

Analyse numérique et optimisation des performances thermo-aérauliques des échangeurs à plaques et ailettes à pas décalés.

Ephraïm TOUBIANA^{1,2}, Serge RUSSEIL^{1*}, Daniel BOUGEARD¹, Nicolas-Yoan FRANÇOIS²

¹ Mines Douai, EI, F-59508 Douai, France

² VALEO Thermal Systems, 8 rue Louis Lormand ZA de l'Agot, La Verrière, 78321 Le Mesnil-Saint-Denis Cedex

* (auteur correspondant : serge.russeil@mines-douai.fr)

Résumé - Les échangeurs de chaleur à plaques et ailettes à pas décalés -Offset Strip Fin (OSF) heat exchangers- sont couramment utilisés dans les installations de cryogénie mais également dans les applications embarquées de l'aéronautique ou l'automobile. L'optimisation de leurs performances, leur masse et leur coût est un enjeu industriel très important dans ces secteurs fortement concurrentiels. Ces gains passent notamment par des modifications géométriques des surfaces d'échange qui sont composées de plusieurs centaines de canaux ailetés. Ces modifications concernent à la fois la géométrie des canaux élémentaires et/ou l'arrangement spatial de ceux-ci au sein de l'échangeur. Nous présentons différentes stratégies d'étude des performances de ces échangeurs comprenant trois modes d'investigation numériques. 1- L'analyse des mécanismes de transfert de chaleur et de dégradation de l'énergie mécanique est effectuée en utilisant des modèles de turbulence de type RANS, soit sur des échangeurs complets constitués de plusieurs dizaines de rangs d'ailettes, soit sur un motif périodique d'ailette. Ce type d'analyse permet de mettre en évidence des structurations des champs thermiques et dynamiques différentes selon la zone considérée dans l'échangeur. L'analyse de la synergie des champs dans un canal aileté périodique permet également d'identifier les zones de forts et faibles transferts liées à la structuration de l'écoulement qui apparaît être fonction de la longueur de l'ailette considérée. 2- Une analyse des phénomènes de transition de la turbulence est ensuite présentée. Des Simulations des Grandes Echelles (LES) sont réalisées sur un motif périodique d'échangeur de manière à prendre en compte plus finement les effets de la turbulence. Nous présentons plusieurs calculs, tels que $300 < Re < 9000$, afin de caractériser les phénomènes de transfert convectif du régime laminaire au régime turbulent. Cette analyse met en évidence des topologies d'écoulement très différentes selon le régime considéré. Une comparaison quantitative et qualitative des résultats obtenus via la LES avec des simulations effectuées avec l'hypothèse d'un régime laminaire et d'autres mettant en œuvre des modèles RANS (k- ϵ Realizable, k- ω SST, Reynolds Stress Model) est également présentée. 3- Enfin, un modèle nodal 1D est utilisé pour prédire avec précision et rapidité les performances d'échangeurs à plaques et ailettes complets. Ce modèle, construit à partir de simulations spécifiquement effectuées, permet de déterminer des lois de comportement dépendant des conditions thermo-aérauliques et des paramètres géométriques des motifs élémentaires. Des optimisations multicritères de géométries d'échangeurs utilisant des algorithmes génétiques sont alors possibles avec des temps de calcul considérablement réduits.

Nomenclature

f	coefficient de frottement	ΔP	perte de charge, Pa
j	coefficient de Colburn	T	température, K
Re	nombre de Reynolds basé sur deux fois l'espacement transversal inter-ailettes	<i>Indices et exposants</i>	
		+	distance adimensionnelle

