

RÉGULATION

La commande prédictive réduit sensiblement les

▼ Arc International produit à Arques dans le Pas-de-Calais une grande variété de verres, plats, carafes... Quelle que soit la pièce fabriquée, elle passe par les fours verriers. Ces fours sont énergiquement très gourmands. Depuis quelques années, le groupe a mis en place une stratégie de réduction de ses dépenses en énergie par respect de l'environnement et pour optimiser ses coûts de production. En 2007, il a opté pour la solution de régulation prédictive par modèle de Sherpa Engineering pour réguler la température d'un canal de sortie du four. Résultat : la consommation de gaz a sensiblement diminué.

Avec la régularité d'un métro-
nome, le poinçon éjecte le verre
en fusion de sa chemise. Les
grosses gouttes ainsi formées
tombent dans les moules que leur présente
successivement la machine de formage d'où
sortira une grande variété de verres, plats, ou
encore carafes. Pour chaque type de pièce
fabriquée, la quantité de verre nécessaire et
donc son poids change. Ce poids dépend de
la viscosité du verre qui est elle-même liée à
la température. Il faut donc ajuster très pré-
cisément cette valeur de température en

fonction de la pièce à
réaliser. Le verre est
produit dans un four à
la température de
1 500 °C. Le verre en
fusion est conduit vers
différentes machines
via des feeders de 6 à
8 mètres de longueur.
Le feeder est un canal
de sortie du four par
lequel le verre est dis-
tribué aux différents
outils (centrifugeuses,
moules, etc.). Il me-
sure de 40 à 60 cm de
largeur, mais le dispo-
sitif de calorifugeage
et les systèmes de chauf-
frage et de refroidis-
sement rendent son
volume extérieur plus

important. Il est essentiel que le verre par-
vienne aux outils à la viscosité spécifiée,
c'est-à-dire à une température bien précise
située aux alentours de 1 100 °C. « La tempé-
rature à l'extrémité du feeder doit être ajustée à
0,1 °C près, sinon il faudra jouer sur d'autres
paramètres de fabrication pour obtenir une qualité
de production optimale. Cette température varie
selon le type de verre utilisé et les pièces fabriquées »,
explique Joël Cardon, chef de projet ingé-
nierie fours chez Arc International.

On le voit, le feeder constitue la dernière
étape de traitement de la matière. Le respect
de la qualité visée est à la charge du feeder
dont l'écoulement est conditionné en fonc-
tion de l'équipement qui se trouve à son

extrémité. Il est donc nécessaire de réguler
la température tout au long du canal pour
obtenir une goutte de verre à la température
attendue. Pour ce faire, des dispositifs de
refroidissement par air et une centaine de
brûleurs équipent le feeder. On peut ainsi
réguler la température en jouant sur le débit
d'air et de gaz. Pour obtenir la température
attendue pour la formation de la goutte à
l'extrémité du canal, le feeder est divisé en
trois zones de régulation. On retrouve ainsi
une valeur de température d'entrée, deux
valeurs de température intermédiaire et une
température de sortie. Chacune de ces tem-
pératures doit donc respecter une valeur de
consigne bien précise selon le type de pro-
duction. Pour chaque zone, la régulation
s'effectue en jouant sur le débit d'air et le
débit de gaz des brûleurs. « Chacun de ces pa-
ramètres n'a pas la même efficacité. Leur temps de
réponse et leur dynamique sont différents. L'ensemble
est donc délicat à manipuler et à réguler », indique
Jacques Papon, responsable de projets chez
Sherpa Engineering. Pour chaque tronçon du
feeder, une régulation PID de type split range
avait été tentée : elle agissait sur le chauffage,
le refroidissement ou les deux à la fois. Mais
dans la pratique, compte tenu des difficultés
rencontrées, la régulation ne jouait que sur
le débit de gaz des brûleurs en laissant un
niveau d'air de refroidissement constant.
« Comme nous refroidissions tout le temps, nous
devions chauffer plus que nécessaire ce qui entraînait
forcément une surconsommation de gaz », rappelle
Joël Cardon (Arc International). Cela ne pou-
vait plus durer. Depuis 2000, Arc International
a entrepris une politique de réduction de la
consommation d'énergie pour le respect de
l'environnement en accord avec sa démarche
de développement durable et pour diminuer
ses coûts de fabrication.

