

# Commande prédictive distribuée d'un système hybride : l'exemple d'un dispositif de réfrigération

Romain BOURDAIS<sup>1</sup>, Hervé GUÉGUEN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>SUPELEC / IETR,  
Avenue de la Boulaie - 35510 Cesson-Sévigné

romain.bourdais@supelec.fr, herve.gueguen@supelec.fr

*Résumé*— Dans cet article, nous nous intéressons à la commande d'un système de réfrigération par une approche prédictive et distribuée. Le système étudié, défini dans le cadre du projet HYCON, est un exemple de système dynamique non linéaire de grande dimension et contrôlé par des variables booléennes. Appliquer une commande prédictive centralisée à de tels systèmes fait apparaître rapidement une explosion combinatoire critique. Le but de notre approche est de se rapprocher de la solution optimale tout en évitant les problèmes de complexité d'implémentation par une distribution de la commande basée sur la structure du système à commander. La communication entre les contrôleurs reprend la structure d'interaction physique et selon la grandeurs deux types d'interactions sont alors considérées : certaines prédictions de variables seront directement échangées, alors que les autres seront utilisées dans un mécanisme d'agent de prix.

*Mots-clés*— Systèmes dynamiques hybrides, Systèmes de grande dimension, Commande prédictive, Commande distribuée

## I. INTRODUCTION

La commande prédictive des systèmes hybrides [1] est une approche qui a permis d'obtenir des résultats intéressants. Cependant pour un certain nombre de systèmes, elle est rapidement confrontée à un problème d'explosion combinatoire du nombre de configurations discrètes à prendre en compte, ce qui constitue une limitation importante alors même que la commande des systèmes de grandes tailles est au cœur de préoccupations actuelles, comme l'efficacité énergétique par exemple.

Dans ce contexte, un benchmark sur la commande d'un système de réfrigération d'un supermarché [2] a été proposé dans le cadre du projet HYCON. Ce système est constitué d'un ensemble de vitrines réfrigérantes et d'un banc de compresseurs. Chacun des composants peut être modélisé par des équations non linéaires, dont les commandes sont des variables discrètes. Pour aborder le problème de la commande de ce système, différentes approches ont été testées : une première idée a consisté à linéariser les équations pour construire un modèle MLD (Mixed Logical dynamical System) et proposer un contrôleur prédictif [1]. Dans un autre travail [3], la commande prédictive a également été utilisée, avec une optimisation basée sur le modèle non linéaire. Enfin, dans le papier [4], les auteurs ont aussi proposé une approche prédictive non linéaire, en étudiant les variables de contrôle comme si elles étaient continues, puis en les discrétisant. Ces approches ont donné de bons résultats, mais ont été construites de manière centralisée

et confrontées à l'explosion combinatoire liée au nombre de variables discrètes à manipuler. Les résultats n'ont donc pu être testés que sur 2 vitrines au plus.

Pour pallier ce problème d'explosion combinatoire, nous proposons dans ce papier d'étudier une structure de commande prédictive distribuée. L'idée repose sur une décomposition du système global en plusieurs sous-systèmes et un pilotage de chacun des sous-systèmes par un contrôleur, qui optimise un critère, à partir de ses mesures locales et d'un certain nombre de données communiquées par les autres contrôleurs. Différentes structures de contrôle distribuées ont été proposées [5], [6], [7] pour des systèmes couplés en entrée, et pour lesquels les contrôleurs échangent les commandes prévues. Dans ces structures chaque contrôleur a en général la connaissance du critère global. Cependant, quand deux sous-systèmes sont en série, l'entrée de l'un est la sortie de l'autre, il est possible d'introduire un multiplicateur de Lagrange [5] ou un prix [8] pour rechercher la commande optimale alors que chaque contrôleur n'a qu'une vue locale du critère.

C'est cette idée que nous utilisons dans notre proposition de contrôle, dont nous présentons l'architecture dans la partie III. La partie IV présente les différents résultats obtenus, en les comparant notamment avec la structure classique. Nous concluons et présentons nos pistes de travail dans la partie V. Mais pour bien comprendre les spécificités du système nous en proposons, dans la partie suivante, un rapide descriptif.

## II. DESCRIPTION DU SYSTÈME - LES POINTS DÉLICATS

Une vue globale du système de réfrigération est donnée par la figure 1. Un descriptif précis et complet de ce système est donné dans [4] et [9]. Un banc de compresseurs comprime du produit réfrigérant basse pression provenant d'un récupérateur. Le produit, sous haute pression est alors condensé, et le liquide résultant est réparti entre les différentes vitrines, si les valves d'admission sont ouvertes. Le liquide s'évapore alors dans les vitrines, refroidissant l'air circulant au sein de la vitrine, puis est récupéré par le dispositif de récupération.