1. Introduction

Les échangeurs à plaques et ailettes à pas décalés -Offset Strip Fin (OSF) en anglais- sont largement utilisés dans les installations de cryogénie mais également dans les applications embarquées de l'aéronautique ou l'automobile. Les avantages de ce type de géométrie résident dans une très grande compacité et des coefficients d'échange élevés grâce au principe du décalage d'ailettes successives interrompues qui multiplie les bords d'attaque et limite le développement des couches limites sur celles-ci. De nombreuses études ont été effectuées aussi bien expérimentalement que par voie de simulation numérique en utilisant des approches variées [1-2]. Dans cette communication nous présentons différentes stratégies visant à déterminer numériquement les performances thermo-aérauliques de ce type d'échangeurs pour des applications automobiles [3]. Dans un premier temps une analyse numérique par modélisation RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) est proposée. Cette première étude est réalisée à un nombre de Reynolds moyen correspondant à l'application visée, $Re = 3000$. Ensuite différentes modélisations de la turbulence sont mises en œuvre et comparées finement sur une large gamme de Reynolds ($300 \leq Re \leq 9000$). En particulier une étude par simulations des grandes échelles (LES) est effectuée, avec pour objectif d'analyser plus finement l'écoulement, en particulier les phénomènes de transition de la turbulence et leurs influences sur la structuration de l'écoulement et les performances thermiques. Il s'agit également de qualifier les simulations de type RANS et laminaire stationnaires classiquement utilisées pour déterminer les performances de ces échangeurs. Enfin, dans une troisième partie, une modélisation nodale est développée. Permettant une caractérisation globale des performances thermo-aérauliques des géométries d'ailettes OSF, cette approche est utilisée afin de conduire des optimisations avec des temps de calcul considérablement réduits.

2. Analyse numérique par modélisation RANS

2.1. Géométrie, conditions aux limites et modèle numérique

La géométrie de l'échangeur considéré dans cette étude est composée d'ailettes à pas décalés (OSF) bidimensionnelles. Deux types de domaines de calculs sont utilisés. Le premier type, présenté sur la figure 1, correspond à un profil d'échangeur complet. Il permet de prendre en compte et analyser les effets d'entrée-sortie présents au niveau des premières ailettes à l'entrée de l'échangeur et des dernières ailettes en sortie de l'échangeur. Un second domaine de calcul, présenté sur la figure 2, comporte uniquement deux ailettes successives correspondant au motif élémentaire de base du profil complet et présente une périodicité dans le sens de l'écoulement. Ce domaine de calcul permet d'analyser l'écoulement périodique établi au cœur de l'échangeur à travers les ailettes « internes ». Les effets d'entrée-sortie ne sont pas pris en compte dans cette configuration. Cette approche, qui permet de réduire significativement la taille du domaine, et donc le nombre de mailles et le temps CPU, est d'autant plus appropriée que l'échangeur possède un nombre important d'ailettes. Des études paramétriques se trouvent alors largement facilitées. Les simulations réalisées avec l'approche RANS, en régime stationnaire, utilisent le modèle de turbulence $k-\epsilon$ Realizable. La résolution des équations phénoménologiques est réalisée à l'aide du code volumes finis *StarCCM+ 8.06* [4] pour un nombre de Reynolds donné et une température de paroi T_{wall}

uniforme. Une attention particulière est portée au maillage afin de déterminer les paramètres permettant d'obtenir une indépendance des résultats. En zone pariétale, l'approche choisie est telle que le raffinement imposé ($y^+ < 1$) ne nécessite pas de loi de paroi de raccordement, voir [3], pour une meilleure précision. Concernant la convergence des calculs, la décroissance de tous les résidus d'au moins quatre ordres de grandeurs, puis de leur stabilisation, est systématiquement vérifiée. De plus, un critère d'arrêt basé sur le bilan thermique fluide/ailette (écart maximum sur l'échange thermique inférieur à 1%) est imposé.

