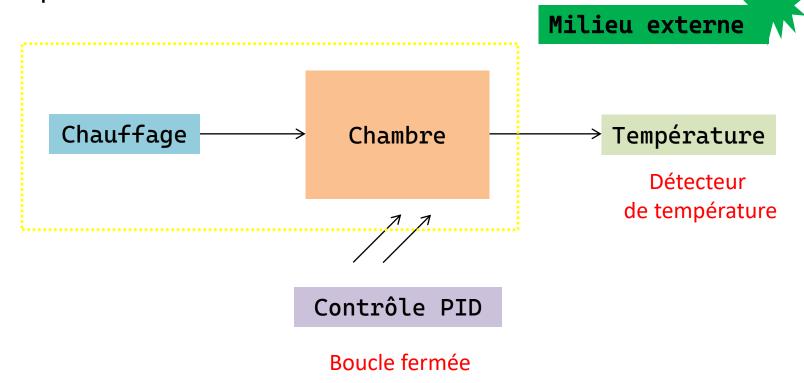
### 1.3 Comparaison entre PI, PD et PID

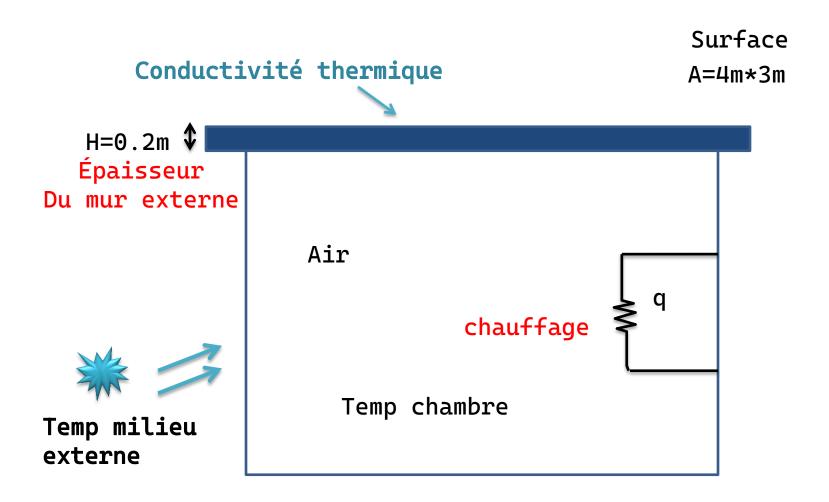
Critère	PI	PD	PID
Réponse rapide	Moyenne	Élevée	Élevée
Élimination des erreurs permanentes	Oui	Non	Oui
Complexité	Moyenne	Moyenne	Élevée

## 2. Étude de Cas : Régulation de Température d'une Chambre

## 2.1 Modèle du Système

La chambre est modélisée comme un système dynamique à une entrée (puissance de chauffage) et une sortie (température)





## Les hypothèses principales du modèle sont :

- La puissance de chauffage est fournie par un dispositif électrique contrôlé.
- Les pertes thermiques sont proportionnelles à la différence de température entre la chambre et l'environnement extérieur.
- La distribution de la chaleur est homogène dans la chambre.

Ce modèle est un système de premier ordre, souvent rencontré dans les applications thermiques, où la constante de temps joue un rôle clé dans la dynamique de réponse. Pour simuler ce système, le modèle est implémenté dans MATLAB Simulink, en utilisant un intégrateur pour résoudre l'équation différentielle, avec des blocs représentant , , et les pertes thermiques.

La chambre étudiée est un espace <u>clos</u> dont la température doit être contrôlée pour des applications telles que le confort thermique, les laboratoires, ou les processus industriels. Le système thermique comprend les éléments suivants :

Source de chauffage : Généralement une résistance électrique contrôlée qui fournit la chaleur nécessaire pour augmenter la température.

Environnement extérieur : La chambre échange de la chaleur avec l'extérieur, ce qui provoque des pertes thermiques proportionnelles à la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur.

Capacité thermique : La chambre possède une certaine inertie thermique qui ralentit les variations rapides de température.

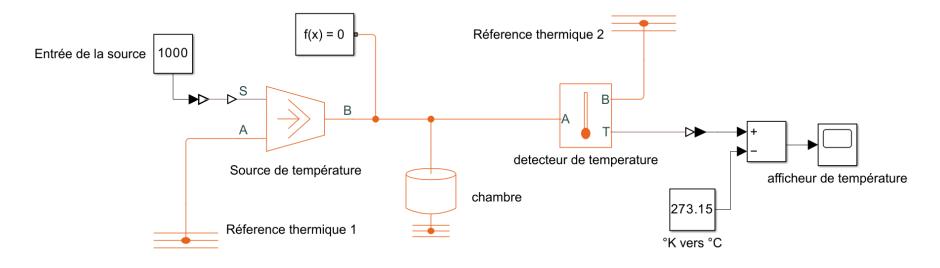
Le modèle thermique de la chambre est basé sur les principes de conservation de l'énergie : la chaleur ajoutée au système est soit stockée (inertie thermique) soit perdue vers l'environnement. Ce modèle peut être décrit mathématiquement par une équation différentielle de premier ordre, reliant la température interne , la puissance de chauffage , et les paramètres thermiques. Les hypothèses principales pour ce modèle sont :

- La température dans la chambre est homogène (pas de gradient thermique).
- Les pertes thermiques suivent une loi linéaire.
- La puissance de chauffage peut être ajustée en temps réel.

