

MIG Verre - Modélisation des fours

Simon Lamaze - Corto Beck - Girardet Grégoire - Fraenkel Paul

2 décembre 2024

1 Introduction

Ce mini-projet traite de la modélisation et de l'optimisation énergétique des fours à verre. La compréhension des phénomènes physiques qui prennent place dans un four est essentielle à l'optimisation des procédés.

Voici un four à fusion :

2 Objectifs

2.1 Contexte

Le verre est un matériau produit à des températures très élevées, de l'ordre de 1300°C . Il faut utiliser des quantités d'énergies très importantes pour porter le matériau à cette température, et le moyen utilisé aujourd'hui est principalement l'utilisation de brûleurs au gaz (les brûleurs au fioul ne sont plus utilisés pour des raisons économiques) qui ont une consommation de l'ordre du $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$. Pourtant, le verre liquide est conducteur, ce qui signifie qu'une fois porté à suffisamment haute température, il peut être chauffé par des électrodes qui créent un champ électrique dans le liquide et provoquent un réchauffement par effet Joule. Cependant, des contraintes de qualité du verre empêchent l'utilisation de cette méthode pour les verres de bonne qualité, car on observe alors une augmentation de la quantité de bulles dans le verre à cause de la modification de la dynamique du four. En effet, les flux de matières sont différents selon que la chaleur provienne du haut ou du fond du four, et les boucles de convection ne permettent plus d'évacuer convenablement les bulles.

2.2 Objectifs

Le but est de simuler des fours alimentés principalement par source électrique, afin d'identifier les dynamiques de ces fours particuliers et permettre la conception de fours industriels fonctionnant à l'électricité qui ont donc une empreinte carbone plus faible (tant que l'électricité utilisée est verte). On s'intéresse d'abord à la compréhension des dynamiques des fours existants et connus, avant de proposer des modifications de ces outils pour utiliser plus d'électricité. Pour ce faire, on dispose des outils du Cemef et des connaissances de Franck Pigeonneau, qui maîtrise déjà les outils.

3 Déroulement de la simulation

Tâche 1 : positionnement du problème :

Conditions limites, conditions initiales, mise en équations

Tâche 2 : prise en main des outils de calcul

Maillage, cluster, post-traitement, CIMLIB, vitesse des calculs

Tâche 3 : Calcul sur un cas à voûte chaude

Obtenir un cas convergé, bilan énergétique

Tâche 4 : Calcul sur un cas à voûte plus froide

Same

Tâche 5 : Bilan du gain énergétique et des émissions carbone

On utilise le logiciel Paraview pour visualiser les résultats. Visualiser la propagation d'un champ pour définir le temps de résidence. Faire plusieurs calculs avec des tailles différentes.

4 Positionnement du problème

- Les équations que nous nous appliquerons à résoudre seront les suivantes :

4.1 Equations de Navier-Stokes et thermique

- Les équations que nous nous appliquerons à résoudre seront les suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 & \text{conservation de la masse} \\ \rho_0 \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\rho_0 \beta (T - T_0) \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot [2\eta(T) \vec{D}] - \vec{\nabla} P & \text{conservation du moment} \\ \vec{D} = \frac{1}{2} [\vec{\nabla} \vec{V} + (\vec{\nabla} \vec{V})^t] & \\ \rho [C_p + \Delta H_f \frac{d\alpha}{dT}] \frac{DT}{Dt} = \vec{\nabla} \cdot (\lambda_{eq}(T) \vec{\nabla} T) + \sigma_e(T) (\vec{\nabla} \phi)^2 & \text{équation de la chaleur} \\ \vec{\nabla} \cdot (\sigma_e \vec{\nabla} \phi) = 0 & \text{conservation du flux électrique} \end{array} \right.$$

Comme les transfert de chaleur sous formes radiatives sont très importants, on ne peut pas les négliger dans l'équation habituelle de diffusion de la chaleur :

$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T)$. Cependant, comme le milieu est semi-transparent, on peut modéliser l'ensemble des transfert en remplaçant λ par $\lambda_{eq} = \lambda + \frac{16n^2\sigma T^3}{3\beta_R}$.