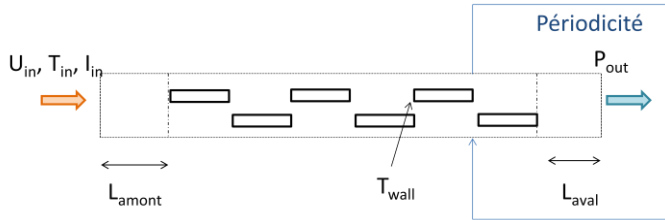


Figure 1 : Profil complet d'échangeur OSF

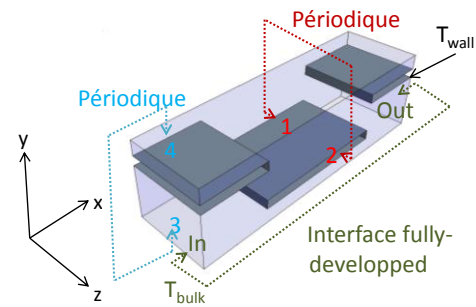


Figure 2 : Ailettes internes

2.2. Exemple de résultats

Plusieurs simulations ont été réalisées, permettant une analyse au niveau local, i.e. à l'échelle de l'ailette : phénomènes de séparation/recollement, distributions pariétales du frottement et de l'échange thermique, etc... ainsi qu'au niveau global i.e. à l'échelle du profil complet : performances thermo-aérauliques de l'échangeur. L'influence de différents facteurs (géométriques ou thermo-physiques) sur des grandeurs adimensionnelles telles que nombre de Nusselt et coefficient de perte de charge a également été analysée, voir [3]. A titre indicatif, une étude a permis de déterminer la nature des effets d'entrée-sortie et leur longueur d'influence. Les résultats, non détaillés ici, ont montré que les effets d'entrée-sortie ont une influence qui se fait ressentir sur une longueur donnée, quelle que soit la longueur des ailettes individuelles composant un profil d'échangeur de longueur donnée. A titre d'illustration, la distribution de l'angle de synergie est présentée sur la figure 3. Rappelons que l'angle de synergie permet d'identifier l'alignement relatif des vecteurs vitesse et flux thermique, et donc la structuration thermo-convective de l'écoulement [3]. La figure 3 révèle ainsi l'aspect auto-similaire de l'écoulement dans la zone où l'écoulement est établi, ce qui confirme la possibilité d'étudier les caractéristiques thermo-aérauliques des ailettes internes sur un motif élémentaire de base présentant une périodicité dans le sens de l'écoulement.

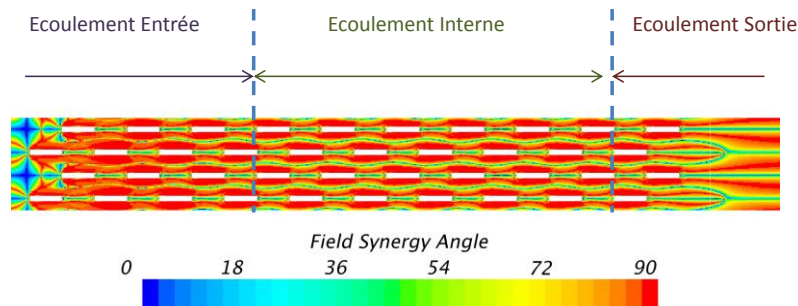


Figure 3 : Exemple de distribution de l'angle de synergie pour un profil complet (écoulement de gauche à droite)

Le second objectif de ces simulations RANS sur profils complets et motifs de base est aussi de fournir les informations nécessaires à la mise au point d'un modèle nodal réduit

(cf. §4) permettant d'estimer les performances thermo-aérauliques d'ailettes OSF de façon bien plus rapide que la CFD classique, à des fins d'optimisation et de pré-dimensionnement.

