

TP – Modélisation, simulation et commande d'une micro-enceinte climatique

Durée : 3 x 3,5 heures

La préparation individuelle des Travaux Pratiques est à faire avant la 1^{ère} séance de TP et sera présentée par chaque élève à l'enseignant en charge de l'encadrement du TP en début de séance.

Le compte rendu du travail en binôme devra être déposé sur la plateforme Chamilo au plus tard 48h après la fin des séances de travaux pratiques consacrées à cette étude.

Le compte rendu intégrera le travail préparatoire et le travail expérimental effectué en séances de TP.

Le compte rendu sera déposé sur la plateforme Chamilo sous la forme d'une seule archive zip comportant le texte du compte rendu écrit et l'ensemble des codes et simulateurs réalisés.

L'objectif des séances de travaux pratiques est de synthétiser par différentes techniques la commande d'un système expérimental afin de satisfaire un cahier des charges et de mettre en œuvre cette commande en situation pratique sur un système de commande numérique.

Pour cela, différents objectifs intermédiaires devront être atteints :

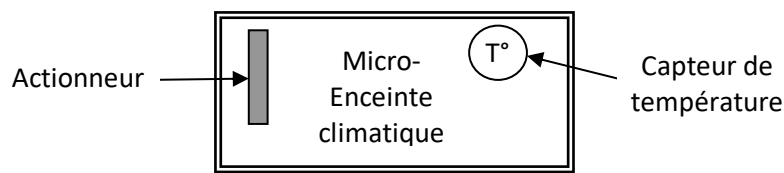
- identifier le modèle linéaire du système physique avec son domaine de validité ;
- construire un simulateur numérique comportant l'ensemble des éléments du système physique à piloter ;
- interpréter le cahier des charges que devra satisfaire le système asservi afin de garantir son fonctionnement pratique ;
- déduire du cahier des charges les spécifications pour la synthèse de la commande ;
- synthétiser, par les méthodes demandées, la commande du système afin de respecter les spécifications ;
- vérifier par l'analyse des diagrammes fréquentiels que les commandes élaborées respectent le cahier des charges d'un point de vue théorique ;
- vérifier par des simulations temporelles, à l'aide du simulateur numérique qui aura été construit au préalable, que les commandes élaborées respectent le cahier des charges notamment vis-à-vis des perturbations exogènes et des saturations des éléments ;
- tester expérimentalement, à l'aide d'un système de prototypage rapide (du type xPC target), avec le système réel que les commandes élaborées respectent le cahier des charges, notamment vis-à-vis des perturbations exogènes en utilisant des signaux de tests convenablement choisis ;
- écrire l'algorithme de commande et le valider à l'aide du simulateur numérique ;
- implanter l'algorithme de commande sur un calculateur numérique et valider le fonctionnement expérimental en utilisant des signaux de tests convenablement choisis.

Le cahier des charges pour la synthèse de la commande

L'objectif de la commande est d'asservir la température interne d'une micro-enceinte climatique à une valeur désirée donnée par une consigne externe, même en présence de perturbations exogènes constantes, avec les contraintes suivantes :

- a. lors d'un échelon de consigne de température, le dépassement de la consigne par la température interne de la micro-enceinte ne devra pas être supérieur à 5% de sa valeur finale ;
- b. pour une consigne de température constante, on désire une erreur statique nulle entre la température interne et la consigne même en présence de perturbations exogènes constantes ;
- c. l'amplitude du bruit présent sur la tension de commande de l'actionneur ne devra pas dépasser 10% de la valeur maximale autorisée de la tension de commande ;
- d. le calculateur peut être localisé à distance de l'enceinte climatique et être relié à celle-ci par l'intermédiaire d'un réseau informatique qui peut prendre entre 1 ms et 20 ms pour transmettre les informations (commande et/ou mesure) ; la commande doit assurer la stabilité du système asservi même pour le plus grand retard introduit ; par ailleurs, les marges de robustesse classiques du système asservi devront être assurées : Marge de module $M_M \geq 0.5$ et Marge de phase $M_\phi \geq 45^\circ$;
- e. la commande devra chercher à minimiser le temps de rejet des perturbations constantes de manière à maintenir la température interne de la micro-enceinte à sa valeur de consigne lorsque surviennent des perturbations.

Le système expérimental



Le système expérimental à piloter est constitué d'une micro-enceinte climatique dont on désire réguler la température interne. Pour cela, on dispose d'un capteur de température interne à l'enceinte et d'un actionneur qui délivre un flux de chaleur dont la température est pilotée par la commande.