4.2 Puissance électrique

On se place dans le cas uniphasé, en réalité, dans l'industrie le régime est triphasé, plus de calculs en annexes.

$$P_{eq} = \int_{\Omega} \sigma_e(T) (\vec{\nabla} \phi)^2 dV = \int_{\Omega} \vec{\nabla} [\sigma_e(T) \vec{\nabla} \phi] dV$$

par intégration par partie et loi de conservation du potentiel ($\vec{\nabla}^2 \phi = 0$). Le théorème de Green-Ostrogradski donne :

$$P_{eq} = \phi_{elec} \int_{\partial_{elec}} \sigma_e(T) \vec{\nabla} \phi \cdot \vec{n} dS$$

Car le potentiel est constant = ϕ_{elec} à la rontière des électrodes.

4.3 Expressions des différentes grandeurs et constantes

Le taux de conversion α est une sigmoïde : fonction d'erreur de Gauss

- On modélise la dépendance de la viscosité à la température par une loi de type VFT (Vogel-Fulcher-Tamman)

$$\eta(T) = 10^{A_\eta} e^{\frac{\ln(10)B}{T-T_\eta}} \quad \log(\eta) = A_\eta + \frac{B}{T - T_\eta}$$

- La dépendance de la masse volumique est :

$$\rho(T) = \rho_0(1 - \beta\Delta T) \quad \beta = -\frac{1}{\rho_0} \frac{d\rho}{dT}$$

- La dépendance de la conductivité électrique est :

$$\sigma_e(T) = A_e e^{\frac{-B_e}{T}}$$

- Dérivée particulaire : (importante en méca flu)

$$\frac{DG}{Dt} = \frac{\partial G}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla})G$$

- Pour calculer le temps de résidence, à savoir la réponse à un échelon C en entrée :

$$\phi_C = \iint_S C \vec{u} \cdot \vec{n} dS \quad \phi = \iint_S \vec{u} \cdot \vec{n} dS \quad \langle C \rangle = \frac{\phi_C}{\phi}$$

La distribution des temps de résidence, à savoir la réponse à un dirac, est donnée par

$$E(t) = \frac{d\langle C \rangle}{dt}$$

4.4 État aux frontières

Les flux thermiques sont donnés par les lois de Newton et Stefan aux parois et surfaces libres. le batch est introduit à iso température. on considère les transferts thermiques de Boltzmann seulement pour la surface libre. On peut calculer les flux aux frontières par la loi de Newton sur les transferts conducto-convectifs.

$$\phi_{wall} = h_{wall}(T - T_\infty)$$

$T_{haut,min}$: Température minimale de voûte

ΔT_{haut} : Différence de température maximale

5 Réalisation des simulations

5.1 Création du four

On commence par créer un maillage représentant le four à partir de ses dimensions, qui ont été déterminées préalablement. On utilise l'outil gmesh, qui génère un ensemble de points et de segments les reliant. Tous les champs, scalaires et vectoriels, seront calculés en ces points lors de la simulation. Il est donc nécessaire qu'il y en ait assez pour garantir la précision de la simulation, mais la quantité de calcul augmente avec le nombre de point. Il faut donc trouver la bonne finesse, qui peut être variable dans le maillage. On augmente la densité dans la gorge (tunnel d'évacuation du verre) et à proximité des zones de forte variation dans les champs.

TODO : ajouter images du four (mesh, géométrie)

Une fois le maillage créé, on convertit le fichier produit en un format particulier utilisé par la bibliothèque de calcul au moyen d'un script python.

5.2 Définition du four pour le calcul

Une fois que l'on dispose du maillage du four, et que l'on a décidé des paramètres de la simulation (durée, pas de temps, conditions aux limites, ...) on peut rentrer ces paramètres de façon à ce qu'ils puissent être lus par le logiciel de simulation. Pour cela, on utilise un langage de déclaration créé sur mesure pour l'outil. Tous les champs doivent être initialisés, et la façon dont ils sont calculés à chaque pas de temps est défini, au moyen de solveurs d'équations aux dérivées partielles prédéfinis.

Cette étape est longue et sujette à erreurs, notamment à cause du nombre de champs à changer, de l'absence totale de documentation sur l'outil, et du manque de clarté des messages d'erreurs produit par l'outil lors d'un problème dans les déclarations.