Le service de conception et de reconstruc-
tion de fours s'est donc attelé à la recherche
d'un procédé qui améliore les performances
de régulation et réduit la consommation de

L'essentiel

- ▶ La fabrication d'articles en verre exige une régulation précise de la température.
- ▶ Pour optimiser sa production et réduire sa facture énergétique, Arc International a changé la technique de régulation d'un canal de distribution de verre.
- ▶ L'entreprise a opté une méthodologie de régulation fondée sur l'utilisation d'un modèle dynamique du procédé à piloter.
- ▶ Résultat : la consommation de gaz a sensiblement baissé.



Pour chaque type d'article produit, le verre doit répondre à des caractéristiques spécifiques.

par modèle dépendances énergétiques



Produit dans les fours, le verre est acheminé vers les machines de formage via un canal de distribution (feeder) au bout duquel se constitue une goutte de verre dont la température doit être ajustée précisément selon le type de pièces à réaliser.

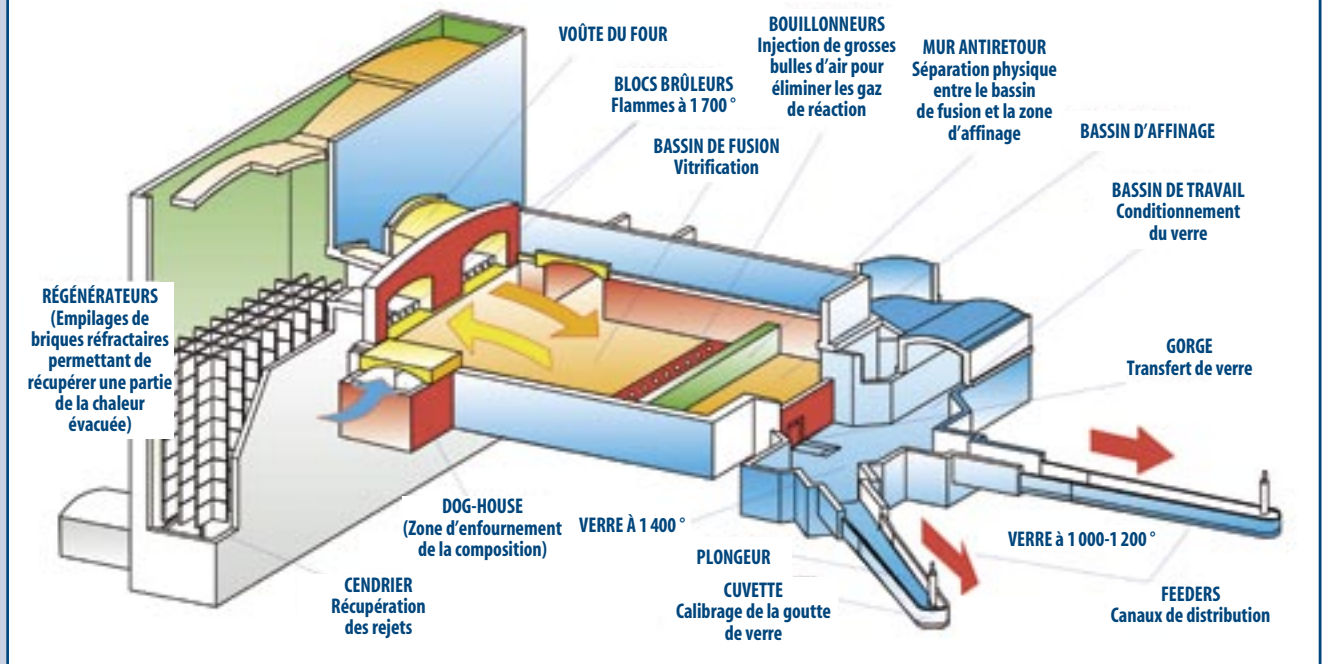
gaz. Le respect des températures spécifiées ne pose pas trop de difficulté en régime stabilisé. En revanche, lors des changements de fabrication, un raccourcissement des phases transitoires représente un gain potentiel important lors des changements de fabrication. Les effets des actions de chauffe (débit de gaz) et de refroidissement (débit d'air) sur les températures sont hétérogènes en termes de dynamiques (retards purs et constants de temps). « C'est ce qui rend délicats des ajustements coordonnés et a conduit jusqu'à présent Arc International à maintenir un niveau de refroidissement constant pour ne jouer que sur les débits de gaz pour réguler les températures », observe Jacques Papon (Sherpa Engineering). L'objectif est donc de maîtriser les deux actions de

façon cohérente et en particulier pour n'utiliser les débits d'air que lorsqu'un refroidissement est nécessaire. Autres difficultés : outre les différences de dynamique entre les actions de chauffe et de refroidissement, ces dynamiques évoluent elles-mêmes avec la tirée (débit de verre) qui peut passer du simple au double.

