

CFD-Zones, un outil de dimensionnement et d'optimisation des installations industrielles à hautes températures.

Erwin GEORGE^{1*}, Yilmaz KARA¹, Clotilde VILLERMAUX¹, Alain QUINQUENEAU¹

¹GDF SUEZ / DRI / CRIGEN / DU / Industrie

361 avenue du président Wilson, 93211 Saint-Denis la Plaine Cedex

* (auteur correspondant : erwin.george@gdfsuez.com)

Résumé - Afin de répondre aux besoins de ses clients industriels, GDF SUEZ développe des outils de dimensionnement et d'optimisation des installations thermiques hautes températures. Dans ce contexte, et contrairement aux outils CFD « classique », le modèle CFD-Zones couplé au code commercial ANSYS-CFX[®] est parfaitement adapté pour l'analyse rapide de la sensibilité des échanges aux conditions opératoires. Ainsi, cette propriété essentielle de l'outil permet d'accéder aux critères clés de l'optimisation et de la conduite des unités thermiques industrielles.

1. Introduction

Les travaux présentés dans cet article s'inscrivent dans une démarche de développement par la Direction de la Recherche et de l'Innovation de GDF SUEZ d'outils d'optimisation des performances énergétiques des procédés thermiques '*hautes températures*'.

Les principales applications de ces outils concernent des procédés industriels fortement instationnaires dont la simulation par les codes « classiques » de type CFD (Computational Fluid Dynamics) est rendue difficile à cause des coûts prohibitifs générés malgré la constante évolution des ressources informatiques. La conception de ces outils repose sur une simplification de la résolution numériques des transferts thermiques inhérents aux procédés « hautes température ». Ainsi, une approche 3D simplifiée de type modèle de zones [1] couplée au code commercial ANSYS-CFX[®] suffit pour simuler correctement d'un point de vue purement thermique, et en moins de 12 heures, la dynamique de systèmes industriels complexes alors que la CFD « classique » nécessite quant à elle plusieurs jours pour obtenir un résultat similaire. Cet outil performant permet par ailleurs de bénéficier de l'environnement logiciel du code commercial CFD pour les étapes de pré- et de post-traitement des simulations numériques.

2. L'approche zonale

2.1. Préambule : le modèle de zones

Les systèmes industriels étudiés dans le cadre des présents travaux sont des procédés thermiques fonctionnant à des températures élevées, supérieures à 1 000°C, au sein desquels les transferts radiatifs sont très significatifs [2]. Cette caractéristique permet de se focaliser sur une représentation macroscopique des échanges convectifs au lieu d'une description fine des structures de l'écoulement fluide : c'est le fondement propre du modèle de zones qui sera détaillé ultérieurement. Il s'agit donc d'utiliser une version simplifiée du code ANSYS-CFX[®] conçu pour simuler le fonctionnement dynamique d'unités thermiques industrielles complexes

pour des temps CPU limités : *les simulations numériques présentées ici sortent de la catégorie des calculs dits CFD « classique »*. Au-delà du premier fondement énoncé précédemment, le modèle zonal permet également de favoriser une discrétisation spatiale plus souple du domaine.

Les modélisations des phénomènes thermiques présents dans les systèmes industriels visés sont décrites ci-après et se classent suivants trois catégories distinctes que sont les échanges radiatifs, les transferts conductifs dans les solides et les échanges advectifs dans les fluides.

2.2. Résolution des transferts par rayonnement

Les échanges radiatifs sont représentés en se basant directement sur la résolution des équations disponibles sous ANSYS-CFX[®]. Pour ce mode de transfert, aucune simplification n'a été envisagée lors de l'implantation du modèle de zone afin d'éviter une dégradation des résultats. Le modèle retenu pour simuler les cas présentés par la suite est le modèle « Transferts Discrets » avec un nombre de rayon égal à 20.

2.3. Résolution des transferts par conduction

Les échanges de chaleur au sein des domaines solides, *i.e.* la charge et les parois du four, sont estimés directement par l'algorithme de résolution de ANSYS-CFX[®].

2.4. Résolution des transferts par convection

C'est principalement pour ce mode de transferts que l'approche zonale conduit à une simplification conséquente qui permet une réduction importante des temps de calcul. Dans ce cas, la résolution par approche CFD des écoulements fluides au sein du système n'est pas envisagée en tant que tel ce qui permet une discrétisation spatiale plus faible. Cette simplification des échanges convectifs est en grande partie permise par la prédominance, dans les procédés « hautes températures », des transferts radiatifs. Par conséquent, le domaine fluide est divisé et représenté sous forme de zones tridimensionnelles pour lesquelles les transferts convectifs sont modélisés par une approche macroscopique inter-zonale : le modèle CFD-Zones.