3. Simulations des grandes échelles (LES)

Une problématique scientifique et industrielle d'importance concerne la simulation numérique de ce type de géométries d'ailettes. En effet les phénomènes aérauliques sont complexes : détachements tourbillonnaires au niveau du bord de fuite des ailettes, phénomènes de transition vers des écoulements turbulents. Si les simulations RANS stationnaires sont le type de simulation le plus communément utilisé, des études expérimentales ou des simulations DNS bidimensionnelles montrent cependant que, sur la gamme de fonctionnement considérée, les écoulements peuvent prendre un caractère instationnaire [5], voire tridimensionnel [2]. Le double objectif des simulations numériques LES, réalisées à différents nombres de Reynolds ($300 \leq Re \leq 9000$), est de mieux comprendre les phénomènes de transition vers la turbulence et de qualifier la prédiction des performances thermo-aérauliques de différents modèles RANS.

3.1. Géométrie, conditions aux limites, maillage et validation

Le solveur LES a tout d'abord été validé avec des simulations DNS d'un écoulement turbulent établi en canal plan [6]. Les différentes comparaisons effectuées (profil de vitesse moyen, production d'énergie cinétique turbulente, composantes du tenseur de Reynolds) ont montré une parfaite adéquation entre nos résultats de calculs LES et les données DNS publiées.

Le domaine de calcul utilisé et les conditions aux limites sont tels que présenté sur la figure 2. Pour une simulation précise des structures turbulentes, il est nécessaire de s'assurer que la largeur du domaine choisie (dans la direction transversale z) est suffisamment importante pour tenir compte des effets tridimensionnels des structures tourbillonnaires turbulentes sans que la périodicité latérale utilisée (faces 1-2 sur la figure 2) ait une influence sur les résultats. A cette fin, une validation a posteriori a été réalisée par analyse des corrélations spatiales doubles des fluctuations des composantes de la vitesse sur différentes sondes ayant uniquement une différence de la valeur de la coordonnée z , cf. [3].

En ce qui concerne la discrétisation spatiale, un maillage hexaédrique a été utilisé avec les dimensions de mailles (en unités pariétales) suivantes : en proche paroi $y^+ < 1$ avec une valeur moyenne inférieure à 0,3 ; au cœur de l'écoulement les mailles sont cubiques avec $\Delta x^+ = \Delta y^+ = \Delta z^+ < 15$ pour $Re = 9000$ (cas le plus défavorable). A noter que ces valeurs sont plus faibles que celles recommandées par Piomelli et al. [7]. D'autre part, nous avons, pour $Re > 3000$, effectué un contrôle a posteriori afin de s'assurer que la zone inertielle est correctement résolue. De plus pour déterminer la qualité du maillage, nous avons comparé également le volume de chacune des mailles (V) avec l'échelle de Kolmogorov $\eta = \left(\frac{\nu^3}{\epsilon}\right)^{1/4}$. Ainsi, en utilisant la valeur de la dissipation de l'énergie turbulente résolue, nous avons montré que le rapport $V^{1/3}/\eta$ était inférieur à 9 sur tout le domaine ce qui permet d'assurer la bonne précision de la résolution des quantités turbulentes.

3.2. Exemples de résultats

Les simulations LES permettent une description fine des structures turbulentes dans l'écoulement. A titre d'illustration la figure 4 présente des exemples de structuration de l'écoulement turbulent instantané à l'aide d'iso-surfaces de critère λ_2 . Des spectres de puissance de la composante x de la vitesse, non représentés ici, permettent par ailleurs de

distinguer les fréquences caractéristiques de l'écoulement. In fine quatre types de régime d'écoulement sont mis en évidence selon la valeur du nombre de Reynolds :

Écoulement laminaire : pour la plus faible valeur du nombre de Reynolds $Re=300$, l'écoulement est parfaitement laminaire et stationnaire.

Écoulement périodique : les simulations à $Re=600$ et 1200 , montrent que l'écoulement est instationnaire périodique. Il ne possède pas un caractère turbulent mais une fréquence caractéristique se distingue sur les spectres de puissance. Le nombre de Strouhal correspondant est de $St=0,13$ (valeur classiquement retrouvée dans la littérature). Cette fréquence caractéristique correspond à un détachement tourbillonnaire alterné qui se développe au niveau du bord de fuite des ailettes. La figure 4, présentant une visualisation de l'écoulement instantané, montre que ces structures sont bidimensionnelles.