L'étude de ce système montre que l'unité de condensation ainsi que le circuit du liquide n'ont que peu d'influence sur son comportement global. Il est donc possible d'établir le schéma causal de la figure 2. Ce schéma met en évidence deux sous-systèmes d'une part les vitrines

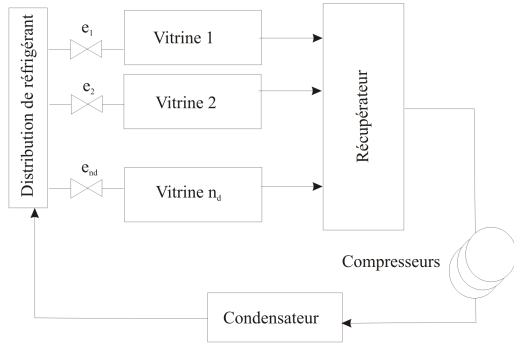


Fig. 1. Vue simplifiée du système de réfrigération

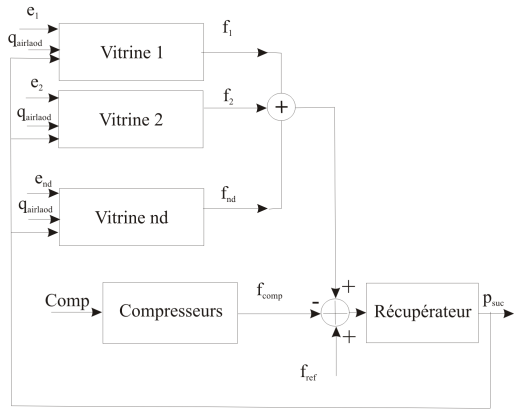


Fig. 2. Sous-systèmes et interactions

d'autre part le récupérateur et le compresseur. Ces deux systèmes interagissent par l'intermédiaire de la pression dans le récupérateur et du débit de réfrigérant circulant des vitrines vers ce récupérateur.

#### A. Les vitrines

Les premiers composants du système sont les vitrines. Comme on peut le voir sur la figure 2 chaque vitrine est considérée comme un système qui possède une entrée de commande discrète  $e_i$ , correspondant à l'ouverture de la vanne, une entrée d'interaction  $p_{suc}$ , la pression du récupérateur, et une entrée de perturbation  $q_{airload}$ . La dynamique peut être modélisée à l'aide d'un vecteur d'état de dimension 4 correspondant en particulier à différentes températures dans la vitrine. La forme des équations d'état est alors la suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = A_1 X \\ \dot{x}_2 = g_2(X, p_{suc}) \\ \dot{x}_3 = A_3 X + q_{airload} \\ \dot{x}_4 = \begin{cases} \frac{x_{4M} - x_4}{\alpha}, & \text{si } e_i = 1, \\ g_4(X, p_{suc}), & \text{si } e_i = 0 \text{ et } x_4 > 0, \\ 0, & \text{si } e_i = 0 \text{ et } x_4 \leq 0, \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

dans lequel  $A_1$  et  $A_3$  sont des matrices de  $\mathbb{R}^{1 \times 4}$ ,  $g_2$  et  $g_4$  des fonctions non linéaires continues et  $\alpha$  et  $x_{4M}$  des constantes positives. Il s'agit donc d'un système non

linéaire à commutation, dont les commutations dépendent de l'état et de la commande discrète.

La sortie du système, correspondant au débit de réfrigérant, notée  $f_i$ , est aussi une fonction non linéaire  $h$  de l'état et de la pression  $p_{suc}$ , décrite par :

$$f_i = h(X, p_{suc}). \quad (2)$$

#### B. La partie compression et récupération

Le deuxième sous-système qui compose le dispositif de réfrigération est la partie compression et récupération. Ce système possède une entrée de commande entière  $Comp$ , le nombre de compresseurs mis en route entre 0 et  $n_c$  le nombre de compresseurs, une entrée d'interaction  $f_{in}$ , la somme des débits de réfrigérants venant des vitrines, et une entrée de perturbation  $f_{ref}$  générée par des éléments consommateurs non modélisés. Le débit de fluide aspiré par les compresseurs  $f_{comp}$  est supposé directement proportionnel au nombre de compresseurs en marche :

$$f_{comp} = \gamma \cdot Comp, \quad (3)$$

avec  $\gamma$  une constante positive.

