

Régulation thermique des serres : de la rétroaction PID à la commande prédictive

La régulation des serres m'intéresse particulièrement car l'agriculture occupe une place importante dans mon environnement familial. Chercher à optimiser le contrôle thermique me semble être un levier pertinent pour améliorer la viabilité économique des exploitations sous serre, tout en réduisant leur consommation énergétique et donc leur impact environnemental.

La serre est un système soumis à des cycles climatiques, notamment l'alternance jour-nuit. Sa régulation thermique repose sur des boucles de rétroaction. L'étude compare une boucle correctrice PID classique à une boucle anticipative afin d'analyser l'influence de l'anticipation sur le comportement dynamique du système.

Positionnement thématique (phase 2)

PHYSIQUE (Physique de la Matière — thermodynamique), SI (Automatique), INFORMATIQUE (Informatique pratique).

Mots-clés (phase 2)

Mots-Clés (en français)	Mots-Clés (en anglais)
Contrôle prédictif	Predictive control
Serre	Greenhouse
Boucles de rétroaction	Feedback loops
Régulation PID	PID control
Efficacité énergétique	Energy efficiency

Bibliographie commentée

Une serre est un système thermique à forte inertie. Son état intérieur dépend de sollicitations extérieures changeantes (température, rayonnement, vent, humidité). À ces variations s'ajoutent des cycles réguliers, notamment l'alternance jour-nuit, auxquels peuvent se superposer des effets saisonniers. Ceci fait de la serre un terrain d'étude privilégié pour analyser des boucles de rétroaction, leur stabilité, leur performance et leurs limites face à des perturbations cycliques et partiellement prévisibles (jour-nuit, tendances météo, etc).

Avant de comparer les stratégies de commande, il est nécessaire de modéliser précisément l'environnement thermique de la serre. Le modèle de Vanthoor [1] constitue un point de départ simple mais cohérent, fondé sur des équations différentielles de premier ordre. Berenguel [2] en propose un prolongement plus sophistiqué, introduisant une modélisation non linéaire des échanges thermiques et leur linéarisation locale.

Le contrôle des serres utilise des boucles de rétroaction afin de maintenir la température dans une plage compatible avec les besoins de la culture, tout en réduisant l'énergie

consommée. La littérature classique part souvent de correcteurs de type PI/PID, car ils sont simples à régler et efficaces tant que les perturbations restent modérées. Berenguel et al. montrent toutefois que, même avec une modélisation soignée du lien entre ouverture des ouvrants (ventilation naturelle) et température intérieure, la régulation implique des compromis pratiques entre suivi de consigne, rejet de perturbations, effort de commande et robustesse face aux incertitudes des paramètres [2].

En effet, dès que l'on cherche à formaliser explicitement des contraintes et des limites physiques, comme des actionneurs bornés, des phénomènes de saturation ou l'impossibilité de corriger instantanément en raison de l'inertie, l'approche du PID centrée sur la correction a posteriori montre rapidement ses limites. La consigne peut être suivie en moyenne, mais cela se fait souvent au prix de dépassements transitoires et de commandes parfois excessives. L'approche de Hamidane et al. vient remédier à cela. Ils proposent un MPC discret qui détermine les commandes en résolvant un problème d'optimisation, tout en imposant explicitement les limites des actionneurs [3]. Cette formulation permet un suivi de consigne satisfaisant et produit des signaux de commande nuls lorsque l'action n'est pas requise. Il devient alors naturel d'évaluer la performance non seulement par l'erreur thermique, mais aussi par l'énergie totale consommée.

L'autre idée structurante est l'anticipation : dans un système cyclique, une partie du futur est au moins partiellement prévisible à partir de l'observation des régularités passées et présentes. Pawlowski et al. proposent justement de coupler une commande prédictive à une estimation ("forecast") des perturbations sur l'horizon de prédiction, afin de compenser leurs effets futurs. Ils fournissent un cadre clair pour intégrer de l'information anticipée : il ne s'agit pas de "prédire la météo" au sens large, mais d'alimenter la commande prédictive avec un scénario de perturbations futures (rayonnement, température extérieure, humidité) sur l'horizon de calcul [4].

Cette anticipation n'a de sens que si l'information future est suffisamment fiable. Kuijpers et al. s'attaquent à ce point en proposant un modèle de l'erreur de prévision et en mesurant la baisse de performance qui en découle. Cela justifie l'étude comparative de scénarios de prévision parfaite, puis dégradée (bruit, décalage temporel), afin d'évaluer la sensibilité de la commande anticipative à la qualité de l'information [5].