Écoulement transitionnel : à partir d'un Reynolds compris entre 2000 et 3000 le régime devient transitionnel : le caractère laminaire ou instationnaire périodique n'est plus apparent mais le caractère de l'écoulement n'est pas encore totalement turbulent. Les spectres de puissance laissent apparaître plusieurs pics, mais subsiste la même fréquence dominante correspondant à $St=0,13$. Le phénomène de détachement tourbillonnaire persiste donc, mais avec une différence notable : à $Re=2000$ les structures ne sont plus totalement bidimensionnelles et une ondulation transverse (direction z) apparaît. Pour $Re=3000$ les structures deviennent clairement tridimensionnelles, voir la figure 4.

Écoulement turbulent : pour $Re=6000$ et 9000 l'écoulement est turbulent. Les spectres de puissance ne laissent pas apparaître de fréquence dominante. Pour $Re=9000$ des structures pariétales longitudinales (streaks) et des structures caractéristiques en épingles à cheveux (hairpin-shaped vortices) sont mises en évidence, voir figure 4.

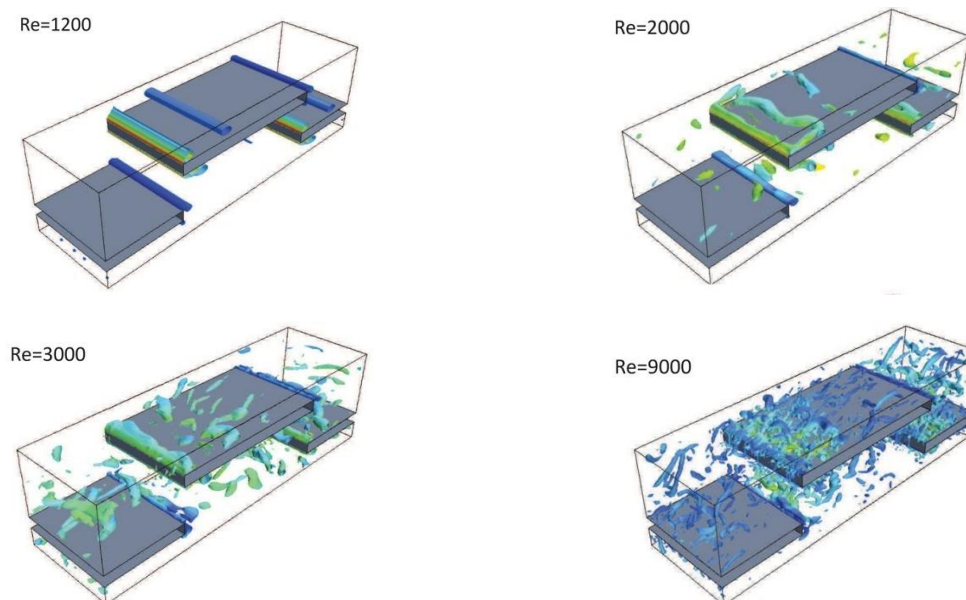


Figure 4 : Visualisations de l'écoulement instantané à l'aide d'iso-surfaces du critère λ_2

Trois stratégies de modélisation de l'écoulement ont été utilisées pour étudier l'évolution des caractéristiques de l'écoulement et des échanges thermiques : l'approche RANS stationnaire, laminaire stationnaire et l'approche LES. Dans le cadre de la modélisation RANS, les modèles $k-\epsilon$ Realizable, $k-\omega$ SST et RSM ont été utilisés. Considérant les simulations LES comme la référence, une étude comparative des différents résultats a été menée afin de renseigner sur la précision des modèles RANS et laminaire stationnaires. La