L'état du système est alors constitué de la pression dans le récupérateur et son évolution est donnée par :

$$\frac{dp_{suc}}{dt} = \frac{f_{in} + f_{ref} - f_{comp} h_p(p_{suc})}{\beta h'_p(p_{suc})}, \quad (4)$$

où  $h_p$  et  $h'_p$  sont des fonctions non linéaires de  $p_{suc}$  liées à la densité du réfrigérant utilisé et  $\beta$  est une constante.

Le système résultant est donc un système dynamique hybride, plus précisément, un système continu non linéaire commandé par une variable discrète.

#### C. Spécifications et objectifs

Les variables qui doivent être contrôlées sont la température de chacune des vitrines, notée  $t_{air} = x_2$ , et la pression dans le récupérateur  $p_{suc}$ . Plus précisément, chacune des températures doit être maintenue entre 2 et 5 °C, et la pression doit rester inférieure à  $p_r$ , pression de référence qui peut varier au cours du temps en fonction du mode de fonctionnement.

Les objectifs sont alors de respecter ces spécifications tout en minimisant le nombre d'allumage et d'arrêt de compresseurs, le nombre de commutations des vannes des vitrines, et la consommation énergétique. Ce dernier critère se traduit par la minimisation du nombre de compresseurs en marche qui définit la consommation.

### III. ARCHITECTURE DE COMMANDE

Il a été choisi d'appliquer une commande prédictive pour commander le système de réfrigération. Les objectifs précédents se traduisent donc à chaque instant d'échantillonnage par la détermination de la séquence de commandes (ouverture des vannes des vitrines, nombre de compresseurs en marche) qui minimise le critère :

$$J = \sum_{i=1}^{n_d} J_{V_i} + J_C. \quad (5)$$

Pour chaque vitrine le critère  $J_{Vi}$  est de la forme :

$$J_{Vi} = \sum_{i=1}^h G(t_a[k+i]) + \alpha_V \sum_{i=0}^{h-1} (e(k+i) - e(k+i-1))^2, \quad (6)$$

où le premier terme pénalise le non respect des contraintes sur la température et le deuxième les commutations de la vanne.  $h$  est l'horizon de prédiction et  $k$  l'instant d'échantillonnage considéré.

Pour l'ensemble récupérateur-compresseurs le critère s'exprime sous la forme :

$$J_C = \sum_{i=1}^h G(p_{suc}(k+i)) + \alpha_{CN} \sum_{i=0}^{h-1} n_{com}(k+i) + \alpha_{CS} \sum_{i=0}^{h-1} (n_{com}(k+i) - n_{com}(k+i-1))^2 \quad (7)$$

où le premier terme correspond à la spécification sur la pression, le deuxième au nombre de compresseurs en marche et le troisième aux commutations.

Les variables d'optimisation de ces critères sont les séquences de commandes logiques et entières dont le nombre croît rapidement en fonction du nombre de vitrines et du nombre de compresseurs qui constituent le système et de la longueur de l'horizon de prédiction. On trouvera dans la section suivante des ordres de grandeur de ce nombre de séquences pour des configurations particulières. Il est donc intéressant d'envisager une commande distribuée de ce système afin de simplifier les calculs.

L'objet principal de notre étude est la distribution du contrôle plus que le contrôle de chaque composant, nous supposons donc dans la suite que toutes les variables d'état ainsi que les perturbations sont observables. De même nous ne prenons pas en compte les éventuels aléas et retards liés aux réseaux de communication en considérant qu'étant données les constantes de temps du système ceux-ci ne constituent pas un frein à la distribution. Enfin nous considérerons que les instants d'échantillonnage des différents contrôleurs sont synchrones et que les horizons de prédiction sont les mêmes pour tous les contrôleurs.

Étant données la nature additive du critère 5 et la forte structure du système considéré (figure 2), il est naturel de considérer une structure de commande où un contrôleur est dédié à chaque vitrine et un dernier à la commande des compresseurs.

Le système de réfrigération apparaît comme une structure où l'ensemble récupérateur-compresseurs fournit une capacité de débit de liquide à plusieurs consommateurs que sont les vitrines. Ces interactions se matérialisent par la pression  $P_{suc}$  qui est commune à tous les consommateurs et le débit qui est la somme des consommations. Afin de favoriser la convergence de l'optimisation distribuée vers l'optimum global ([8]), il est intéressant de mettre en oeuvre un mécanisme qui prenne en compte explicitement ces interactions. Le débit étant la grandeur sommée dans les interactions entre les consommateurs et le producteur c'est sur elle que porte l'agent de prix qui réalise cette prise en compte.