Lors des séances de travaux pratiques, le système expérimental à piloter sera réalisé par l'intermédiaire d'un simulateur physique qui possède les mêmes caractéristiques que le système réel.

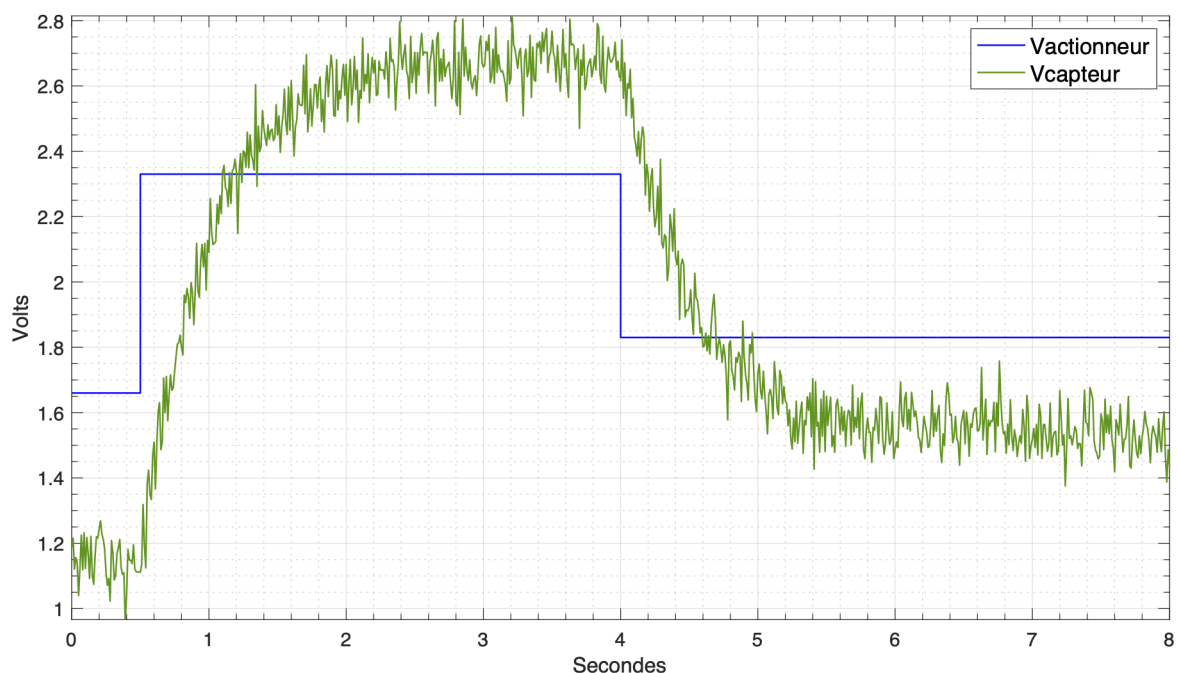
Caractéristiques des éléments du système :

- L'actionneur est commandé par une tension à temps continu variant de 0 à 5 Volts pour une température en sortie de l'actionneur variant de -50 à 100°C.
- Le capteur de température délivre une tension à temps continu variant de 0 à 5 Volts pour une température mesurée variant de -5 à +60°C.
- Le système de commande utilise un calculateur numérique dont la fréquence d'échantillonnage maximale est 100 Hz. Le lien avec le système physique est réalisé par :
 - un CNA 8 bits / 0 - 5 Volts pour la commande ;
 - un CAN 8 bits / 0 - 5 Volts pour la mesure.

Les CAN et CNA intègrent des échantillonneurs et des bloqueurs d'ordre zéro.

Relevé expérimental :

Un relevé expérimental, donné par la figure ci-dessous, a été réalisé à l'aide du système de commande en boucle ouverte. Pour cela, plusieurs tensions de commande de l'actionneur ont été successivement appliquées : { 1,66 V ; 2,33 V ; 1,83 V}. Entre chaque instant de variation de la tension de commande, la tension délivrée par le capteur de température a atteint sa valeur finale.



Dans un premier temps, on modélisera le système à partir du relevé expérimental effectué (tension actionneur et tension capteur) et des caractéristiques des éléments constitutifs du système, et on construira un simulateur numérique du système dans l'environnement Matlab/Simulink®.

Dans un second temps, on déterminera des commandes qui seront évaluées et validées à l'aide du simulateur numérique du système avant d'être appliquées au simulateur physique du système réel.

1. Préparation des Travaux Pratiques

1.1. Modélisation

– Donner un schéma faisant apparaître le calculateur de la commande avec les CAN et CNA d'entrées/sorties associés, l'actionneur, la micro-enceinte climatique et le capteur avec les différentes variables mises en jeu.