3. Intégration dans ANSYS-CFX[®] et mise en œuvre

Le modèle CFD-Zones a été implanté dans ANSYS-CFX[®] via des routines utilisateurs. Il requiert des données sur les transferts convectifs inhérentes au système ainsi que des données sur les puissances mises en jeu. De plus, ce modèle peut également prendre en compte des zones de récupération thermique pour simuler des brûleurs régénératifs [3] (efficacité et rendement déterminés d'après des travaux expérimentaux menés à GDF SUEZ). Afin d'optimiser la stabilité numérique du modèle, un Jacobien a été implanté pour le terme source ce qui permet une réduction drastique du nombre d'itérations nécessaire pour atteindre la convergence : cette approche se révèle être d'une efficacité remarquable pour les phases instationnaires du calcul.

3.1. Matrice d'échange entre les zones

Le cas retenu pour illustrer l'application de l'outil CFD-Zones est représenté sur la Figure 1. Dans cet exemple, le brûleur qui dégage la puissance dans le système est positionné en zone 1 alors que la cheminée se situe en fin de zone 4. Par ailleurs, il apparaît une

recirculation entre les zones 2, 3 et 1. Si 70% de la masse entrant dans la zone 2 (depuis la zone 1) va dans la zone 3, nous aurons la matrice d'échange comme dans l'équation 1. Cette matrice doit être totalement renseignée pour initier le calcul zonal par CFD-Zones.

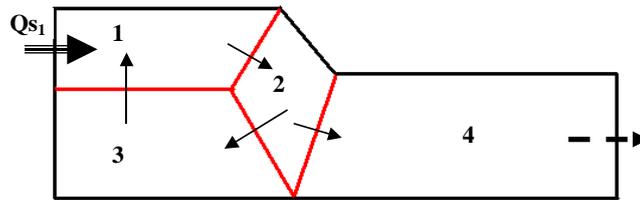


Figure 1 : Exemple de domaine zonal avec matrice d'échange associée

$$A_{MOYEN} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,7 & 0 & 0 \\ 0 & 0,3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

3.2. Remplissage de la matrice d'échange

3.2.1. Echange issu de la CFD

Le but est de superposer les champs issus du calcul CFD (aérodynamique simple) sur le maillage zonal et de déterminer les flux de matière sur les interfaces entre zones. Une fois le calcul CFD convergé, l'utilisateur doit retourner dans le logiciel de maillage et découper en zone le domaine de calcul. Le découpage est fonction des champs de température (température homogène par zone) et de l'aérodynamique (recirculations, points d'arrêt, ...). A l'aide de scripts dédiés, les flux de matière aux interfaces (moyens ou orientés) sont remplis automatiquement dans les fichiers de mise en donnée de CFD-Zones. Cette approche est très utile pour étudier les configurations où les écoulements internes sont très perturbés.

3.2.2. Echange sans calcul CFD préalable

Il est aussi possible d'utiliser un autre script qui créera les fichiers de données sans remplir les données relatives à l'aérodynamique. Charge ensuite à l'utilisateur de définir, a priori, la forme globale de l'écoulement.

4. Exemples de simulations CFD-Zones

Ce paragraphe présente quelques exemples d'application de simulations d'unités industrielles avec l'outil CFD-Zones. Les cas reportés concernent aussi bien des simulations stationnaires ou dynamiques sur des fours batchs ou continus. Les deux méthodes de remplissage des matrices d'échanges y sont été également présentées.

4.1. Four batch avec brûleur régénératif – calcul dynamique [3]

Cet exemple vise à étudier le comportement d'une brique d'acier chauffée durant un cycle de montée en température de trois heures. Le four d'une puissance de 200 kW a été divisé en quatre zones : zone de chauffe (A), zone d'évacuation (EVAC), zone de récupération de

fumée (CHEM) et zone où la brame repose (B) (Figure 2). Ici, les écoulements ont été définis *a priori* et la matrice d'échange remplie manuellement.