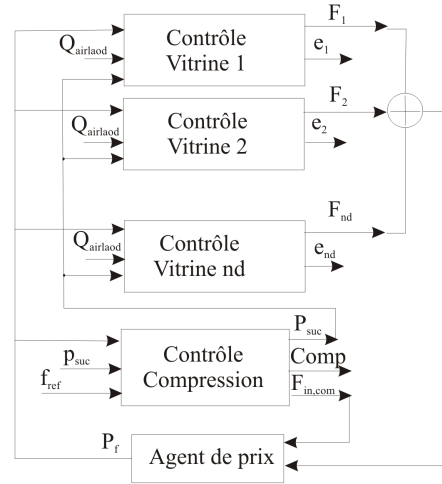


Fig. 3. Architecture distribuée de la commande

La structure générale de la commande distribuée est alors présentée dans la figure 3.

Les interactions entre les systèmes sont prises en compte dans le contrôle par deux mécanismes différents :

- les prévisions de pression sur l'horizon de prédiction calculées par le contrôleur du compresseur sont directement diffusées aux contrôleurs de vitrine, par le vecteur  $P_{suc}$ ,
- un mécanisme d'agent de prix est introduit pour le flux de réfrigérant ; à partir des prévisions de flux de chacun des contrôleurs de vitrine (vecteurs  $F_i$ ) et du souhait de production du compresseur (vecteur  $F_{in,com}$ ) il établit un prix (vecteur  $P$ ) qui en retour agit sur le comportement de chacun de contrôleurs.

Le principe de l'agent de prix est que la résolution de l'optimisation du critère (5) peut se faire en introduisant une variable  $F_{in,com}$  et une variable  $P$  et en résolvant le problème constitué de la minimisation pour chaque vitrine du critère (8) ainsi que du critère (9) et de la maximisation pour chaque composante du critère (10) dont on sait que si les critères sont quadratiques et les systèmes linéaires une résolution par gradient converge vers la solution minimisant (5).

$$\tilde{J}_{Vi} = J_{Vi} + P \cdot F_i \quad (8)$$

$$\tilde{J}_C = J_C - P \cdot F_{in,com} \quad (9)$$

$$p(j) \cdot \left( \sum_i f_i(j) - f_{in,com}(j) \right) \quad (10)$$

À chaque instant d'échantillonnage, il y a donc plusieurs phases d'échange entre les différents contrôleurs, qui doivent aboutir à un consensus sur les valeurs des différentes valeurs optimales des grandeurs d'interactions.

#### A. Commande locale des vitrines

Le contrôleur d'une vitrine doit déterminer, à chaque instant de commande  $k$ , la séquence  $\sigma = (e(k), e(k+1), \dots, e(k+h-1))$  de variables logiques optimales.

Il est donc basé à chaque itération pour la recherche du consensus sur un algorithme qui minimise le critère (8) par

rapport à cette séquence en fonction des prévisions de pression  $P_{suc}$  et du prix  $P$ . La résolution de ce problème d'optimisation revient donc à construire la succession d'états prédits pour chaque séquence de commande booléenne possible ce qui conduit à une complexité de l'optimisation en  $2^h$ . L'optimisation permet également de déterminer la prédiction de débit sur l'horizon  $F_i$ .

### B. Commande locale des compresseurs

Le contrôleur du compresseur doit déterminer à chaque instant  $k$  la séquence optimale de variables entières  $\sigma = (n_{com}(k), n_{com}(k+1), \dots, n_{com}(k+h-1))$ . Pour permettre l'optimisation distribuée, il est construit sur un algorithme qui, résout à chaque itération de la recherche de consensus, la minimisation, pour une prévision de prix donnée, du critère (9) en fonction de la séquence de commande et du débit  $F_{in,com} = (f_{in,com}(k), f_{in,com}(k+1), \dots, f_{in,com}(k+h-1))$  que le compresseur admet des vitrines.

Il s'agit ici d'un problème d'optimisation mixte qui consiste en  $(n_c + 1)^h$  séquences possibles chacune conduisant à l'optimisation continue d'un problème de dimension  $h$ . Dans la suite le nombre de séquences sera réduit à  $3^h$  en imposant au plus une commutation de compresseur d'un instant d'échantillonnage à l'autre.