– Déterminer, à partir des mesures (relevé expérimental) :

– Une fonction de transfert à temps continu entre la tension de commande $V_a(t)$ appliquée à l'actionneur et la tension $V_c(t)$ délivrée par le capteur de température. On donnera le domaine de validité fréquentielle de cette fonction de transfert ainsi qu'un majorant d'un éventuel retard pur.

– L'amplitude du bruit de mesure.

– Donner les modèles statiques de l'actionneur et du capteur sous la forme (dans le domaine linéaire) :

$$T_{act}(t) = G_{act} \cdot V_a(t) + T_{act0}$$

$$V_c(t) = G_{capt} \cdot (T_{enc}(t) + T_{capt0})$$

– Déterminer la valeur de la température T_{ext} externe à l'enceinte supposée constante au moment des mesures (relevé expérimental).

– Déterminer la fonction de transfert à temps continu de la seule micro-enceinte climatique.

– Donner les modèles des CAN et CNA utilisés pour :

– La simulation numérique du système (gain, quantification, saturation).

– La synthèse de la commande (gain et bruit de quantification).

– Représenter le modèle complet du système sous la forme d'un schéma fonctionnel (appelé aussi schéma-bloc ou block diagram en anglais) faisant aussi apparaître les entrées de perturbations potentielles. C'est ce schéma qui sera construit dans l'environnement Matlab/Simulink® pour réaliser le simulateur numérique du système.

1.2. Spécifications pour la synthèse des commandes

On se place dans le cadre d'une commande à 2 degrés de liberté avec un préFiltre F de la consigne et un Correcteur de boucle C.

– Donner le modèle à temps continu du système utilisé pour la synthèse de la commande avec ses restrictions (domaine de validité fréquentielle, majorant d'un éventuel retard pur, amplitude du bruit de mesure somme du bruit issu du capteur et du CAN).

– Représenter, sous la forme d'un schéma fonctionnel, l'asservissement du système avec le modèle du système utilisé pour la commande, les différentes entrées exogènes à l'asservissement et la commande à 2 degrés de liberté.

– A partir du cahier des charges et du modèle utilisé pour la synthèse de la commande à deux degrés de liberté, donner les spécifications que doit respecter la commande du système. Pour chaque spécification :

– indiquer si c'est le choix du préFiltre F, du correcteur de boucle C ou des deux qui permettra de répondre à la spécification considérée ;

– indiquer le(s) diagramme(s) fréquentiel(s) à tracer ou le(s) test(s) temporel(s) à effectuer afin de vérifier la satisfaction de la spécification considérée.

1.3 Synthèses à temps continu et discrétisation

1.3.1 Synthèse par compensation du pôle dominant à temps continu

– Par la méthode de compensation du pôle dominant à temps continu, déterminer un correcteur de boucle C(p) à temps continu afin de rejeter les perturbations de commande et de sortie constantes.

– Avec le correcteur obtenu :

– Est-il nécessaire d'utiliser un préFiltre F(p) de la consigne pour satisfaire le cahier des charges ?

– Sans préFiltre F(p), quel est le temps de réponse à une consigne de température en échelon, à une perturbation de commande en échelon ? Conclusion.

– Quel est le retard additionnel admissible dans la boucle de commande ?

– Pour l'implantation sur calculateur à temps discret, proposer une période d'échantillonnage T_e pour la réalisation de l'algorithme de commande.

– Proposer un filtre anti-repliement de spectre de la mesure. Donner un modèle à temps discret de ce filtre. Quel est l'impact sur la commande ?

– En utilisant l'approximation d'Euler implicite : $p \cong \frac{1}{T_e} \frac{z-1}{z}$, donner la (les) fonction(s) de transfert à temps discret de la commande choisie. Comment vérifier que cette approximation est valide ?

– Donner l'expression de la (les) fonction(s) de transfert à temps discret qui sera (seront) implantée(s) avec le nombre minimum de chiffres significatifs pour les paramètres de la commande.

– Donner l'algorithme de commande qui sera implanté sur le calculateur en tenant compte de la saturation de la tension de sortie à ses valeurs permises min et max.

– Donner le pseudocode (proche du langage C) d'implantation, en virgule flottante, sur le système de commande expérimental de la commande avec les déclarations des variables et les initialisations. On prendra en compte le fait que l'entrée de mesure est un nombre entier entre 0 et 255 (CAN 8 bits non signés) et la sortie de commande un nombre entier entre 0 et 255 (CNA 8 bits non signés).