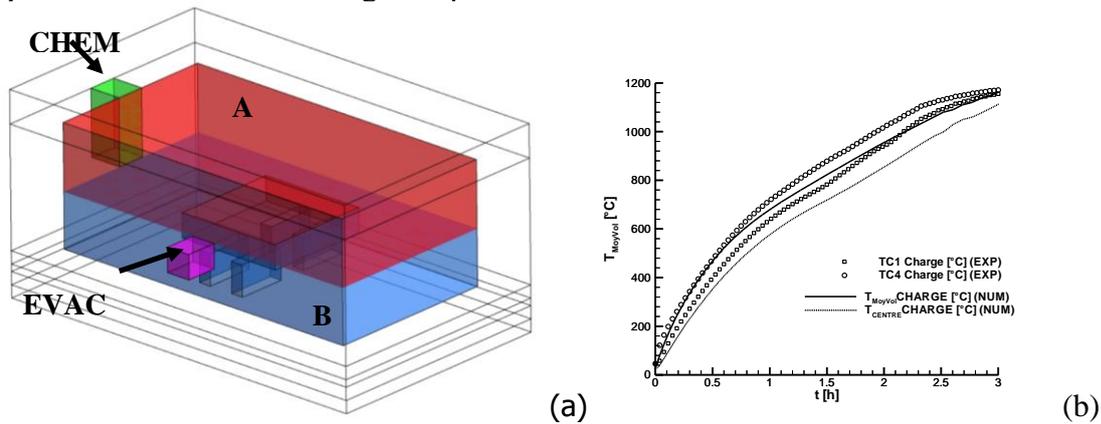


Figure 1 : Exemple de résultat CFD-Zones sur cellule avec brûleurs régénératifs

Il apparaît que les températures en peau et en cœur de produit (figure 1 (b)) obtenues par la simulation CFD-Zones sont en bon accord avec les résultats expérimentaux. Le temps de calcul nécessaire à la convergence du calcul est de l'ordre de 1 h 20 min contre probablement plusieurs jours avec approche CFD « classique ».

4.2. Four batch avec brûleur BSI – calcul dynamique [5]

L'exemple de four batch retenu pour la simulation numérique avec CFD-Zones représente une cellule expérimentale d'une puissance globale de 400 kW (deux brûleurs BSI de 200 kW en vis à vis). Ici, de part la complexité du comportement aéraulique du système, le domaine a été sub-divisé en 14 zones et les échanges convectifs ont été déterminés avec le script ad'hoc. La chauffe du produit s'échelonne sur 1 h 30 min. Le découpage en zone et les zones de chauffe sont reportés sur la Figure 3.

Les résultats CFD-Zones (Figure 4) sont en bon accord avec les mesures expérimentales, sauf au-delà de 1000 s où une régulation, non prise en compte par CFD-Zones, a été appliquée lors des essais.

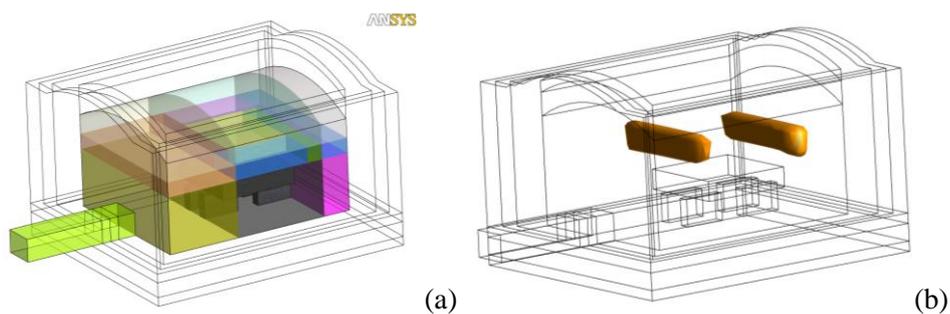


Figure 3 : Domaine zonale (a) et zones d'injection de puissance (b)

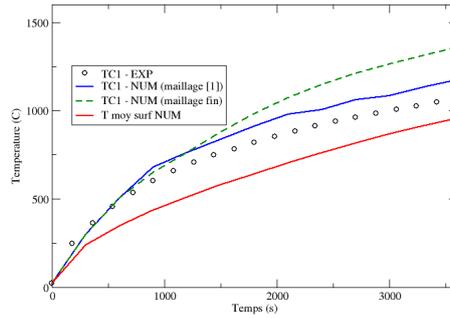


Figure 3 : Domaine zonal et zones d'injection de puissance

4.3. Four continu de réchauffage brame [5]

Le dernier exemple est relatif à un four continu de réchauffage de brames pour lequel des mesures sur site industriel ont été menées. Le découpage a été réalisé en fonction des diverses zones de chauffe ou de maintien du four. Le domaine concerné est présenté sur la Figure 4 (a) et l'écoulement est arbitrairement supposé de type piston (pas de calcul CFD préalable). Les résultats CFD-Zones sont consignés sur la Figure 4 (b). Une fois de plus, l'outil CFD-Zones permet d'obtenir des résultats très proche des mesures expérimentales. En effet, l'erreur sur les températures simulées est estimée à moins de 5% d'erreur alors que l'écoulement a été simplifié de manière drastique.