### C. Agent de prix

Le dernier composant de la structure de commande est l'agent de prix qui à chaque itération détermine le prix  $P = (p(k), p(k+1) \dots p(k+h-1))$  en fonction des prévisions des contrôleurs de vitrines  $F_i$  et des souhaits du contrôleur de compresseur  $F_{in,com}$ . Cette évolution sera réalisée par composante selon

$$p(j) = p(j) + \alpha_i \left( \sum_i f_i(j) - f_{in,com}(j) \right), \quad (11)$$

où  $\alpha_i$  est un paramètre de réglage.

### D. Algorithme de commande

Maintenant que les algorithmes locaux ont été explicités, nous présentons ici formellement les différentes étapes de l'algorithme de commande.

#### Algorithme III.1: Algorithme général de commande

**Entrées :**  $X_k$  : Variables mesurées,  $P_{k-1}$  : Vecteur prix calculé à l'instant  $k-1$ ,

**Sorties :**  $E_k$  : Commande des vannes ( $e_i$ ) et des compresseurs ( $Comp$ ),  $\tilde{P}_k$  prévisions de prix

**Paramètres :**  $N_{itermax}$  : Nombre maximum d'itérations autorisées,  $tol$  : tolérance dans le critère d'arrêt.

◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇

- Initialisation :  $Pr = P_{k-1}$ ,  $N_{iter} = 1$ .
- Étape 1 : Calcul du contrôle des compresseurs :  $[nc, Psuc, F_{in,com}] = ctrlCompr(x, Pr)$ .
- Étape 2 : Communication de la prédiction de pression  $P_{suc}$  aux contrôleurs des vitrines.
- Étape 3 : Calcul du contrôle des vitrines :  $[e_i, F_i] = ctrlDisp(x, Pr, Psuc)$ .

- Étape 4 : Communication à l'agent de prix des prédictions de flux calculés du point de vue du compresseur et du point de vue des vitrines.
- Étape 5 : Calcul du prix du réfrigérant :  $Pr = Prix(Pr, F_{in,com}, \sum F_i)$ .
- Étape 6 : Comparaison de l'offre et de la demande :  $s = \|F_{in,com} - \sum F_i\|$  :
  - Si  $s > tol$  &  $N_{iter} < N_{itermax}$
  - Alors : Communication de vecteur de Prix  $Pr$  aux contrôleurs et  $N_{iter} = N_{iter} + 1$  puis retour à l'étape 1. (Nouvelle négociation).
  - Sinon Fin : aller à l'étape 7.
- Étape 7 : Envoi et exécution des commandes  $E_k = [nc, e_1, e_2, e_3]$  et des prévisions de prix  $\tilde{P}_k = Pr$ .

◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇

A chaque pas d'échantillonnage, la première étape est l'optimisation du critère du compresseur, à partir des mesures de pression et du flux de réfrigérant. La prédiction de pression est alors transmise aux contrôleurs des vitrines, qui résolvent leur propre optimisation, et calculent ainsi leur commande et leur prévision de consommation de froid. A la première itération, c'est le prix calculé à l'instant précédent qui est utilisé comme point de départ en prenant soin de décaler les composantes pour prendre en compte le décalage temporel induit par le changement d'instant d'échantillonnage. Ensuite, le prix est mis à jour par l'agent de prix. On applique alors à nouveau ces deux optimisations, en utilisant le nouveau prix. Le critère d'arrêt repose sur la concordance entre flux désiré par le compresseur et flux estimé par les vitrines. Cependant il n'existe pas de garantie de convergence de la négociation, on impose un nombre maximal d'itérations. A la fin, les commandes calculées sont envoyées au système.

## IV. SIMULATIONS ET RÉSULTATS

### A. Présentation des scénarii de test

Afin de valider l'approche proposée, nous l'avons testée grâce à l'outil de simulation<sup>1</sup> *Supermarket Refrigeration System* et Matlab/Simulink pour deux configurations. Dans la première, le banc de réfrigération est composé de 3 vitrines et de 3 compresseurs. Dans la seconde, il est composé de 10 vitrines et de 6 compresseurs. Pour ces deux configurations, le scénario utilisé pour le test est celui proposé dans le cadre du benchmark. Deux modes de fonctionnement sont étudiés : *Un mode de jour*, dans lequel les vitrines sont ouvertes et d'autres équipements consomment également de la masse réfrigérante. La pression de référence est de 1.7 bars. *Un mode de nuit*, dans lequel les vitrines sont fermées et aucun autre équipement ne consomme la masse réfrigérante. La pression de référence est alors de 1.9 bars. Le temps de simulation est de 14400 secondes, le système fonctionnant en mode de jour durant la première moitié du temps, puis passe en mode de nuit jusqu'à la fin. Afin de pouvoir comparer les différentes méthodes de commande, trois indices de performances devant être minimisés sont proposés :  $D_{cst}$  (resp.  $N_{cst}$ ) pour le respect