De plus, dès que l'on ajoute l'humidité, le problème devient intrinsèquement multivariable. Nakayama et al. montrent qu'il est possible de piloter en même temps la température et l'humidité. Ils soulignent également que le choix du pas d'échantillonnage a un impact direct sur la consommation d'énergie. Une comparaison quantitative à différents pas permet d'estimer le "meilleur" gain que peut apporter l'approche prédictive [6].

Enfin, van Beveren et al. formalisent l'idée de minimiser l'énergie sous bornes définies par le cultivateur (température, humidité, etc.). L'optimisation énergétique sous contraintes "agronomiques" devient un objectif naturel [7]. Dans cette même logique d'optimisation appliquée aux serres, Henten et al. présentent une approche d'optimisation du contrôle climatique de la serre visant à améliorer la rentabilité [8].

Problématique retenue

Dans une serre, dans quelle mesure une commande prédictive améliore-t-elle le respect des consignes thermiques et l'efficacité énergétique par rapport à une régulation PID ?

Objectifs du TIPE

Je me propose dans ce TIPE de :

1. Modéliser la dynamique thermique d'une serre et l'implémenter sur Python.
2. Mettre en œuvre une régulation PID et une commande prédictive exploitant des informations anticipées sur les perturbations climatiques.
3. Etablir une étude comparative entre le contrôle par PID et celui par commande prédictive.
4. Etudier l'influence de la qualité de l'anticipation.
5. Conclure sur la pertinence de l'utilisation du MPC.

Références bibliographiques (phase 2)

- [1] B.H.E. Vanthoor, C. Stanghellini, E.J. van Henten, P.H.B. de Visser : “A methodology for model-based greenhouse design: Part 1, a greenhouse climate model for a broad range of designs and climates” : Ph.D. Thesis, Wageningen UR, 2011
- [2] Manuel Berenguel, Clara Iborra, Francisco Rodríguez, Francisco García-Mañas, José Luis Guzmán, Jorge A. Sánchez-Molina : “Nonlinear PID-based temperature control techniques in greenhouses using natural ventilation” : IFAC-PapersOnLine, 58(7), 454–459, 2024
- [3] Hafsa Hamidane, Samira El Faiz, Mohammed Guerbaoui, Abdelali Ed-Dahhak, Abdeslam Lachhab, Benachir Bouchikhi : “Constrained discrete model predictive control of a greenhouse system temperature” : International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 11(2), 1223–1234, 2020
- [4] Andrzej Pawlowski, Jose L. Guzmán, Francisco Rodríguez, Manuel Berenguel, Julio E. Normey-Rico : “Predictive Control with Disturbance Forecasting for Greenhouse Diurnal Temperature Control,” : Proceedings of the 18th IFAC World Congress, Milano (Italy), 28 Aug–2 Sep 2011
- [5] Wouter J.P. Kuijpers, Duarte J. Antunes, Simon van Mourik, Eldert J. van Henten, Marinus J.G. van de Molengraft : “Weather forecast error modelling and performance analysis of automatic greenhouse climate control” : Biosystems Engineering, 214, 207–229, 2022
- [6] Shin Nakayama, Taku Takada, Ryushi Kimura, Masato Ohsumi : “Model Predictive Control of Humidity Deficit and Temperature in Winter Greenhouses: Subspace Weather-Based Modelling and Sampling Period Effects” : Machines, vol. 12, no. 1, art. 56, 2024. doi: 10.3390/machines12010056
- [7] P.J.M. van Beveren, J. Bontsema, G. van Straten, E.J. van Henten : “Optimal control of greenhouse climate using minimal energy and grower defined bounds” : Applied Energy, 159, 509–519, 2015
- [8] E.J. van Henten, J. Bontsema, G. van Straten : “Improving the efficiency of greenhouse climate control: an optimal control approach” : Netherlands Journal of Agricultural Science,

45(1), 1997

[9] Jorge Antonio Sánchez-Molina, Li Ming, Francisco Rodríguez, José Luis Guzmán, Wang Hui, Yang Xinting : “Development and test verification of air temperature model for Chinese solar and Spanish Almeria-type greenhouses” : International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 10(4), 66–76, 2017. doi: 10.25165/j.ijabe.20171004.2398

[10] Audberto Reyes-Rosas, Francisco D. Molina-Aiz, Diego L. Valera, Alejandro López, Sasirot Khamkure : “Development of a single energy balance model for prediction of temperatures inside a naturally ventilated greenhouse with polypropylene soil mulch” : Computers and Electronics in Agriculture, 142, 9–28, 2017. doi: 10.1016/j.compag.2017.08.020