

# Application des plans d'expérience pour l'étude des transferts thermiques par impact de jet unique à travers une paroi mince.

Daniel THIBAUT, Matthieu FÉNOT, Gildas LALIZEL, Eva DORIGNAC

LET UMR CNRS n° 6608  
ENSMA BP 40109  
86961 Futuroscope Chasseneuil Cedex

**Résumé** – L'étude du refroidissement par impact de jet nécessite de prendre en compte l'influence de nombreux paramètres géométriques et aérodynamiques. Le nombre d'expériences pour ce type d'étude devient trop rapidement conséquent. L'utilisation d'un plan d'expériences basé sur la méthodologie de Fisher-Taguchi va nous permettre de réduire ce nombre d'expériences en nous garantissant une fiabilité des résultats suffisamment satisfaisante.

## Nomenclature

$H$	hauteur d'impact, $m$	$\rho$	masse volumique, $kg.m^{-3}$
$Dh$	diamètre hydraulique de l'injection, $m$	$\mu$	viscosité dynamique, $kg.m^{-1}.s^{-1}$
$r$	distance radiale, $m$	$\varepsilon$	émissivité
$e$	épaisseur de la plaque, $m$	$\varphi$	densité de flux, $W.m^{-2}$
$I$	intensité turbulente	$\sigma$	constante de Boltzmann $=5,67.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$
$V$	vitesse, $m.s^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	
$Re$	nombre de Reynolds ( $= \rho_{air}.V.Dh/\mu_{air}$ )	$p$	paroi
$T$	Température, $K$	$amb$	ambiante
$h$	coefficient d'échange convectif, $W.m^{-2}.K^{-1}$	$rad$	radiatif
$Nu$	nombre de Nusselt ( $= h.Dh / \lambda_{air}$ )	$conv$	convectif
<i>Symboles grecs</i>		$av$	avant
$\lambda$	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$	$arr$	arrière

## 1. Introduction

Le refroidissement par impact de jet trouve de nombreuses applications industrielles dont le refroidissement des aubes de turbines. Ces éléments sont en effet soumis à des contraintes thermiques extrêmement importantes (environ 1200K) et leur constitution ne leur permet pas de dépasser un certain seuil de température. Il faut alors améliorer leur refroidissement qui a une influence directe sur la durée de vie des aubes et les performances moteurs. Le cas du jet unique axisymétrique sur plaque plane a souvent été étudié ainsi que celui du jet plan (cas bidimensionnel). Nous nous proposons ici de décrire une étude sur la recherche des paramètres influents dans une configuration plus proche du cas industriel qui comprend l'impact d'un jet unique à travers une paroi mince, en présence d'écoulements cisailant en amont et en aval de l'injection, sur une plaque plane.

L'aérodynamique de l'écoulement d'un jet en impact sur une paroi peut se diviser en trois zones : la zone de jet libre, la région d'impact, et la zone d'écoulement pariétal. La zone de jet libre peut également se diviser en trois zones selon la distance d'impact : le cœur potentiel, où la vitesse est maintenue constante au centre du jet pendant que la couche de mélange se développe ; la zone de transition où la couche de mélange vient perturber le centre du jet ; et la zone pleinement développée où les champs de vitesse adoptent des comportements auto

similaires. Il apparaît que le refroidissement est optimal pour des distances d'impact qui correspondent aux alentours de la longueur du cœur potentiel dans le cas du jet unique issu d'un tube d'injection [1]. La région d'impact se caractérise essentiellement par une baisse de la vitesse axiale tandis que la vitesse radiale augmente. La zone d'écoulement pariétal voit apparaître des gradients de pression défavorables à l'écoulement et la vitesse radiale diminue.

Plusieurs études expérimentales ont caractérisé les aspects thermiques et/ou fluidiques en faisant varier divers paramètres. Gardon et Akfirat [2] ont corrélié l'influence de l'intensité turbulente longitudinale du jet libre sur les échanges de chaleur pour l'impact d'un jet issu d'une fente. Yokobori et al. [3,4] se sont intéressés à l'étude des grandeurs turbulentes dans la région d'impact pour des jets axisymétriques et bidimensionnels. Ils confirment, pour les jets dont l'impact a lieu dans la zone de transition, l'existence de tourbillons contrarotatifs cohérents de grande échelle dans le sens de l'écoulement, et discutent de leur relation avec les tourbillons présents dans la couche limite de la région d'impact. Ils en concluent que ces structures cohérentes ont des effets prédominants dans les échanges convectifs dans la région d'impact. Plus récemment, les résultats de Pavageau et al. [5] pour un jet bidimensionnel, tendent à démontrer au contraire, que les structures apparaissant dans la région d'impact ne trouvent pas leur origine dans la couche de mélange. Elles sont cependant très influencées par le nombre de Reynolds et par la vitesse d'injection.