#### 2.2 Simulation sous MATLAB Simulink

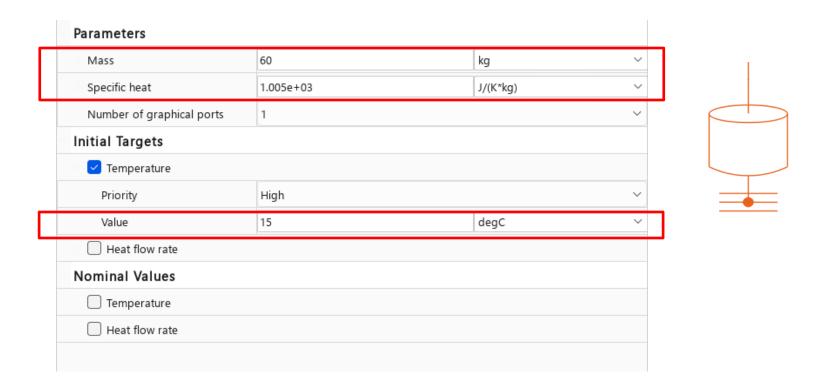
#### 2.2.1 Avant d'insérer le contrôleur PID

Sans contrôleur PID, le système thermique de la chambre est sujet à des variations de température importantes, avec des dépassements et des erreurs permanentes significatives lorsqu'une perturbation ou un changement de consigne survient



#### Paramètres de la chambre

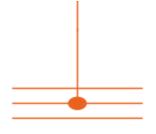
La chambre quon veut controller sa température est modélisé sur simulink par une masse thermique de masse 60kg et dune chaleur de 1005 KJ/(°K\*Kg) et une température initiale de 15°C



#### Modélisation de différents éléments de la chambre

## a. Référence thermique :

La **référence thermique** est un concept utilisé dans différents domaines pour désigner une température cible ou un point de consigne thermique auquel un système doit se maintenir ou tendre. Elle est cruciale dans les systèmes de régulation et de contrôle de température, notamment dans des applications industrielles, électroniques, ou environnementales.



Dans un système de régulation, la référence thermique représente la valeur de consigne (setpoint) qui est comparée à la température mesurée pour ajuster le système grâce à un contrôleur (par exemple, PID). L'objectif est de minimiser l'erreur entre la température réelle et la consigne.

## b. Détecteur de température:

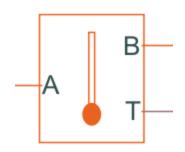
Un détecteur de température mesure la température d'un objet ou d'un environnement. Les principaux types sont : Thermistances (NTC/PTC) : Résistance change avec la température. Utilisées dans les appareils ménagers.

RTD (ex : PT100) : Haute précision, utilisées en industrie.

**Thermocouples**: Mesure de -200°C à 1800°C, pour moteurs ou chaudières.

Capteurs semi-conducteurs (ex : LM35, DS18B20) : Faciles à interfacer avec Arduino.

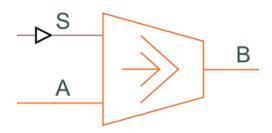
Capteurs infrarouges (ex : MLX90614) : Mesure sans contact, pour appareils médicaux.



exemple



## c. Source thermique:



Une source de température sous Simulink simule une variation de température pour des systèmes thermiques ou des capteurs. Elle peut être représentée par :

- Signaux simples :
  - Température fixe (Constant).
  - Température variable (Ramp, Sine Wave).
- Composants Simscape :
  - **Source de température** : Simule un système thermique réel.
  - Utilisé avec des blocs comme **Thermal Mass** ou **Heat Flow Sensor**.
- Modèles mathématiques :
  - Fonction personnalisée pour des variations complexes.

exemple



## d. Convertisseur physique vers simulink et inverse :

un convertisseur physique vers Simulink et inverse est utilisé pour connecter des systèmes physiques modélisés avec Simscape (domaine physique) à des signaux classiques de Simulink (domaine numérique). Ces convertisseurs permettent d'interfacer des signaux physiques et numériques.

## 1. De physique vers Simulink

Bloc utilisé: PS-Simulink Converter (PS: Physical Signal). Rôle: Convertit une grandeur physique (tension, courant, température, etc.) en signal numérique compatible avec Simulink.

#### Paramètres :

Échelle du signal (facultatif). Unité (par exemple, volts, degrés Celsius).



## Exemple:

Mesurer une température simulée dans un système thermique (Simscape) et l'envoyer à un bloc PID ou un affichage dans Simulink.

## 2. De Simulink vers physique

Bloc utilisé : Simulink-PS Converter.

**Rôle** : Convertit un signal numérique Simulink (par exemple, une consigne) en un signal physique interprété par Simscape.

#### Paramètres :

Filtrage du signal si nécessaire. Unité associée au signal.

## Exemple:

Envoyer une commande de tension issue d'un contrôleur PID (Simulink) à un moteur modélisé en Simscape.

## f(x) = 0

## e. Bloc f(x)=0 (solver):

Le bloc fx=0 dans Simulink est utilisé pour imposer une condition de nul sur une fonction ou une équation. Il permet de définir une contrainte ou un état d'équilibre dans le modèle, en garantissant que l'expression associée soit égale à zéro. Ce bloc est souvent utilisé pour résoudre des équations ou ajuster des variables dans un système dynamique.