1. Ce kit de simulation a été développé par l'université de Valladolid et offre un modèle qui peut être embarqué dans Matlab/Simulink. Il est disponible à l'adresse suivante : <http://astwww.bci.tu-dortmund.de/hycon4b/>

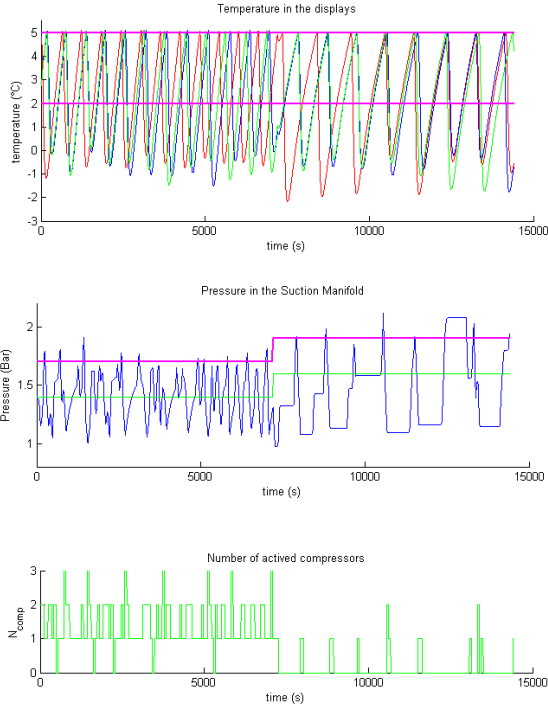


Fig. 4. Comportement du contrôleur classique

des contraintes de jour (resp de nuit),  $D_{sw}$  (resp.  $N_{cst}$ ) qui mesure le nombre de commutations de jour (resp. de nuit) et enfin  $D_{P_w}$  (resp.  $N_{P_w}$ ) qui mesure la puissance moyenne consommée de jour (resp. de nuit)<sup>2</sup>. Afin d'illustrer nos travaux, nous présentons dans la figure 4 les résultats obtenus avec le contrôle utilisé actuellement pour piloter le dispositif, appelé par la suite « contrôle classique », qui met en avant les problèmes de dépassement de température et de pression, et qui utilise également les 3 compresseurs.

### B. Première configuration : 3 vitrines et 3 compresseurs

Pour régler l'algorithme plusieurs paramètres doivent être réglés. En particulier, le comportement global du système peut être modifié en changeant les pondérations dans les termes des critères d'optimisation, et un compromis doit être trouvé entre le nombre de commutations, le respect des contraintes et la consommation énergétique. Par exemple, en augmentant la valeur de  $\alpha_V$  dans l'équation (6), on réduira le nombre de commutations de la vanne des vitrines mais les variations de température et la consommation seront plus importantes. Une autre famille de paramètres, inhérents à la commande prédictive, doivent être également réglés : le choix de la période d'échantillonnage et la fenêtre de prédiction. Ces paramètres sont également directement liés à la complexité du problème d'optimisation : cette fenêtre de prédiction doit être suffisamment grande pour permettre une bonne anticipation des commutations, mais pas trop grande non plus pour pouvoir permettre la résolution du problème d'optimisation en un temps raisonnable. *choix effectués*

Les résultats obtenus avec notre algorithme de commande sont présentés qualitativement dans la figure 5. On

2. Pour rappel, tous les détails sont précisés dans [4]

TABLE I  
COMPARAISON QUANTITATIVE DES RÉSULTATS

Control	$D_{cst}$	$N_{cst}$	$D_{sw}$	$N_{sw}$	$D_{P_w}$	$N_{P_w}$
Classique	1.77	2.01	0.11	0.03	1.40E4	1.30E3
Décentralisé	1.7E-6	1E-7	0.18	0.11	1.36E4	1.30E3
DMPC1	4.6E-6	3.9E-7	0.065	0.037	1.38E4	1.39E3
DMPC2	2.4E-6	5.5E-6	0.058	0.044	1.39E4	1.21E3
DMPC8	7.8E-6	2.4E-6	0.069	0.045	1.36E4	1.29E3