5.3 Calculs de la simulation

Pour réaliser les calculs, on utilise le cluster du cemef : un serveur disposant de 100 noeuds de calcul, chacun disposant de deux processeurs pour un total de 64 coeurs. Une fois la simulation lancée, les tâches sont réparties de façon automatique entre les coeurs pour une vitesse de calcul maximale. On peut agir sur la simulation au moyen d'un fichier lu à chaque itération qui sert d'interface homme-machine (ihm), et ainsi changer différents paramètres : température d'entrée de la matière dans le four, paramètres de l'asservissement PID, ... De plus, la simulation produit un fichier qui recense la valeur de

FIGURE 1 – Exemple de code pour le calcul d’une température de voute à profil gaussien

```
{ Operation= Xnorm = X }
{ Operation= Xnorm *= 2 }
{ Operation= Xnorm /= L }
{ Operation= Xnorm += -1 }
{ Operation= Xnorm **= 2 }

{ Operation= Ynorm = Y }
{ Operation= Ynorm *= 2 }
{ Operation= Ynorm /= W }
{ Operation= Ynorm += -1 }
{ Operation= Ynorm /= 3 }
{ Operation= Ynorm **= 2 }

{ Operation= Tvoute = Xnorm }
{ Operation= Tvoute += Ynorm }
{ Operation= Tvoute *= -1 }
{ Operation= Tvoute EXP Tvoute }
{ Operation= Tvoute *= TvouteCons }
{ Operation= Tvoute += Tbase }
```

certaines paramètres à chaque itération, comme la température de sortie, les puissances électriques et thermiques fournies et les pertes thermiques à travers les parois, et des fichiers qui enregistrent complètement les champs toutes les 100 itérations. On peut alors surveiller l'avancement de la simulation, et agir sur les paramètres afin d'obtenir un résultat satisfaisant (les calculs étant très longs, on veut pouvoir mener à bien une simulation qui n'a pas bien commencé).

5.4 Calculs avec une nouvelle composition de verre

Le verre utilisé comprend 65% de SiO_2 , 13% de CaO et Na_2O à 25 %. Pour relancer une simulation de four avec cette composition nous avons implémenté les nouveaux paramètres et calculé la température cible à iso-viscosité. La température cible est 173 degrés inférieure à celle précédente (1420 K). On a ensuite cherché à comparer les rendements énergétiques et l'efficacité du four par rapport au verre précédent; cette diminution de la température cible diminue nettement l'énergie à apporter.

6 Régulation à l'aide d'un PID

6.1 Asservissement en puissance électrique

Principe général et Besoin Le paramètre principal à maîtriser pour un four pour un industriel est sa température de sortie. La pilotabilité de l'énergie apportée par électrodes en fait un moyen de régulation particulièrement adapté. Dans ses recherches passées, notre encadrant Franck Pigeonneau a utilisé un régulateur PID agissant sur la puissance des électrodes, pour contrôler la température de sortie. La difficulté à modéliser le système formé par le bain de verre réduit la détermination des coefficients du PID à des méthodes empiriques. Nous nous proposons de réaliser une modélisation simplifiée afin de déterminer une estimation plus précise de ces coefficients.

Modélisation simplifiée Nous avons basé nos calculs sur le modèle de four à 5 électrodes. Puisque les boucles de convections définissent deux "domaines", il est possible de ne considérer que la seconde moitié du four menant à la sortie. Cela mène à ne considérer qu'une seule boucle de convection, qui se modélise par un retard dans le transport de la température entre les différents points du cycle.

Simulation sur Simlab La boucle de convection est divisée en 2 sections, reliant les 2 zones principales qui sont la zone de chauffage par électrodes et la

zone de sortie, où le flux de matière est divisé en deux, l'un revenant dans la boucle, et l'un sortant du système. La vitesse de déplacement de la matière dans la boucle est déterminée grâce aux simulations. La zone de chauffage produit l'échauffement de température suivant :

$$\Delta T = \frac{P_{elec}}{\dot{m} \cdot C_p}$$

Reste à modéliser la propagation de la chaleur aux différents points du cycle de convection. Nous pouvons comparer les temps caractéristiques de propagation de la chaleur par convection et par conduction :

$$\tau_{Conduction} = \frac{a^2 \rho C_p}{K} \approx 134 \text{ h}$$

$$\tau_{Convection} = \frac{d_{parcours}}{u_{moy}} \approx 133 \text{ s}$$

Cela invite à négliger le terme de conduction thermique, et à modéliser le transport de la température par un retard de valeur $\Delta t = d_{parcours}/u_{moy}$. Néanmoins, la conduction thermique n'étant pas totalement absente, la température n'est pas discontinue, et il convient donc de rajouter un terme pour l'étape du transport, que nous considérerons d'ordre 1 pour plus de simplicité.