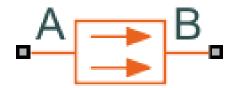
# 2.2.2 Influence du milieu extérieur Avant d'insérer le contrôleur PID :

Avant d'intégrer le bloc de régulation basé sur le contrôleur PID, nous introduisons l'effet de la température du milieu extérieur en ajoutant un nouveau bloc à notre modélisation sous Simulink.

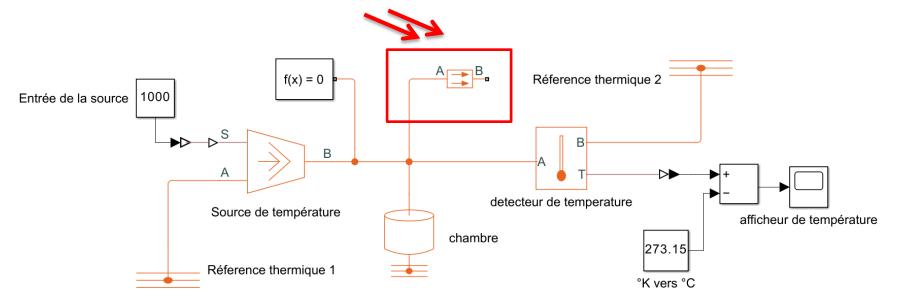
C'est le bloc Conductive Heat Transfer (transfert de chaleur conductif) dans Simulink, issu de la bibliothèque Simscape Foundation > Thermal > Thermal Elements, modélise le transfert de chaleur par conduction entre deux points à travers un matériau.

#### Fonctionnement:

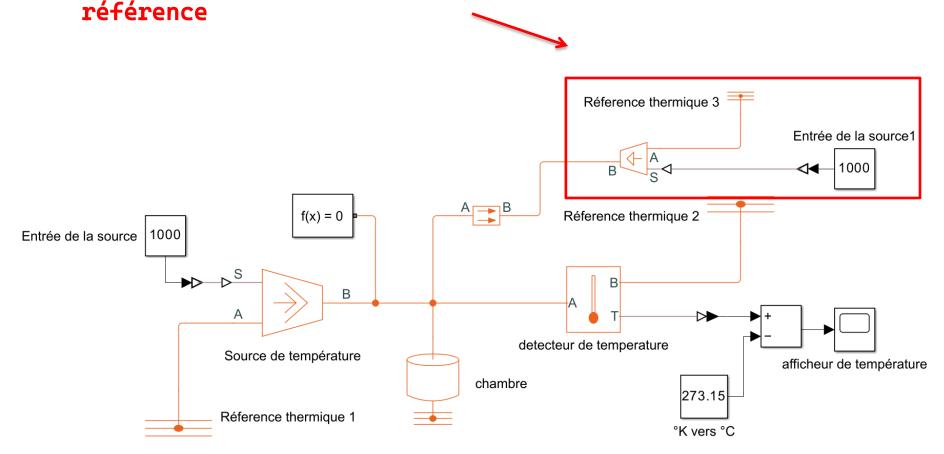
La chaleur est transférée proportionnellement à la différence de température entre les deux ports thermiques (A et B). Le flux thermique est calculé selon la loi de Fourier



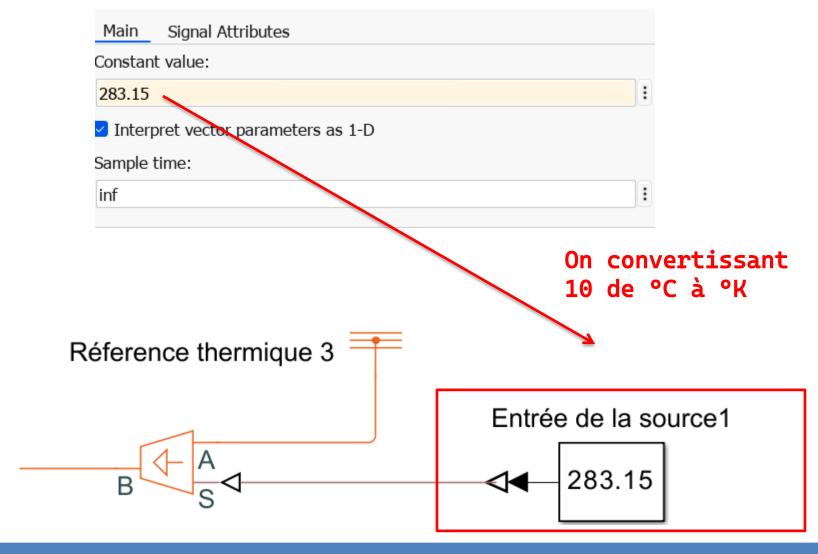
## **Conductive Heat Transfer**



Ce bloc nécessite l'ajout d'une source de température pour assurer son fonctionnement qui doit être liée à la même entrée principale et la



Supposons que la température est l 'extérieur est de 10°C, configurons donc cette source



Le bloc **Conductive Heat Transfer** nécessite de définir des paramètres comme la **conductivité thermique**, l'**épaisseur** et la **surface**.