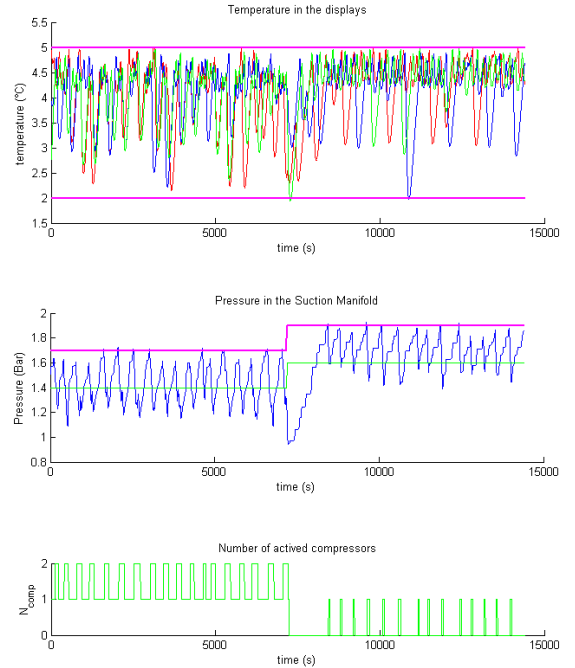


Fig. 5. Résultats obtenus pour 3 vitrines et 3 compresseurs,  $N_{iter} = 2$ .

peut constater le respect des contraintes, sans pour autant avoir besoin d'allumer les 3 compresseurs. Pour illustrer la relation entre la pression, les vannes et le prix, une vue plus détaillée est proposée dans la figure 6. Comme on peut le constater le prix est directement relié à la pression, il augmente dès que celle-ci est proche de la limite. On constate alors que les vannes des vitrines commutent rapidement pour éviter d'avoir à consommer du froid. Quantitativement, le tableau I présente les résultats obtenus. Nous avons effectué plusieurs tests, en faisant varier le nombre maximal de négociations permis (1 itération (DMPC1), 2 itérations (DMPC2) et 8 itérations (DMPC8)). On peut remarquer qu'il n'y a pas de différences sensibles entre les 3 expériences. Une analyse plus précise du nombre d'itérations nécessaires pour converger à chaque instant d'échantillonnage exhibe un nombre moyen de négociation de 2.2, et dans la plupart des cas une seule itération suffit.

Pour 3 vitrines, 3 compresseurs et un horizon de prédiction de 8 pas, la complexité des calculs à chaque instant d'échantillonnage dans une approche centralisée serait de  $(3 \cdot 2^3)^8 = 1.1E11$  possibilités, ce qui est difficilement envisageable. Dans notre approche, il y a  $3 \cdot 2^8 = 768$  cas à tester pour les vitrines et  $3^8 = 6561$  optimisations pour les compresseurs. Ce qui est considérablement moindre, même

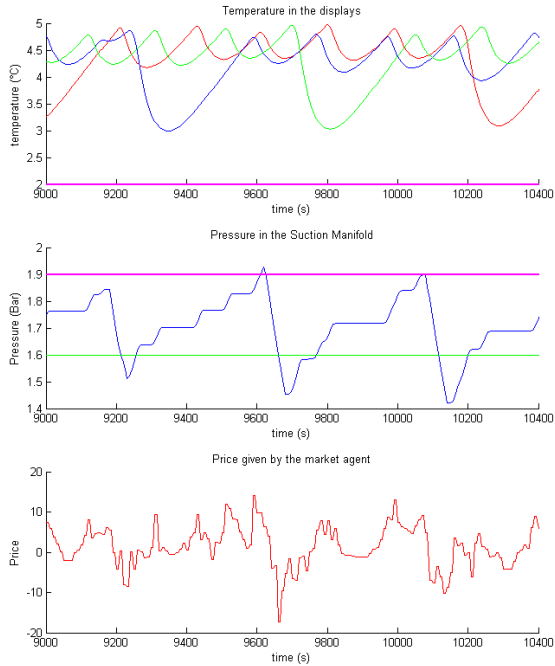


Fig. 6. Interactions entre température, pression et prix.

TABLE II

COMPARAISON QUANTITATIVE DES RÉSULTATS, POUR 10 VITRINES

Control	$D_{cst}$	$N_{cst}$	$D_{sw}$	$N_{sw}$	$D_{Pw}$	$N_{Pw}$
Classique	1.6	1.9	0.25	0.78	1.9E4	4.6E3
Décentralisé	1.9E-3	1.6E-3	0.44	0.30	1.9E4	4.3E3
DMPC2	5.5E-4	2.8E-4	6.7E-2	6.4E-2	1.9E4	4.6E3

si le nombre de phases de négociation est important.