figure 5 reporte le coefficient de frottement f , pour l'ensemble des résultats, en fonction du nombre de Reynolds. On note que les écarts entre les solutions obtenues sont particulièrement importants dans les régimes d'écoulement de transition : ainsi l'amplitude des écarts entre modèles atteint la valeur maximale de 44% pour $Re=3000$. Pour le coefficient de Colburn j (non présenté ici) une dispersion similaire des valeurs est notée dans le régime transitionnel. Il est important ici de mentionner que nos résultats indiquent qu'il n'y a pas de modèle « universellement meilleur » car aucun ne fournit de bons résultats à la fois pour f et j , et de plus le degré de précision de chacun diffère selon le nombre de Reynolds considéré. Nos résultats mettent ainsi en évidence la difficulté de choix d'un modèle de turbulence adapté au régime et aux conditions d'écoulement qui pourtant est primordiale pour garantir une prédiction acceptable des performances de telles géométries.

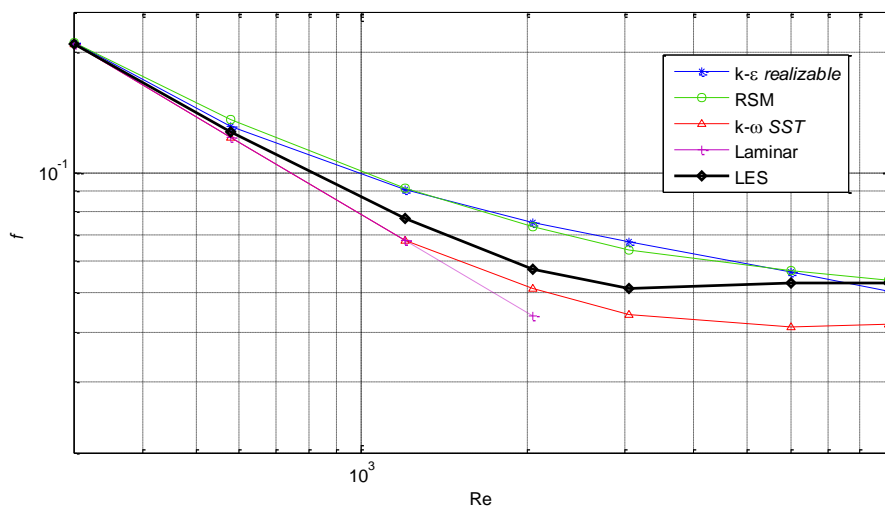


Figure 5 : Evolution du coefficient f en fonction du nombre de Reynolds

4. Optimisation d'ailettes OSF par utilisation d'un modèle nodal

Un modèle réduit 1D appelé "modèle nodal" et basé sur des corrélations, elles-mêmes établies à l'aide de simulations numériques, a été développé pour estimer les performances thermo-aérauliques de profils d'ailettes OSF [8]. Comme vu précédemment, ce type de géométrie peut être décomposé en un motif de base qui se répète longitudinalement de façon périodique. Le modèle nodal est ainsi constitué d'un ensemble de nœuds successifs représentant chaque répétition du motif dans le sens de l'écoulement, cf. la figure 6. Le principe consiste à calculer les performances thermo-aérauliques au niveau de chacun de ces nœuds de façon itérative, pour in fine déterminer les performances globales du profil.

Dans notre étude, ce modèle nodal est employé comme modèle de substitution à la CFD dans le cadre de la mise en place de boucles d'optimisation de forme de géométries d'échangeurs thermiques [3]. En amont de ce processus d'optimisation des simulations numériques classiques, telles celles présentées au §2, sont utilisées pour établir les corrélations nécessaires au modèle nodal (nombre de Nusselt pour les échanges thermiques et coefficient de perte de charge adimensionnel pour les pertes visqueuses) en fonction des paramètres géométriques notamment. Une fois que le modèle nodal est mis au point la phase d'optimisation utilisant le modèle nodal est un processus qui devient très rapide permettant d'effectuer des plans d'optimisation complexes sur de larges espaces de design à l'aide d'algorithmes génétiques par exemple [3].