C'est ce que nous allons aborder et régler dans la section

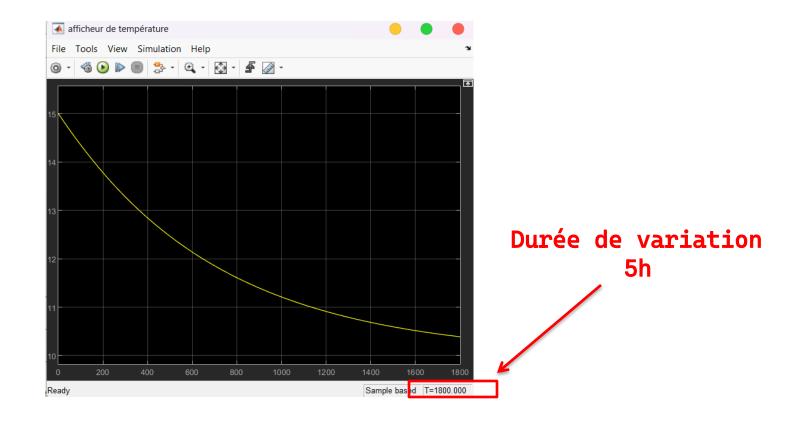
suivante.

Parameters			
Conductivity type	Constant		~
Wall geometry	Planar		~
Area	12	m^2	~
Thickness	0.2	m	~
Thermal conductivity	1.43	W/(K*m)	~
Initial Targets			
Nominal Values			

Supposons que la température est l'extérieur est de 10°C, et que le heat à l'interieur est etteind, on le remet des paramètres à zéro 0°C



On remarque d'après l'afficheur que la température de la chambre diminue de 15°C jusqu'à presque 10°C de l 'extérieur après une durée de 5h.



Si on rajoute la source thermique on remarque d'après l'afficheur que la température de la chambre augmente de 10°C jusqu'à presque 15°C et entre en régime presque permanent après une durée de 10h.



On remarque que même après une longue durée, on arrive pas à la température de 30°C voulue dans la chambre.

## 2.2.3 Problématique

Pour maintenir une température convenable dans la chambre, il est nécessaire d'utiliser une source thermique (bloc "Heat") et de l'ajuster en permanence afin de compenser les pertes de chaleur dues aux échanges thermiques avec l'extérieur. Cependant, cette tâche devient impraticable en raison des variations continues et imprévisibles de la température extérieure.

#### La solution?

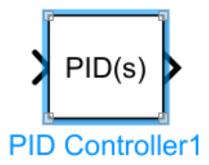
Mettre en place un système de régulation automatique, tel qu'un contrôleur PID, qui ajustera automatiquement la puissance de la source thermique en fonction des fluctuations de température, garantissant ainsi une température stable à l'intérieur de la chambre malgré les variations externes. Mais quel correcteur à utiliser ?
PI ? PD ? Ou bien PID ?

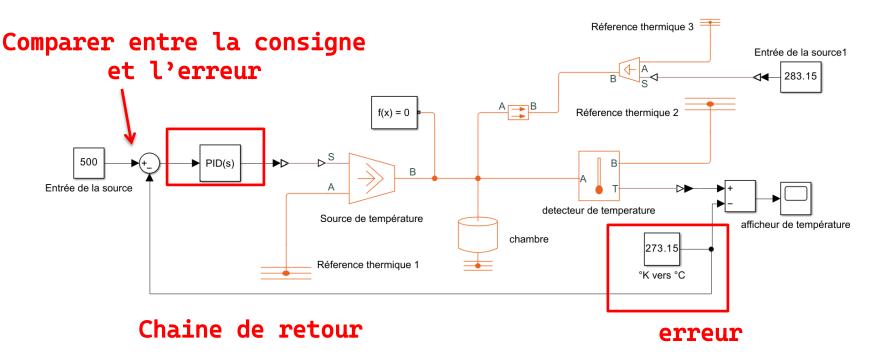
#### 2.2.4 insertion du contrôleur PID

Pour insérer le contrôleur, il est essentiel de déterminer son emplacement approprié dans le système. Celui-ci va comparer la valeur de la consigne, c'est-à-dire l'entrée 1 de la source de température externe, avec la température mesurée dans la chambre, obtenue à travers le détecteur de température.

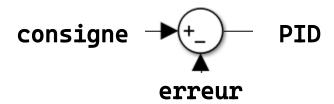
Il faut donc passer d'une boucle fermée vers une boucle ouverte !