### C. Seconde configuration : 10 vitrines et 6 compresseurs

S'il était encore possible d'imaginer réaliser une approche centralisée pour la configuration précédente, cette fois-ci, l'explosion combinatoire impliquerait  $(6 \cdot 2^{10})^8 = 2E30$  possibilités ! Dans notre approche distribuée, la complexité est uniquement linéaire par rapport au nombre de vitrines, ce qui donne :  $10 \cdot 2^8 = 2560$  cas pour les vitrines et toujours  $3 \cdot 2^8 = 768$  pour les compresseurs, car nous avons fait l'hypothèse d'une seule commutation permise entre deux instants de prédiction. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 7, où comme précédemment, les contraintes de température et de pression sont respectées.

## V. CONCLUSION

Dans cet article, nous nous sommes intéressés à la commande d'un système de réfrigération par une approche prédictive et distribuée. Une telle architecture de commande permet de concevoir des contrôleurs locaux simples, palliant ainsi les problèmes d'explosion combinatoire caractéristique des approches centralisées. Par échanges d'informations, les différents contrôleurs arrivent en quelques itérations à s'accorder vers un consensus, offrant ainsi une solution sous-optimale, sans dégradation de performances, avec un coût de calcul considérablement réduit.

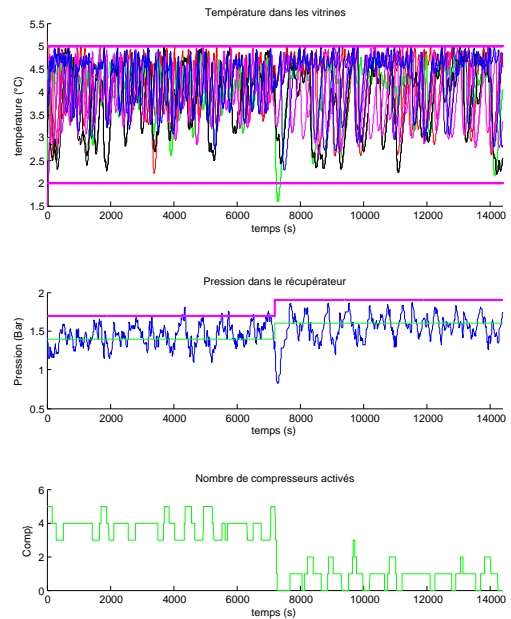


Fig. 7. Résultats obtenus pour 10 vitrines et 6 compresseurs

Comme perspective de travail, un travail est en cours sur la recherche de preuves formelles pour garantir la convergence de l'algorithme proposé.

## RÉFÉRENCES

- [1] Alberto Bemporad et Manfred Morari. Control of systems integrating logic, dynamic and constraints. *Automatica*, 35 :407–427, 1999.
- [2] Lars F. S. Larsen, Tobias Geyer, et Manfred Morari. Hybrid model predictive control in supermarket refrigeration systems. *IFAC World Congress, Volume 16, Part 1*, pages 313–318, July 2005.
- [3] Christian Sonntag, Arvind Devanathan, et Sebastian Engell. Hybrid NMPC of a supermarket refrigeration system using sequential optimization. *IFAC World Congress*, pages 13901–13906, July 2008.
- [4] Daniel Sarabia, Flavio Capraro, Lars F.S. Larsen, et César de Prada. Hybrid NMPC of supermarket display cases. *Control Engineering Practice*, 17(4) :428 – 441, 2009. ””.
- [5] R.R. Negenborn, B. De Schutter, et J. Hellendoorn. Multi-agent model predictive control for transportation networks : Serial versus parallel schemes. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21(3) :353–366, April 2008.
- [6] Yan Zhang et Shaoyuan Li. Networked model predictive control based on neighbourhood optimization for serially connected large-scale processes. *Journal of Process Control*, 17 :37 – 50, 2007.
- [7] J.M. Maestre, D. Munoz de la Pena, et Eduardo Camacho. Distributed model predictive control in few communication cycles. *American Control Conference 09*, March 2009.
- [8] Anders Rantzer. Dynamic dual decomposition for distributed control. *American Control Conference 09*, March 2009.
- [9] Lars F. S. Larsen, R. Izadi-Zamanadi, R. Wisniewski, et Christian Sonntag. Supermarket refrigeration systems - a benchmark for the optimal control of hybrid systems. Technical report, Hycon Benchmark, <http://astwww.bci.tu-dortmund.de/hycon4b/>, 2007.