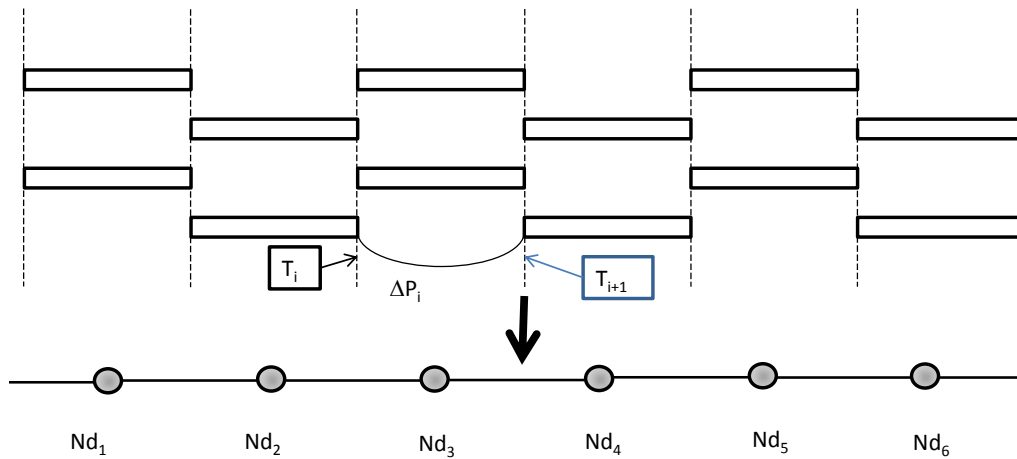


Figure 6 : Profil 2D d'ailette OSF et représentation schématique du modèle nodal: chaque nœud représente l'écoulement à travers un motif de base constitué par une ailette (ici six au total)

A titre indicatif, plusieurs dizaines de profils peuvent être estimés par seconde grâce à l'approche utilisant ce modèle nodal, tandis qu'une seule simulation numérique avec un code CFD classique exige l'équivalent de plusieurs heures. Notons que dans une démarche plus générale, et afin d'augmenter la précision de l'optimisation, il est également possible de lancer une série limitée de calculs CFD en aval de cette première boucle d'optimisation utilisant un modèle de substitution, autour de l'ensemble de profils optimaux trouvés par le modèle nodal. Pour illustrer les possibilités d'optimisation que permet le modèle nodal, des résultats sont présentés figure 7 pour environ 5000 géométries différentes, évaluées quant à leurs performances thermo-aérauliques. Il est intéressant de noter que seules quelques minutes ont été nécessaires pour évaluer ces 5000 géométries, sachant que l'évaluation d'une seule géométrie par CFD classique aurait nécessité plusieurs heures, à puissance de calcul similaire. Ainsi, l'utilisation du modèle nodal entraîne un gain de temps d'un rapport de l'ordre de 10^4 .

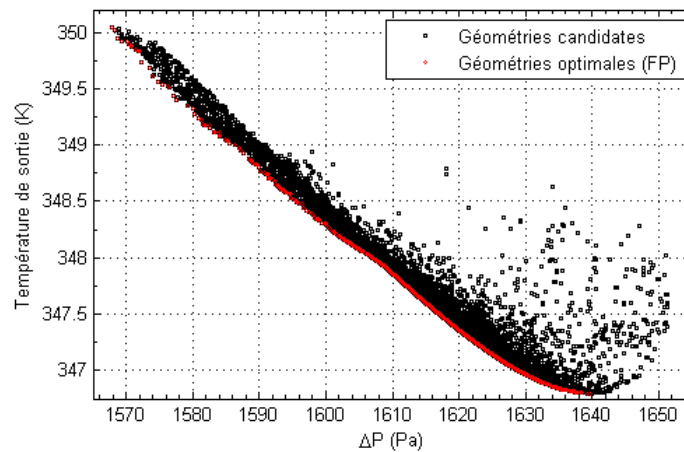


Figure 7 : Optimisation via le modèle nodal : ensemble des individus et front de Pareto (FP)