« Nous avons donc recherché une technique de régulation qui répondait à ces objectifs. Mais nous ne souhaitons pas que le fournisseur nous installe une boîte noire. Nous voulions maîtriser cette technique pour pouvoir intervenir directement si les modèles évoluent et pour que nous soyons capables de la déployer sur d'autres installations », rapporte François Famchon, directeur ingénierie fours (Arc International).

Alors que certaines entreprises sont réticentes à divulguer leur savoir-faire, Sherpa Engineering au contraire a accepté le transfert de sa technologie. La société a proposé une méthodologie de régulation fondée sur l'utilisation d'un modèle dynamique du procédé à piloter : la commande prédictive par modèle. Une introduction à la méthodologie a permis à l'équipe du site de se familiariser avec les principes de cette technologie sous la forme d'une formation incluant une pratique des outils de CAO associés à sa solution PCR. « En s'appropriant la pratique des outils, Arc International peut suivre l'état d'avancement du projet et pourra assurer par la suite la maintenance de l'application », affirme Jacques Papon (Sherpa Engineering). →

Vue d'un four de verrerie



→ La commande prédictive par modèle

La commande prédictive par modèle s'appuie sur les principes suivants :

- L'exploitation d'un modèle du procédé : ce modèle est intégré dans l'algorithme de régulation et permet la prédiction du comportement de la ou des variables de sortie de procédé ;
- La définition d'une trajectoire future désirée pour chaque sortie de procédé sur laquelle l'objectif est défini (consigne ou zone). L'utilisateur définit chaque temps de

réponse : c'est le moyen de spécifier le comportement en boucle fermée pour chacune des sorties ;

- L'utilisation d'un solveur (algorithme de résolution) assurant le calcul des variables manipulables (grandeurs d'action) à appliquer au procédé (ou aux consignes des régulateurs de niveau inférieur) de façon à faire coïncider les comportements prédits avec le comportement futur spécifié.

Le module split range de PCR est intéressant dans cette application car chaque bloc de régulation PCR (chaud ou froid) "sait" ce que fait l'autre bloc et les conséquences des

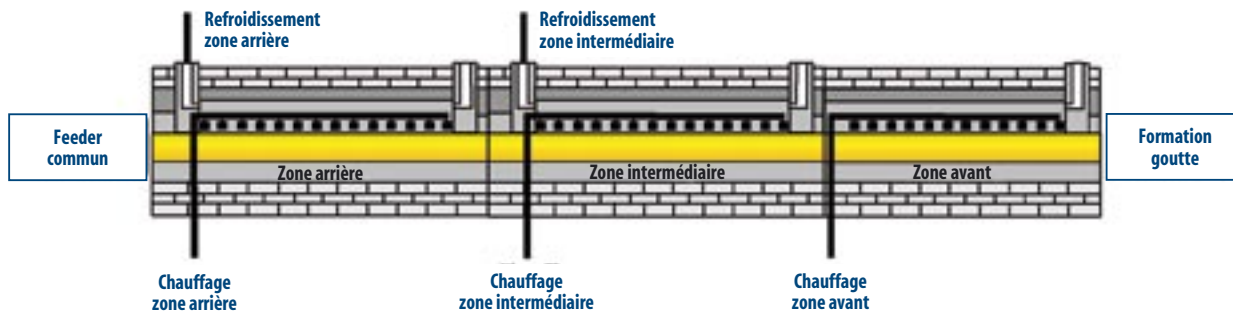
actions appliquées par l'autre régulateur. La régulation s'appuie sur un modèle qui décrit les relations entre l'action manipulée et la température : l'inertie des actions est prise en compte et les calculs intègrent les actions passées dont les effets continuent de se répercuter sur les températures.