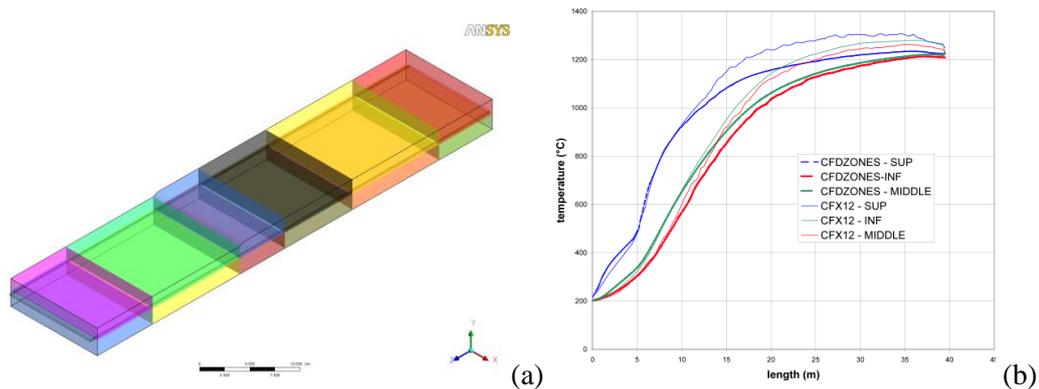


Figure 4 : Domaine zonale (a) et résultats CFD-Zones (b)

4.4. Temps CPU associés à ces calculs

Les temps CPU relatifs à la réalisation des calculs présentés dans cet article sont consignés dans le tableau 1. Il apparaît que les temps de calcul sont très réduits comparativement aux temps nécessaires pour la simulation numérique avec une approche CFD « classique ». De plus, CFD-Zones a été positionné par rapport à des outils dédiés de même typologie (modèle de zone, réseau de neurones) et là aussi la pertinence de cet outil en terme de validité et de temps de calcul est avérée.

Critères de comparaison		Exemple 1	Exemple 2	Exemple 3
régime stationnaire	Nombre d'éléments	1938	3344	302
	Nombre de zones	4	14	7
	Réchauffage de l'air	oui	non	non
	Défilement de la charge	non	non	oui
	Nombre itérations	451	95	1772
	Temps CPU	0 h 18 min	0 h 11 min	0 h 18 min
régime dynamique	Nombre d'éléments	1938	3344	
	Nombre de zones	4	14	
	Réchauffage de l'air	oui	non	
	Temps physique simulé	3 h 00 min	1 h 30 min	
	Temps CPU	1 h 21 min	0 h 55 min	

Tableau 1 : Temps CPU nécessaires à la réalisation des exemples de simulation

5. Conclusion

En conclusion, cet article a démontré ici la faisabilité de simulations numériques de procédés thermiques 'hautes températures' en régime dynamique à l'aide d'une approche zonale implanté dans le code de mécanique des fluides ANSYS-CFX[®]. Les procédés thermiques décrits s'apparentent à des fours de type 'batch' ou continus, donc de nature fortement instationnaire, tels que ceux pouvant être rencontrés dans le secteur de la métallurgie. L'avantage principal de cet outil, en plus de sa validité et des temps de calcul faibles, est une utilisation directe de l'interface graphique conviviale de ANSYS-CFX[®]. Néanmoins, l'utilisation de CFD-Zones demande une grande maîtrise des outils et des données d'entrée du modèle.

Au niveau commercial cet outil a un avantage concurrentiel et performantiel pour les offres GDF SUEZ auprès des grands comptes industriels dans le cadre de prestations de service du pôle Industrie et/ou du CRIGEN.

Références

- [1] L. Mora, A.J. Gadgil, E. Wurtz, *Comparing zonal and CFD model predictions of isothermal indoor airflows to experimental data*, Indoor Air 2003 ; **13** : 77-85 (2003)
- [2] R.J. Tucker, A.Z. Chong, J. Ward, N. Fricker, C. K. Tan, L. Porcheron, T. Ferlin, *Zone Modelling of Underport Firing of a Simulated Glass Melting Test Furnace*, International Gas Union Research Conference (IGRC), Paris, France, (2008)
- [3] Y. Kara , F. Aguilé, A. Quinqueneau, A.Touzet, L. Porcheron, *Characterization of burners operating in flameless oxidation mode – Experimental results*, Totem 25 FRIF, (2003)
- [4] P. Boineau, P. Reynes, G. Griffay, *Numerical simulation of a batch metallurgy furnace equipped with flameless oxidation regenerative burners*, Steel Rolling, (2006)
- [5] E. George, *CFD-Zones, un outil d'aide au dimensionnement des installations thermiques*, www.ansys.com, (2009)