De nombreuses études ont montré une tendance non monotone de la répartition locale des échanges convectifs, dans le cas des jets plans comme de jets axisymétriques, pour des distances d'impact très inférieures à celle du cœur potentiel du jet libre ( $H/Dh \leq 2,5$ ). Pour des jets axisymétriques, et des distances d'impact très faibles, Hoogendoorn [6] et Lytle et Webb [7], ont montré la présence de 2 pics dans la distribution locale du coefficient d'échange de chaleur. Le premier pic se situe à une distance radiale depuis le point d'impact de  $r/Dh = 0,5$ , et est attribué à l'accélération de la couche limite sur la paroi. Ce premier pic est suivi d'un minimum local situé aux alentours de  $r/Dh = 1,2$ . Hoogendoorn, dans l'optique d'expliquer ce minimum, a montré que la distribution radiale de l'intensité turbulente atteint un minimum, situé à l'emplacement du maximum de vitesse radiale. A cette position, il remarque que le nombre de Nusselt atteint aussi une valeur minimale, pour des distances d'impact de 2, 4 et 5,9 diamètres hydrauliques. Ce minimum local du nombre de Nusselt est attribué à une transition turbulente de l'écoulement de couche limite. L'existence du second maximum paraît dépendre de la géométrie de l'injecteur et de la turbulence qui y est associée. L'influence de la géométrie de l'injecteur est donc également le sujet de nombreuses études ainsi que d'autres paramètres ; les effets dus à l'angle d'incidence de la surface d'impact, la courbure de cette surface, la rotation axiale du fluide dans l'écoulement du jet, ou encore l'influence de la rugosité ont été étudiés. Ces dispositifs expérimentaux restent encore très simplifiés et ne permettent pas de déterminer des modèles prenant en compte tous ces paramètres.

Pour une configuration plus proche du cas industriel, telle que la nôtre, la prise en compte de plusieurs facteurs devient nécessaire. Il convient donc de se munir de méthodes nous permettant une analyse multifactorielle rigoureuse que va nous fournir la méthodologie Fisher-Taguchi. Sa principale utilité est de permettre la réduction du nombre d'expériences d'une campagne d'essai et d'en tirer certaines conclusions quant à l'influence de chaque facteur. Nous allons pouvoir ainsi étudier les transferts thermiques liés à l'impact de jet à travers une paroi mince en présence d'écoulement cisailant amont et aval. La première étape de cette démarche est de cibler les paramètres à prendre en compte à l'aide de la littérature existante. Nous nous concentrons donc pour notre étude sur l'influence des nombres de Reynolds des différents écoulements, la hauteur d'impact du jet et la géométrie de l'injection.

Nous nous aidons ensuite de la méthodologie des plans d'expérience pour minimiser le nombre d'essais à faire et conserver par la suite les paramètres les plus influents. C'est ce dernier point essentiel à notre étude que nous souhaitons présenter ici.

## 2. Dispositif expérimental et plan d'expériences

L'objectif de cette expérience est d'étudier l'influence de divers paramètres géométriques et aérodynamiques dans un cas proche de la configuration industrielle intrados/extrados d'une aube. Un écoulement existe dans un canal principal appelé chemise de dimension 12x60mm. Un trou de diamètre 10mm dans une de ses parois va jouer le rôle d'injection du jet qui débouchera dans le canal dit entrefer. Le jet frappe la face avant d'une plaque chauffante qui dissipe par effet Joule une densité de flux de chaleur homogène. La présence d'un écoulement (de quantité de mouvement plus faible que celle du jet) dans l'entrefer simule l'évacuation de l'air du bord d'attaque au bord de fuite dans le cas réel d'une aube. La hauteur de cet entrefer, qui est aussi la distance d'impact depuis la sortie de l'injection, prend les cinq valeurs rapportées au diamètre de l'injection de 2, 4, 6, 8 et 10. Le nombre de Reynolds dans l'entrefer prend les deux valeurs de 0 (pas d'évacuation) et 1000, le nombre de Reynolds dans la chemise varie de 20000 à 60000 et le nombre de Reynolds de l'injection évolue entre 5000 et 23000. La plaque qui comprend le trou d'injection a les trois épaisseurs rapportées au diamètre de l'injection de 0,8, 1 et 1,2. Des mesures par thermographie infrarouge sur la face opposée à l'impact du jet (face arrière) permettent de revenir aux températures sur la face avant. La plaque chauffante est peinte en noir de manière à connaître son coefficient d'émissivité ( $\epsilon=0,95\pm 0,02$ ). Le coefficient d'échange convectif en face avant peut être déterminé afin de caractériser les échanges thermiques induits par l'impact de jet [8].