L'étude de ce procédé de régulation a démarré sur un seul des feeders d'un four produisant du verre blanc transparent. Après une phase d'analyse du processus de fabrication, une campagne d'essais sur site a été menée conjointement par les équipes techniques d'Arc International et Sherpa Engineering. « Nous avons commencé par appliquer des sollicitations volontaires en forme de créneaux sur les deux variables d'actions (refroidissement et chauffage) pendant environ 8 heures sur les trois zones du feeder pour chaque point de fonctionnement du four. Les valeurs mesurées ont été enregistrées en vue d'être exploitées ultérieurement par nos ingénieurs pour identifier le modèle. Au final, nous avons déterminé un modèle unique pour l'ensemble des tirées car cette régulation s'adapte correctement aux évolutions des paramètres du process », explique Jacques Papon (Sherpa Engineering). Le modèle de la commande est obtenu à partir des valeurs collectées pendant ces tests par un traitement sur PC en utilisant le progiciel de conception PCR de Sherpa Engineering. Après estimation des valeurs des paramètres du modèle dynamique, l'architecture de contrôle a été conçue puis testée par simulation avant d'être

Une usine dans la ville

Impossible de passer à Arques (Pas-de-Calais) sans remarquer le site de production d'Arc International. Il est au cœur de la ville. Depuis sa création en 1825, ce site a considérablement évolué. C'est le plus gros site de production de l'entreprise. Il s'étend sur 250 ha. Il exploite plusieurs fours verriers et diverses lignes de production. « C'est sur le site français où l'on exploite la plus grande diversité de types de verre (cinq sortes) et où l'on fabrique la plus grande variété de produits finaux. Il dessert le marché européen », précise Karine Gittmann, chargée de la communication institutionnelle. La gamme d'articles s'étend du simple verre à moutarde jusqu'au hublot de machine à laver ainsi que de toutes formes de verres, de carafes, des plats, etc. Depuis 2000, Arc International a complété son catalogue d'articles d'art de la table par la porcelaine, la coutellerie et des plats en inox par exemple. Le groupe qui possède plusieurs usines dans le monde, emploie 15 000 personnes (dont 9 000 en France), produit 6 millions de pièces par jour qu'il vend dans 160 pays. Ce qui a généré un chiffre d'affaires de 1,5 milliard d'euros en 2007.

Régulation en trois étapes



Le feeder est un canal de sortie du four par lequel le verre est distribué aux différents outils de production. Il constitue la dernière étape du traitement de la matière. Il est divisé en trois zones sur lesquelles sont répartis des brûleurs et des dispositifs de refroidissement par air qui sont utilisés pour réguler la température du verre à la valeur attendue par la production en cours.

embarquée dans les automates. La régulation en température des trois zones du feeder s'effectue en effet dans l'automate. « Nous avons transcrit les blocs de régulation dans les automates Siemens que nous utilisons à partir des sources fournies par Sherpa », indique Joël Cardon (Arc International).

Cette phase d'étude, de modélisation, de simulation et d'intégration achevée, il ne restait plus qu'à confronter cette technologie à l'épreuve du terrain. La manière de réguler ayant changé (soit chauffer soit refroidir ce qui était difficile à réaliser avec un split range à base de PID), l'exploitant du four a dû

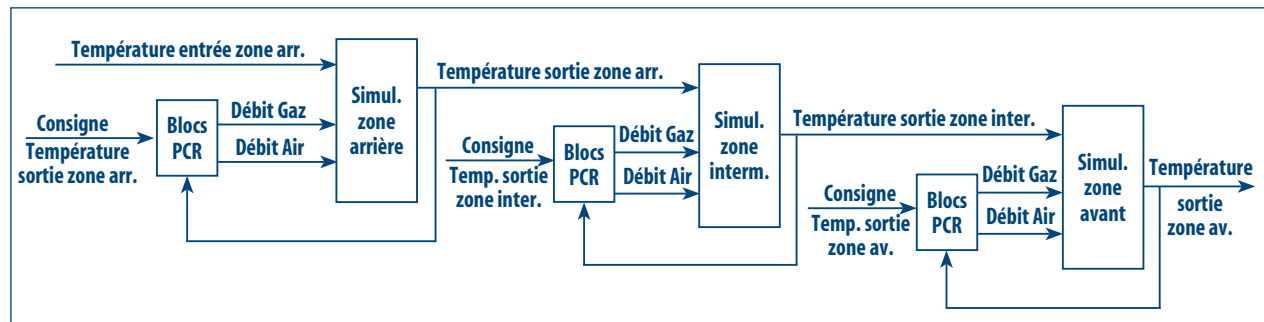
changer la façon de fixer ses consignes. Une procédure a été mise en place pour que l'exploitant s'adapte progressivement à ce nouveau procédé de régulation. « A partir de ce qu'il faisait avant et en conservant un niveau de refroidissement constant, il a baissé graduellement ce seuil en laissant à la nouvelle régulation le soin →

De la simulation à la régulation

Compte tenu de la dépendance prévisible des paramètres à la tirée, des essais ont été réalisés à trois points de fonctionnement différents du feeder (canal de distribution du verre, du four aux machines).