Résultats de la simulation La simulation permet d'obtenir une bonne approximation de la valeur des coefficients du régulateur PID. Il apparaît à première vue que le terme le plus important est le terme proportionnel, et qu'il est possible de se passer des corrections intégrale et dérivée. On observe que le système ainsi réglé semble se comporter comme un système d'ordre 1. Théoriquement, il suffirait d'augmenter le terme proportionnel jusqu'à obtenir un dépassement pour diminuer le temps de réponse. Le système réel d'électrode étant limité en puissance, le gain K_p doit lui aussi être limité. Cette première simulation permet de définir les coefficients suivants :

$$K_p = 1000$$

$$K_I = 0.001$$

$$K_D = 0$$

Le choix de ne pas prendre un terme K_I nul vient du fait que nous n'avons pas pris en compte les pertes thermiques, qui engendrent un besoin en apport de puissance supérieur, compromettant la précision de la régulation limitée au terme proportionnel.

Simulation du four Afin d'améliorer la précision des coefficients, nous avons simulé un four avec une régulation PID utilisant les coefficients précédemment définis. On observe que la température de sortie T_{outlet} sur laquelle est réalisée l'asservissement converge avec un temps de réponse à 95% de $2.0 \cdot 10^4$ s. Ce qui est convenable. Néanmoins, comme attendu, la température de consigne n'est pas atteinte :

$$T_{finale} = 1569.9 \text{ } ^\circ K \quad T_{Cons} = 1593.15 \text{ } ^\circ K$$

L'analyse de l'évolution des termes du régulateur permet d'obtenir une nouvelle estimation du coefficient K_I

Nouvelle estimation de K_I Une vision du régulateur PID est d'utiliser le terme Intégral pour compenser toutes les pertes énergétiques en régime stationnaire, et le terme proportionnel pour réagir aux fortes variations. En effet, lorsque la température de consigne est atteinte, le terme proportionnel est alors nul. En régime stationnaire, la puissance à apporter au milieu est donnée par :

$$P_{apport} = \dot{m}C_P(T_{Cons} - T_{Inlet}) + P_{pertes} - P_{gaz}$$

d'où

$$P_{apport} \approx 25.394 \text{ kW}$$

Grâce à la simulation Cimlib, on calcule la valeur du terme intégral S_{Int} à $t = t_{95\%}$. On obtient alors :

$$K_I = \frac{P_{apport}}{S_{Int}} \approx 0.039$$

6.2 Asservissement en température de voute

Principe général Une autre manière de réguler la température de sortie est par le changement de la température de voute. En effet, dans notre simulation, la voute du four est considérée comme la partie chauffée au gaz, et réduire sa température tout en compensant la perte de puissance thermique avec plus de chauffage électrique est un bon moyen de réduire les émissions en CO_2 du four.

Modélisation Pour simplifier le système, on considère cette fois que la puissance fournie par les électrodes est constante, de valeur égale à la puissance thermique fournie en régime permanent dans la simulation avec apport principalement thermique. La température de voute est calculée selon la formule :

$$T_{voute} = T_{base} + DTexp(Cons)$$

avec $T_{base} = 1373,15K$, et

7 Annexe

Liste des instructions : `cd /work/MINES-PARISTECH/slamaze sf nano ihm.mtc => changer le temps à 0 cd GlassFurnace3D/ cimlib CFD driver glassfurnace3d.mtc`
`ls Geometrie/ mv Geometrie/indicfrontieres.vtu`
`/work/MINES-PARISTECH/slamaze/ => open avec PARAVIEW, vérifier les frontières nano ihm.mtc , modifier le temps sbatch job.sh`