1.3.2 Synthèse par placement des pôles de la boucle fermée à temps continu

– Par la méthode de placement des pôles de la boucle fermée, déterminer une commande (préFiltre et Correcteur) à temps continu afin d'asservir la température interne de l'enceinte climatique et rejeter les perturbations de commande et de sortie constantes.

– Avec la commande obtenue :

– Quel est le temps de réponse à une consigne de température en échelon, à une perturbation de commande en échelon ? Conclusion.

– Quel est le retard additionnel admissible dans la boucle de commande ?

– Pour l'implantation sur calculateur à temps discret, proposer une période d'échantillonnage T_e pour la réalisation de l'algorithme de commande.

– Proposer un filtre anti-repliement de spectre de la mesure. Donner un modèle à temps discret de ce filtre. Quel est l'impact sur la commande ?

– En utilisant l'approximation d'Euler implicite : $p \cong \frac{1}{T_e} \frac{z-1}{z}$, donner la (les) fonction(s) de transfert à temps discret de la commande choisie. Comment vérifier que cette approximation est valide ?

– Donner l'expression de la (les) fonction(s) de transfert à temps discret qui sera (seront) implantée(s) avec le nombre minimum de chiffres significatifs pour les paramètres de la commande.

– Donner l'algorithme de commande (équations de récurrence) qui sera implanté sur le calculateur en tenant compte de la saturation de la tension de sortie à ses valeurs permises min et max.

– Donner le pseudocode (proche du langage C) d'implantation, en virgule flottante, sur le système de commande expérimental de la commande avec les déclarations des variables et les initialisations. On prendra en compte le fait que l'entrée de mesure est un nombre entier entre 0 et 255 (CAN 8 bits non signés) et la sortie de commande un nombre entier entre 0 et 255 (CNA 8 bits non signés).

1.4 Synthèses de commandes à temps discret

– Proposer une période d'échantillonnage pour réaliser la commande à l'aide du calculateur. Justifier le choix de cette période d'échantillonnage par rapport à la bande passante visée en boucle fermée de l'asservissement de température.

– Proposer un filtre anti-repliement de spectre de la mesure. Donner un modèle à temps discret de ce filtre.

– Donner le modèle linéaire à temps discret du système entre l'entrée $u(k)$ du CNA en sortie du calculateur et la sortie $y(k)$ du CAN en entrée du calculateur.

1.4.1 Synthèse par compensation du pôle dominant à temps discret

– Par la méthode de compensation du pôle dominant, déterminer un correcteur de boucle $C_d(z)$ à temps discret afin de rejeter les perturbations de commande et de sortie constantes.

– Donner l'expression de la (les) fonction(s) de transfert à temps discret qui sera (seront) implantée(s) avec le nombre minimum de chiffres significatifs pour les paramètres de la commande.

– Donner l'algorithme de commande (équations de récurrence) qui sera implanté sur le calculateur en tenant compte de la saturation de la tension de sortie à ses valeurs permises min et max.

– Donner le pseudocode (proche du langage C) d'implantation, en virgule flottante, sur le système de commande expérimental de la commande avec les déclarations des variables et les initialisations. On prendra en compte le fait que l'entrée de mesure est un nombre entier entre 0 et 255 (CAN 8 bits non signés) et la sortie de commande un nombre entier entre 0 et 255 (CNA 8 bits non signés).

1.4.2 Synthèse par placement des pôles de la boucle fermée à temps discret

– Par la méthode de placement des pôles de la boucle fermée, déterminer une commande (préFiltre et Correcteur) à temps discret afin d'asservir la température interne de l'enceinte climatique et rejeter les perturbations de commande et de sortie constantes.

– Donner l'expression de la (les) fonction(s) de transfert à temps discret qui sera (seront) implantée(s) avec le nombre minimum de chiffres significatifs pour les paramètres de la commande.

– Donner l'algorithme de commande (équations de récurrence) qui sera implanté sur le calculateur en tenant compte de la saturation de la tension de sortie à ses valeurs permises min et max.

– Donner le pseudocode (proche du langage C) d'implantation, en virgule flottante, sur le système de commande expérimental de la commande avec les déclarations des variables et les initialisations. On prendra en compte le fait que l'entrée de mesure est un nombre entier entre 0 et 255 (CAN 8 bits non signés) et la sortie de commande un nombre entier entre 0 et 255 (CNA 8 bits non signés).

2. Travail en séances de Travaux Pratiques

Le travail sur ordinateur utilisera le logiciel Matlab-Simulink.