Les paramètres des modèles ont été identifiés pour chacune des trois zones du feeder et pour chaque point de fonctionnement du four. Les modèles ainsi construits ont été utilisés pour réaliser un simulateur de l'ensemble du système en boucle fermée comportant les trois zones du procédé et toute l'architecture de régulation à base de blocs de la bibliothèque PCR. Ce simulateur est conçu dans l'environnement Matlab/Simulink.

L'architecture de commande comprend une cascade de trois structures semblables, chacune étant constituée d'un ensemble "split range" et "Feed Forward" suivant le schéma bloc ci-dessous.



Dans cet environnement, l'utilisateur peut spécifier et régler la régulation de façon à trouver un compromis satisfaisant entre les performances (temps de réponse en boucle fermée) et la robustesse (résistance à une désadaptation entre le modèle de commande et le procédé physique, simulé à ce stade).

Le code des programmes de régulation a été ensuite intégré dans l'automate Siemens S7 par l'équipe du site en parallèle avec la mise au point de l'architecture en simulation.

→ d'ajuster le chauffage de façon appropriée », se souvient François Famchon.

Après la phase de prise en main, les améliorations attendues étaient bien au rendez-vous. Ce procédé de régulation prédictive par modèle a réduit la consommation de gaz. Arc International préfère rester discret sur ce point et ne pas révéler de chiffres. Mais le temps de retour sur investissement, estimé sur la seule économie d'énergie, est inférieur

à 10 mois. D'autres progrès sont à mettre sur le compte de la régulation prédictive. Cette dernière, plus performante ici que la régulation PID, permet une meilleure maîtrise des températures et conduit à une réduction des pertes de charge (écoulement du verre dans le feeder) d'où des gains de production. Par ailleurs, suite à une variation de tirée ou à un changement de production, la période transitoire pendant laquelle la température

du verre n'est pas encore conforme à la température de fabrication attendue a été baissée d'un tiers.

« Forts des résultats obtenus depuis plus de six mois par l'application de cette technologie sur un seul feeder, nous proposons cette méthode aux autres exploitants. Mais ce n'est pas forcément transposable tel quel partout. Il y aura forcément des adaptations », précise Joël Cardon (Arc International). D'un four à l'autre, la longueur et la largeur des feeders ne sont pas identiques. Or, ces dimensions ont beaucoup d'influence sur les comportements de température et donc sur le modèle de commande prédictive. Le travail d'identification préalable, pour déterminer les paramètres du modèle, sera toujours nécessaire.

Mais sur l'immense site d'Arques qui s'étend sur 250 ha, cette expérience est un véritable succès. « Les exploitants qui ont été sensibilisés aux atouts de cette nouvelle méthode de régulation en parlent à leurs collègues lors de réunions techniques. Ces derniers viennent alors vers nous pour savoir si cette solution est applicable à leur installation et dans quelles conditions », rapporte François Famchon. Résultat, après la mise en service de la régulation prédictive sur un premier feeder en juillet 2007, d'autres feeders devraient être également équipés de ce type de régulation courant 2008.

Youssef Belgnaoui

Des fours bien soignés

A Arques, que l'on fabrique un verre, un plat ou une carafe, tout part du four. C'est l'une des pièces maîtresse de la production qu'il faut bien entendu soigner. Cette tâche relève du service de conception et de reconstruction de fours. Il doit régulièrement remettre à neuf la garniture réfractaire qui se corrode avec l'agressivité du verre. Mais ce service est également chargé d'optimiser les installations, maîtriser les consommations d'énergie et trouver des solutions pour répondre aux problématiques environnementales. Une veille technologique s'impose. « Qu'est-ce qui se fait et que je peux transposer sur nos installations ? » Cette question revient tel un leitmotiv. Ce service ne possède pas de fours d'essais. Les essais doivent donc être conduits sans perturber la production. « Nous ne pouvons pas faire des études théoriques et les appliquer à l'installation. Nous mettons en place un partenariat avec les exploitants du four. Les changements de méthodes ou de technologies ne porteront leurs fruits que si l'exploitant est persuadé qu'ils lui seront utiles. Si nous les imposons cela ne marchera pas », assure François Famchon, directeur ingénierie fours. L'exploitant est force de proposition et il va participer au développement. Son expérience est importante car il y a beaucoup d'empirisme dans la fabrication du verre. En fin de compte, il s'approprie le projet.