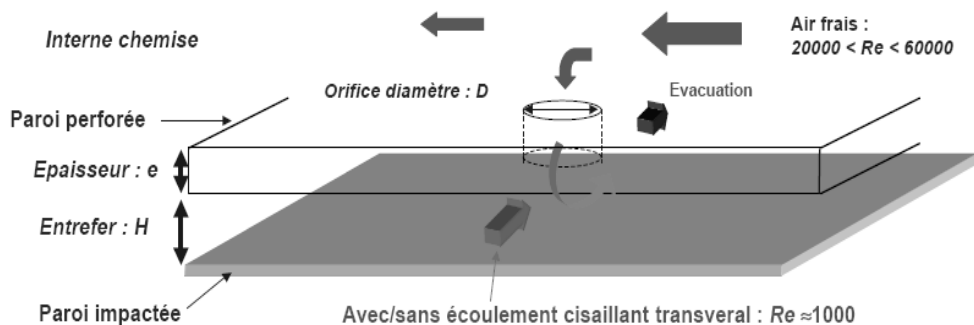


Figure 1 : Schéma de l'expérience

La terminologie des plans d'expériences utilise les termes de facteur pour désigner les paramètres de l'étude, et de niveau pour désigner les valeurs que prennent ces paramètres. En étudiant trois niveaux possibles pour les facteurs nombre de Reynolds dans la chemise et dans l'injection pour prendre en compte une influence potentiellement non linéaire, le plan d'expérience complet nécessite  $5 \times 3 \times 3 \times 3 \times 2 = 270$  expériences à réaliser. Le protocole de mesure et les méthodes d'analyse qui y sont liés induisent un temps d'expérimentation extrêmement long. Afin de réduire ce nombre d'expériences, nous faisons appel à la méthodologie Fisher-Taguchi qui propose des fractionnements qui sont des réductions du plan complet en s'appuyant sur des tables. Ces tables correspondent aux combinaisons de facteurs où les fractionnements se révèlent extrêmement performants. L'expérimentateur va donc naturellement essayer de se rapprocher de ces combinaisons de facteurs. Une des tables qui va attirer notre attention est la table  $L_{27}(3)^{13}$  (Tab. 1) qui va nous permettre d'extraire un plan d'expérience de 5 facteurs à 3 niveaux chacun. Les fractionnements restent possibles dans la mesure où la propriété d'orthogonalité du plan est respectée. Cette propriété traduit le fait de

représenter chaque niveau de chaque facteur de manière équivalente parmi chaque niveau de chaque autre facteur. Les tables sur lesquelles s'appuie l'expérimentateur offrent des solutions de fractionnement respectant l'orthogonalité du plan d'expérience. Elles représentent les niveaux que doivent prendre chaque facteur pour une expérience donnée. Par exemple, dans la table de Taguchi  $L_{27}(3)^{13}$ , l'expérience 1 correspond au cas où tous les facteurs sont au niveau 1. Regardons maintenant le nombre de fois où le niveau 1 du facteur 1 est représenté dans chaque niveau du facteur 2. Ce nombre est égal à 3 et correspond au nombre de fois où les niveaux 2 et 3 du facteur 1 sont représentés dans chaque niveau du facteur 2. En examinant les autres combinaisons entre facteurs, on s'aperçoit que la propriété d'orthogonalité est vérifiée. Cette propriété permet de fractionner les plans complets mais limite le fractionnement. Ainsi, le plan complet initial ne peut être réduit qu'à un nombre d'expériences de 90 si l'on veut respecter ce principe. En modifiant le nombre de niveaux pris par les différents facteurs, il est possible d'obtenir de meilleurs fractionnements. En augmentant le nombre de distances d'impact de 5 à 6, et le nombre de valeurs des nombres de Reynolds dans l'entrefer de 2 à 3, on arrive à un plan complet de  $6 \times 3 \times 3 \times 3 \times 3 = 486$  expériences. Ce plan complet est certes plus grand que le plan complet initial mais une réduction plus efficace va pouvoir être opérée à l'aide de la table de Taguchi  $L_{27}(3)^{13}$  qui permet de réduire un plan de 13 facteurs à 3 niveaux chacun en 27 expériences.