On insère un contrôleur PID

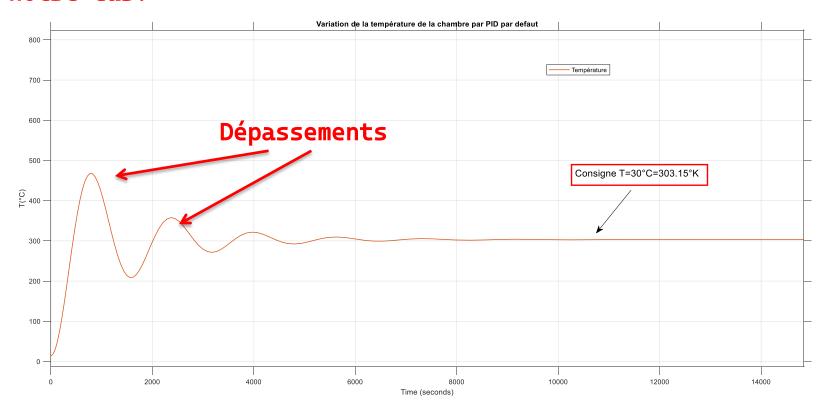




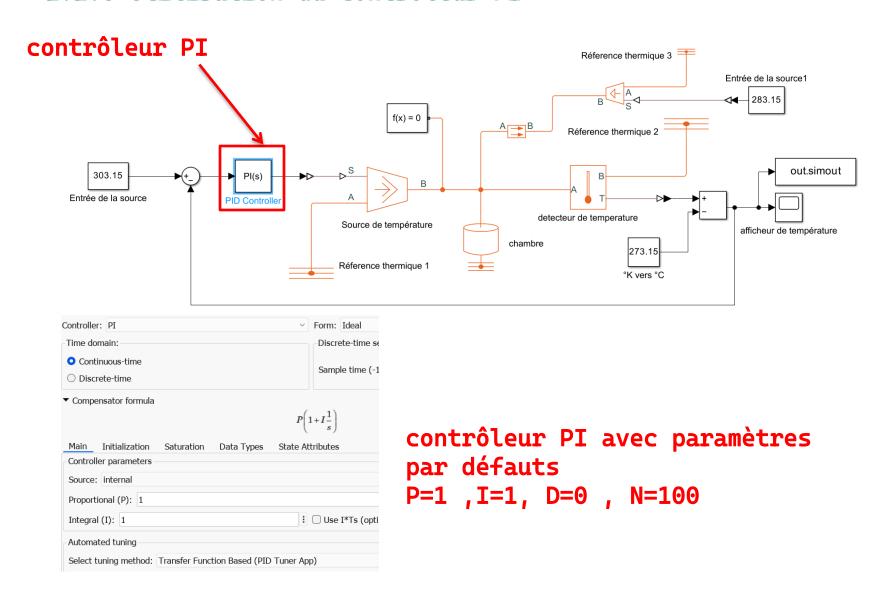
On insère donc le contrôleur PID dans la sortie d'un comparateur, lequel prend en entrée positive (+) la valeur de la consigne et en entrée négative (-) l'erreur mesurée par le détecteur de température dans la chambre. Grâce au contrôleur PID, un signal électrique est envoyé à la source de température interne "Heat" pour réguler la température.



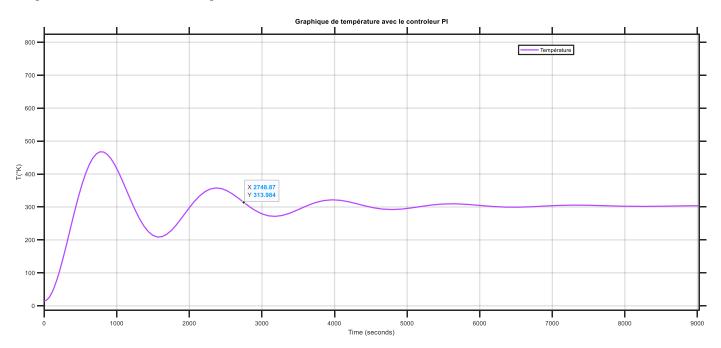
Il est à noter qu'avec les paramètres par défaut du contrôleur PID, des fluctuations apparaissent durant le régime transitoire sur une période relativement longue, avant que la température ne se stabilise à la valeur souhaitée, soit 30°C. Ainsi, notre objectif dans la suite sera de comparer différents contrôleurs PID afin de choisir celui qui offrira les meilleures performances dans notre cas.