5. Conclusion

Différentes stratégies pour l'analyse numérique et l'optimisation des performances thermo-aérauliques d'échangeurs à plaques et ailettes à pas décalés sont discutées dans cette étude. Dans un premier paragraphe, l'approche classique de modélisation RANS de la turbulence pour l'analyse des mécanismes de transfert thermique et de pertes visqueuses est abordée. Les simulations effectuées sur des profils d'échangeurs complets permettent d'analyser

l'influence des effets d'entrée-sortie de l'échangeur et de montrer l'autosimilarité de l'écoulement dans une zone interne de l'échangeur. Des informations sont ainsi recueillies pour le développement ultérieur d'un modèle réduit. Dans un second temps des résultats de simulations LES réalisées sur un motif de base du profil (ailettes internes) sont présentés. Les phénomènes de transition vers la turbulence et leurs influences sur la structuration de l'écoulement et sur les performances de l'échangeur sont analysés. S'ensuit une comparaison à la fois quantitative et qualitative des résultats LES avec les simulations stationnaires laminaire et celles utilisant une approche RANS stationnaire. Une grande dispersion des performances est notée dans le régime transitionnel. Ainsi est mis en évidence que le choix du modèle de turbulence adapté au régime et aux conditions d'écoulement, pourtant primordial, reste délicat. Enfin un modèle nodal 1D permettant d'estimer les performances thermo-aérodynamiques des échangeurs est développé. Ce modèle se base sur des corrélations (Nu , ΔP) établies via des simulations numériques CFD classiques. Les résultats montrent l'intérêt de cette approche qui, dans un cadre plus général, autorise la réalisation de boucles d'optimisation complexes multi-objectifs et multicritères qui ne pourraient être réalisées sans ce modèle de substitution [3]. Parmi les nombreux développements envisageables figure la nécessité d'améliorer la prédiction des performances dans le régime transitionnel via l'utilisation de modèles RANS de transition, sans avoir recours aux simulations LES qui restent encore relativement coûteuses.

Références

- [1] N.C. DeJong, L.W. Zhang, Complementary experimental and numerical study of the flow and heat transfer in offset strip-fin heat exchangers, *J. Heat Transfer, Trans. ASME* 120 (3) (1998) 690–698.
- [2] M.V. Pham, F. Plourde, S.K. Doan (2008). Large-Eddy Simulations of Staggered Parallel-Plate Fin Heat Exchangers: Effect of Reynolds Number on Flow Topology. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 53(4), 354-376.
- [3] Ephraïm Toubiana. Modélisation et analyse des transferts dans les échangeurs à plaques et ailettes à pas décalés : intensification par optimisation géométrique et génération de vorticités. Thèse de doctorat. Ecole des Mines de Douai – Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (2015)
- [4] CD-adapco 2013. STAR-CCM+ Version 8.06 User Guide
- [5] P. Marty, F. Michel, P. Tochon, Experimental and numerical study of the heat transfer along a blunt flat plate, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51 (1) (2008) 13–23.
- [6] R. D. Moser, J. Kim, N. N. Mansour, Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to $Re = 590$, *Physics of Fluids* 11 (4) (1999) 943–945.
- [7] U. Piomelli, E. Balaras, Wall-layer models for Large-731 Eddy Simulations, *Annual Review of Fluid Mechanics* 34 (1) (2002) 349–374.
- [8] E. Toubiana, D. Bougeard, S. Russeil, N. Francois, A nodal model for shape optimization offset strip fin heat exchanger, in: *10th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (HEFAT2014)*, Orlando, USA, 2014.

Remerciements

La recherche présentée dans cette communication a été financièrement soutenue par Valéo Systèmes Thermiques et l'ANRT (thèse CIFRE N°2011/1232).