<i>Expérience # \ facteur</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

Tableau 1 : Table  $L_{27}(3)^{13}$

Le raisonnement consiste à considérer deux plans de 5 facteurs à 3 niveaux chacun au lieu d'un plan à 1 facteur à 6 niveaux et 4 facteurs à 3 niveaux. Le nombre d'expériences devient alors  $2 \times 27 = 54$  ce qui offre un meilleur fractionnement que celui du plan initial (90 expériences). Ce type de plan va nous permettre d'insérer dans le cahier des charges une nouvelle hauteur d'impact telle que  $H/Dh = 5$  et un nombre de Reynolds intermédiaire dans l'entrefer. La distance d'impact supplémentaire a été choisie de manière à augmenter le

nombre de points de mesure autour de la hauteur du corps potentiel issu d'un jet axisymétrique en présence de confinement. L'influence de 5 paramètres principaux va donc pouvoir être étudiée. Les valeurs de ces paramètres sont 2, 4, 5, 6, 8 et 10 pour H/Dh, 0, 500 et 1000 pour le nombre de Reynolds dans l'entrefer, 20000, 40000 et 60000 pour le nombre de Reynolds dans la chemise, 5000, 15000 et 23000 pour le nombre de Reynolds de l'injection, et 0,8 ,1 et 1,2 pour e/Dh. De plus, ce plan fractionnaire donne également accès à l'influence de certaines interactions d'ordre deux entre les facteurs principaux. On dit qu'il y a interaction lorsque l'effet d'un facteur dépend du niveau de l'autre facteur.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
(1)	3	2	2	6	5	5	9	8	8	12	11	11	
	4	4	3	7	7	6	10	10	9	13	13	12	
(2)	1	1	8	9	10	5	6	7	5	6	7		
	4	3	11	12	13	11	12	13	8	9	10		
(3)	1	9	10	8	7	5	6	6	6	7	5		
	2	13	11	12	12	13	11	10	8	9			
	(4)	10	8	9	6	7	5	7	5	6			
		12	13	11	14	11	12	9	10	8			
	(5)	1	1	2	3	4	2	4	3				
		7	6	11	13	12	8	10	9				
	(6)	1	4	2	3	3	2	4					
		5	13	12	11	10	9	8					
	(7)	3	4	2	4	3	2						
		12	11	13	9	8	10						
	(8)	1	1	2	3	4							
		10	9	5	7	6							
	(9)	1	4	2	3								
		8	7	6	5								
	(10)	3	4	2									
		6	7	7									
	(11)	1	1										
		13	12										
	(12)	1											
		11											

Tableau 2 : Tableau des interactions de la table  $L_{27}(3)^{13}$

Pour la détermination de ces interactions, nous devons nous aider de la table des interactions associée à la table  $L_{27}(3)^{13}$  (Tab. 2). Elle indique quelles sont les colonnes à éliminer dans la table  $L_{27}(3)^{13}$  pour prendre en compte une interaction choisie. Par exemple, si l'on souhaite avoir l'interaction entre deux paramètres représentés par les colonnes 4 et 9 de la table  $L_{27}(3)^{13}$ , alors le tableau des interactions de cette table (Tab. 2) nous informe que l'on ne peut pas conserver les colonnes 7 et 11 de la table  $L_{27}(3)^{13}$ . En procédant ainsi pour les cinq facteurs de notre étude, on aboutit à un plan d'expérience formé des colonnes 1, 2, 5, 9 et 10 de la table  $L_{27}(3)^{13}$ , qui représentent respectivement les paramètres H/Dh, le nombre de Reynolds dans la chemise, e/Dh, le nombre de Reynolds dans l'entrefer et le nombre de Reynolds dans l'injection. Les cinq interactions que nous permet d'étudier notre plan d'expérience sont celles entre H/Dh et le nombre de Reynolds dans la chemise, H/Dh et e/Dh, H/Dh et le nombre de Reynolds dans l'entrefer, H/Dh et le nombre de Reynolds dans l'injection, et enfin, e/Dh et le nombre de Reynolds dans l'injection. Nous avons orienté notre choix des interactions à retenir en fonction des phénomènes physiques caractérisant le problème. Il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance du sujet d'étude pour pouvoir décider au mieux du plan d'expérience à réaliser. Nous avons décidé de considérer les interactions avec la distance d'impact H/Dh car il apparaît être un facteur prépondérant mis en