Les éléments suivants de traitement dans l'environnement Matlab-Simulink sont mis à disposition :

- Logiciel « PIDdiscSynth_v8 » : outil d'aide à la synthèse d'une commande à 2 degrés de liberté basée sur un correcteur de type PID Filtré à temps discret ;

- Bloc « Corr_float » de calcul Matlab sous Simulink : bloc de calcul d'un algorithme de commande à temps discret avec des variables et des paramètres déclarés « float ». Cette implantation sera reprise quasiment à l'identique pour l'implantation sur le calculateur expérimental.

Pour l'implantation sur le calculateur expérimental de type Arduino, un code de base est fourni.

Validation théorique et sur simulateur numérique d'une commande

La validation théorique d'une commande est réalisée en deux étapes à l'aide d'un script Matlab :

1. Calcul du Correcteur de boucle et du préFiltre de la consigne en fonction de paramètres de synthèse.
2. Tracé des diagrammes fréquentiels (Bode, Black-Nichols, Nyquist) et des réponses temporelles afin de vérifier que les spécifications sont réalisées. Si à cette étape les spécifications ne sont pas réalisées, il faut retourner à l'étape 1 pour ajuster les paramètres de synthèse.

Après validation théorique de la commande élaborée sur la base d'un modèle linéaire invariant, le simulateur numérique du système permet de prendre en compte les modèles complets des éléments (possiblement non-linéaires en raison par exemple des saturations). Si le simulateur numérique est suffisamment proche du système réel, une commande validée sur le simulateur devrait correctement fonctionner avec le système physique réel.

L'implantation de la commande dans le simulateur numérique permet l'**évaluation** des réponses temporelles avec la prise en compte des modèles complets des éléments dans les cas suivants :

- petites et grandes amplitudes de variation de l'entrée de consigne ;
- petites et grandes amplitudes de variation de l'entrée de perturbation de commande ;
- ajout d'un retard de traitement ou de mesure.

Précisions :

- La notion de test à **petite amplitude** est utilisée pour décrire un fonctionnement linéaire du système où la commande $u(t)$ ne sature à aucun moment.

- La notion de test à **grande amplitude** correspond à un cas de test où à un moment du fonctionnement un ou plusieurs éléments du système saturent, en particulier la commande $u(t)$.

- **Évaluer** le comportement du système correspond à :

- mesurer le temps de réponses de la sortie vis-à-vis de la consigne et l'éventuel dépassement ;
- mesurer le temps de rejet de la perturbation de commande ;
- mesurer l'amplitude du bruit sur la commande ;
- évaluer la robustesse de la commande par des variations de la fonction de transfert du système ;
- évaluer la robustesse de la commande à des retards additifs dans la boucle d'asservissement.

2.1 Construction du simulateur numérique

- A partir des modèles déterminés en préparation, construire le simulateur numérique du système avec chacun de ses éléments dans l'environnement Simulink. On fera apparaître les saturations afférentes aux différents composants, un élément de retard pur afin d'évaluer le comportement du système asservi en présence de retard de mesure ou de commande lié au réseau de communication. Pour tenir compte de la température initiale interne à l'enceinte $T_{enc}(t = 0)$, le modèle de l'enceinte sera implémenté sous la forme d'une représentation d'état.

- Vérifier que le simulateur permet de retrouver les mesures expérimentales.

- Planter en simulation et expérimentalement avec le système de commande Arduino une commande simple de type proportionnelle. Comparer les résultats obtenus.

2.2 Validation théorique, sur simulateur et expérimentalement des commandes élaborées

Pour chaque commande élaborée à temps continu (puis discrétisée) et à temps discret :

- valider théoriquement la commande à l'aide d'un script Matlab ;
- valider le comportement temporel de la commande avec le minimum de chiffres significatifs à l'aide du simulateur numérique Simulink sous deux formes :
 - utilisation de schémas blocs de la librairie Simulink ;
 - utilisation du bloc « Corr_float » qui permet d'écrire l'algorithme qui sera repris pour l'implantation sur le calculateur numérique expérimental ;
- planter et valider le comportement temporel de la commande sur le système expérimental avec le calculateur numérique expérimental.

2.3 Conception, validation et implantation d'une commande à l'aide du logiciel PIDdiscSynth_v8

A l'aide du logiciel PIDdiscSynth_v8 concevoir une commande du système, la valider en simulation et l'implanter sur le calculateur numérique expérimental pour la valider expérimentalement.

Déroulé indicatif des 3 séances de Travaux Pratiques

- Séance 1 : construction et validation du simulateur numérique ; validation théorique et en simulation d'une commande.
- Séance 2 : implantation expérimentale de la commande validée à la 1^{ère} séance, poursuite du travail sur les commandes.
- Séance 3 : implantation et validation expérimentale de l'ensemble des commandes.