#### 2.2.5 Utilisation du contrôleur PI

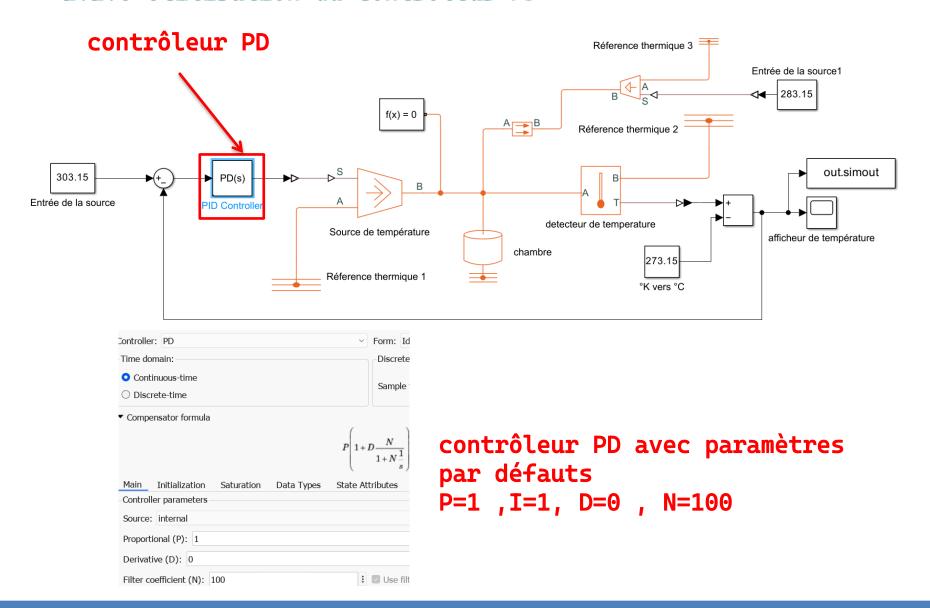


## Graphique de la température avec le contrôleur PI

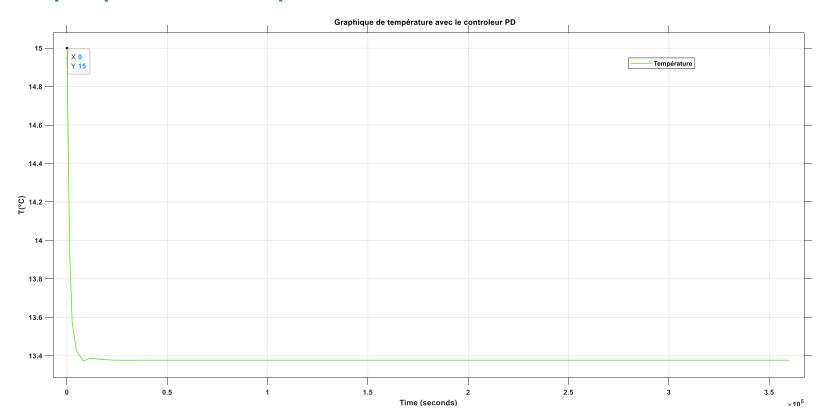


Le graphique de température obtenu avec le contrôleur PI montre trois dépassements successifs à 800s, 2300s et 3900s, indiquant que le système réagit trop fortement à la consigne, entraînant des oscillations avant de stabiliser la température. Bien que la réponse soit relativement rapide, ces fluctuations montrent que le contrôleur PI est mal calibré, ce qui affecte la stabilité du système. Les dépassements suggèrent qu'un ajustement des paramètres du contrôleur, notamment du terme intégral, est nécessaire pour réduire les oscillations et améliorer la rapidité et la précision de la régulation de la température.

#### 2.2.6 Utilisation du contrôleur PD



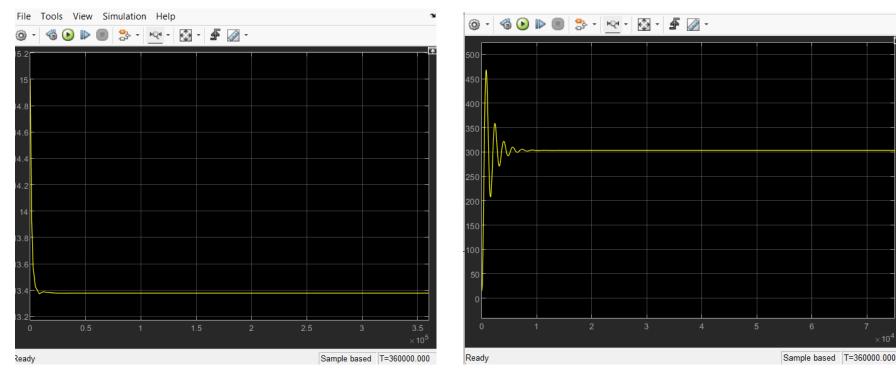
## Graphique de la température avec le contrôleur PD



Le graphique obtenu avec le contrôleur PD montre que la température descend de manière exponentielle très rapidement, atteignant un régime quasi stable en seulement 0.2×1050.2 \times 10^5 secondes. Cependant, après cette descente rapide, la température se stabilise à une valeur bien éloignée de la consigne, ce qui indique que le contrôleur PD n'a pas réussi à maintenir la température à la valeur souhaitée.

Cette réponse est problématique pour notre cas, car une régulation rapide mais incorrecte de la température n'est pas acceptable. Le contrôleur PD ne parvient pas à éliminer l'erreur de régime permanent, ce qui entraîne une stabilisation incorrecte loin de la consigne. Ainsi, ce contrôleur n'est pas adapté pour garantir une température stable et précise dans notre système.