relief dans la littérature. L'interaction entre l'épaisseur de la plaque et le nombre de Reynolds dans l'injection va mettre en avant l'influence de la géométrie de l'injecteur.

### 3. Conclusions

Les cas académiques simples largement décrits par la bibliographie, fournissent une connaissance approfondie pour les cas d'études complexes et sont nécessaires à la mise en place des plans d'expérience. La connaissance des paramètres influents et de leurs caractéristiques permet de cibler au mieux les choix stratégiques propres aux plans d'expérience, notamment en ce qui concerne la prise en compte des interactions entre facteurs. Cette méthodologie pourrait apporter une base de réflexion pour une approche par les réseaux de neurones. La campagne d'essai que nous avons débutée se compose de 54 points d'expérience comprenant un facteur à 6 niveaux et 4 facteurs à 3 niveaux chacun. Ce plan nous permet également de prendre en compte l'influence de 5 interactions d'ordre deux entre les facteurs principaux. Cette étude consistait initialement en 270 points d'expérience ce qui souligne l'importance des méthodes des plans d'expérience pour mener à bien ce genre d'étude. En effet, la mise en place d'études multifactorielles devient de plus en plus nécessaire lorsque l'on désire s'approcher des configurations industrielles. Cette approche va nous permettre de nous intéresser aux paramètres les plus influents et de déterminer des lois phénoménologiques simples. Des mesures thermiques et aérodynamiques par vélocimétrie par images de particules viendront compléter notre étude pour les cas les plus pertinents.

### Références

- [1] R. Viskanta, Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets, *Exp. Thermal and Fluid Sciences* 6 (1993), 111-134
- [2] R. Gardon, J.C Akfirat, The role of turbulence in determining the heat transfer characteristics of impinging jets, *Int. J. Heat Mass Transfer* 8 (1965) 101-108.
- [3] S. Yokobori, N. Kasagi, M. Hirata, N. Nishiwaki, Role of large-scale eddy structure on enhancement of heat transfer in stagnation region of two-dimensional, submerged, impinging jet, *Proceedings of the 6th International Heat Transfer Conference* (Toronto, Canada, 1978), 305-310.
- [4] S. Yokobori, N. Kasagi, M. Hirata, M. Nakamura, Y. Haramura, Characteristics behaviour of turbulence and transport phenomena at the stagnation region of an axisymmetrical impinging jet, *Proceedings of the 2nd Symposium on Turbulent Shear Flows* (Imperial College, London, 1979), 4.12-4.17.
- [5] K. Loubière, M. Pavageau, Educing coherent eddy structures in air curtain systems, *Chemical engineering and Processing* 47 (2008), 435-448
- [6] C.J. Hoogendoorn, The effect of turbulence on heat transfer at stagnation point, *Int. J. Heat Mass Transfer* 20 (1977), 1333-1338.
- [7] D. Lytle, B.W. Webb, Air jet impingement heat transfer at low-nozzle-plate spacing, *Int. J. Heat Mass Transfer* 37 (1994), 1687-1697.
- [8] M. Fénot, J.J. Vullierme, E. Dorignac, A heat transfer measurement of jet impinging with high injection temperature, *CR Académie des Sciences* 10, Vol. 333 (2005), 778-782.
- [9] J. Goupy, L. Creighton, *Introduction aux plans d'expériences*, Dunod (2005).

### Remerciements

Les auteurs remercient M. Laurent DESCAMPS pour la mise en place de ce sujet d'étude, ainsi que M. Christophe SCHOLTES et M. Emmanuel LAROCHE pour leur participation. M. THIBAUT n'oublie pas bien sûr M. Frédéric BADAWI qui l'a initié aux plans d'expérience.