#### 2.2.7 Utilisation du contrôleur P et I

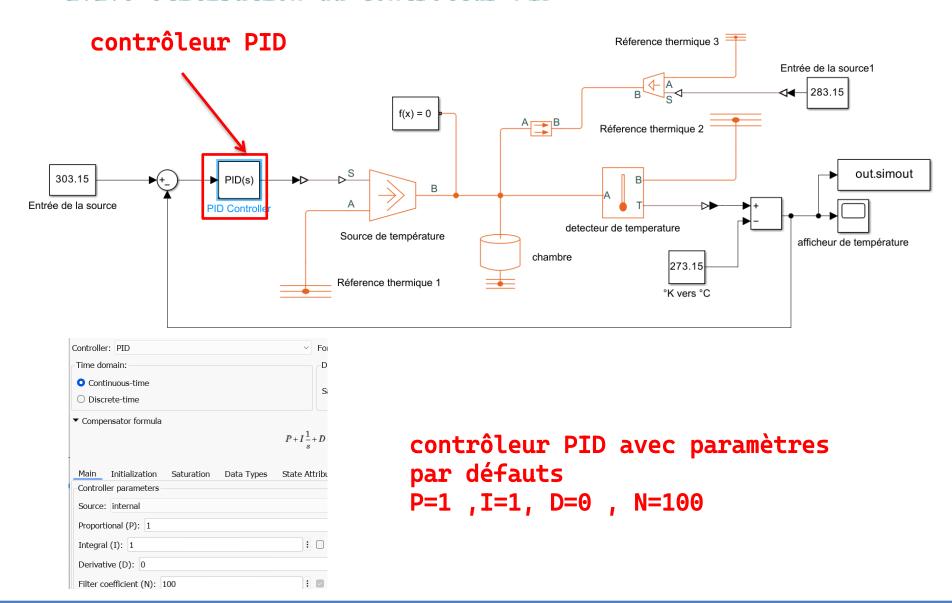


Contrôleur P

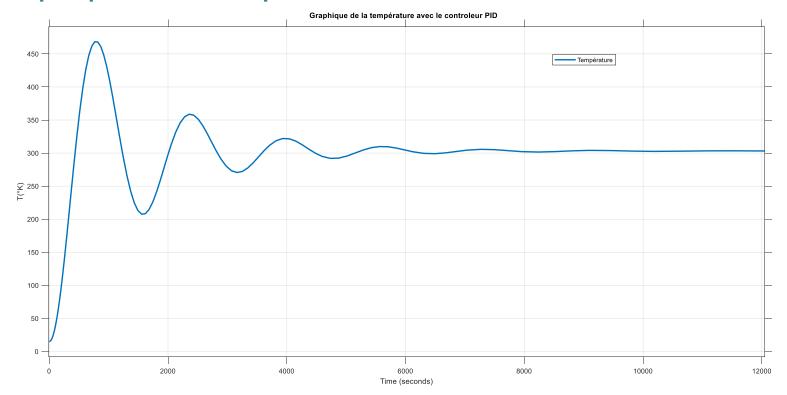
Contrôleur I

On constate que le contrôleur de type P est similaire au contrôleur PD, et le contrôleur I, représente des fluctuations importantes en diminuant l'efficacité et la stabilité du système.

#### 2.2.8 Utilisation du contrôleur PID

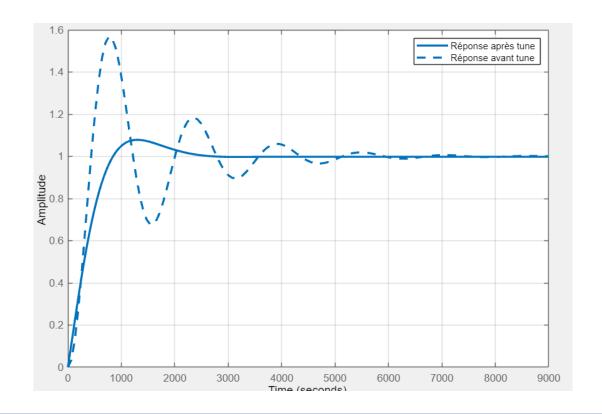


## Graphique de la température avec le contrôleur PID



Le graphique obtenu avec le contrôleur PID montre une réponse rapide et stable, avec une régulation de la température qui atteint la consigne sans oscillations importantes. La température se stabilise rapidement à la valeur souhaitée, ce qui montre que le PID est efficace pour maintenir la température avec précision.

En utilisant l'option tune pour le contrôleur PID, qui permet d'ajuster automatiquement les paramètres du contrôleur, nous obtenons une réponse très stable et rapide. Cette optimisation permet d'atteindre la consigne de température avec une grande précision, offrant ainsi une efficacité maximale de notre système.



Dans cette figure, le graphique en pointillé représente la réponse avant l'utilisation de l'option **tune**, tandis que l'autre graphique illustre la réponse après l'application de cette option.

On remarque une grande différence entre les deux courbes, due à la configuration optimale des paramètres du contrôleur PID, qui permet d'obtenir une réponse plus rapide et plus stable.

Paramètres choisis pour cette réponse à partir de l'option TUNE :

P=114.8

I=0.3264

D = -2929

N=0.00358

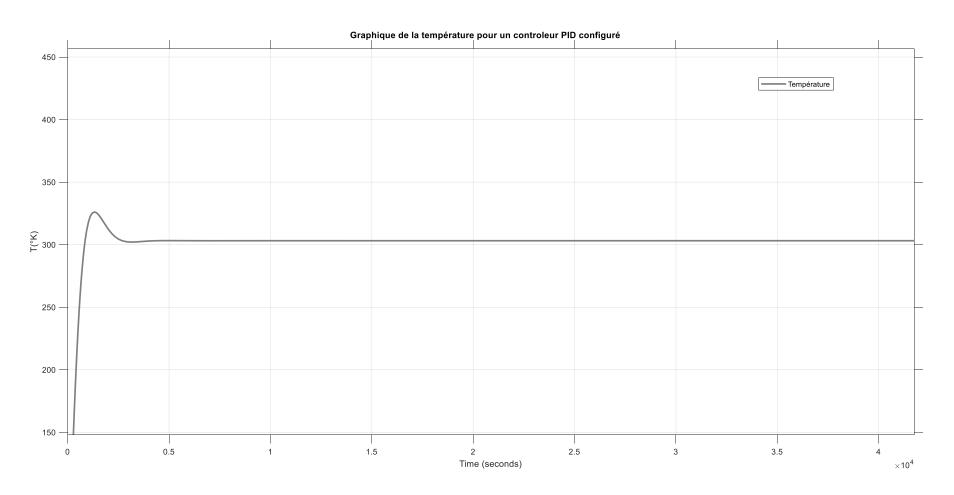
N étant le coefficient de filtrage

Les paramètres choisis pour le contrôleur PID (P = 114.8, I = 0.3264, D = -2929, N = 0.00358) montrent un contrôleur réactif avec un gain proportionnel élevé pour une réponse rapide, un terme intégral modéré pour éliminer l'erreur de régime permanent, et un terme dérivé négatif pour réduire les oscillations et améliorer la stabilité. La valeur de N permet une légère filtration du signal dérivé. Ces paramètres assurent une réponse rapide et stable, mais doivent être vérifiés pour éviter des oscillations excessives.

On configure notre PID, avec ces valeurs de P,I,D et N on obtient un système qui est plus stable, plus rapide et plus efficace.

Dans la section suivante on représente avec Simulink le graphique de ce système

## Graphique de la température avec le contrôleur PID configuré



réponse rapide et stable !!

# 3. Comparaison entre les trois contrôleurs et conclusion générale

#### 3.1 comparaison entre PI, PD et PID

La comparaison entre les trois types de contrôleurs (PI, PD et PID) est en termes de performance pour la régulation de la température dans notre système

## 1. Contrôleur PI (Proportionnel-Intégral) :

## Avantages :

Élimine l'erreur de régime permanent, ce qui garantit que la température finira par atteindre la consigne. Facile à configurer et adapté aux systèmes où l'erreur doit être réduite au minimum à long terme.

#### Inconvénients :

Réponse moins rapide, avec des oscillations ou un dépassement possible.

Ne réagit pas assez rapidement aux perturbations, ce qui peut entraîner une stabilisation lente.

Performance: Le contrôleur PI est efficace pour éliminer l'erreur à long terme, mais sa réponse est relativement lente, ce qui peut poser problème pour un système exigeant une régulation rapide et précise.

## 2. Contrôleur PD (Proportionnel-Dérivé) :

## Avantages :

Réagit plus rapidement aux variations de la température grâce au terme dérivé.

Réduit les oscillations et l'overshoot par rapport à un contrôleur PI.

#### • Inconvénients :

Ne permet pas d'éliminer l'erreur de régime permanent, donc la température ne sera jamais parfaitement stable à la consigne.

Peut être sensible au bruit, surtout dans des systèmes où les variations sont faibles.

• Performance : Le contrôleur PD améliore la réactivité et la vitesse de la réponse, mais ne permet pas d'obtenir une température exactement à la consigne à long terme, ce qui le rend moins adapté pour des systèmes nécessitant une régulation précise et stable à long terme.

## 3. Contrôleur PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) :

#### Avantages :

Combine les avantages des contrôleurs PI et PD. Il est à la fois rapide (grâce au terme dérivé) et élimine l'erreur de régime permanent (grâce au terme intégral).

Permet une régulation précise, rapide et stable de la température.

Réagit efficacement aux perturbations tout en maintenant la température à la consigne souhaitée.

#### • Inconvénients :

Plus complexe à configurer en raison de l'ajout du terme dérivé.

Nécessite un ajustement fin des paramètres pour éviter les oscillations excessives.

• Performance: Le contrôleur PID offre la meilleure performance dans ce cas. Il garantit une réponse rapide et une régulation précise de la température, sans oscillations importantes, tout en éliminant l'erreur de régime permanent. C'est donc le plus adapté pour maintenir une température stable et optimale dans des conditions de perturbation variable.

#### Conclusion:

Le contrôleur PID est clairement le plus adapté pour notre système, car il combine la réactivité rapide du terme dérivé, la correction de l'erreur de régime permanent du terme intégral et la stabilité du terme proportionnel. Cela permet d'obtenir une régulation précise et efficace de la température, contrairement aux contrôleurs PI et PD qui, bien qu'efficaces dans certaines situations, montrent des limites en termes de réponse et de stabilité pour notre application spécifique.

## Exemple d'un contrôleur PID:

N2000 - Universal Temperature and Process PID Controller with Ramp and Soak, 1/8 DIN 4-20 mA Auto-Tune PID Parameters Programmable Soft-Start

## 3.2 conclusion générale

En conclusion générale, le contrôleur PID s'avère être le meilleur choix pour notre système de régulation de température. D'après nos simulations et les schémas fournis par Simulink, le contrôleur PID offre une réponse rapide et stable, tout en éliminant l'erreur de régime permanent. Contrairement aux contrôleurs PI et PD, qui montrent des limitations comme des oscillations ou une mauvaise stabilisation de la température, le contrôleur PID, grâce à l'optimisation de ses paramètres (P, I, D), ajuste efficacement la puissance de la source thermique pour maintenir la température à la consigne souhaitée. En particulier, l'ajout du terme dérivé permet de réagir aux variations rapides de la température, réduisant ainsi les dépassements et assurant une régulation plus précise. De plus, l'option tune de Simulink a permis de trouver la configuration optimale, ce qui a encore amélioré la performance du système. Par conséquent, le PID est le plus adapté pour garantir une stabilité thermique rapide et précise dans notre cas.

# 3.3 conclusion générale (version anglaise)

In general conclusion, the PID controller proves to be the best choice for our temperature regulation system. According to our simulations and the diagrams provided by Simulink, the PID controller offers a fast and stable response while eliminating steady-state error. Unlike the PI and PD controllers, which show limitations such as oscillations or poor temperature stabilization, the PID controller, through the optimization of its parameters (P, I, D), effectively adjusts the thermal source power to maintain the temperature at the desired setpoint. In particular, the addition of the derivative term allows the system to react to rapid temperature changes, reducing overshoot and ensuring more precise regulation. Moreover, the Simulink tuning option helped find the optimal configuration, further enhancing system performance. Therefore, PID is the most suitable choice to ensure fast and precise thermal stability in our case.