



*ETUDE NUMERIQUE DE LA REPARTITION DE
FUMEE DANS UNE ENCEINTE DE FUMAGE
INDUSTRIELLE.*

Rapport final

CONTRAT Universitaire N° 01-5-572 424 du 13/11/2001

Entre

L'Ecole Nationale d'Ingénieurs des Techniques des Industries Agricoles et Alimentaires
Rue de la Géraudière, BP 82225, 44322 – NANTES Cedex 3

Et

L'IFREMER
Rue de l'île d'Yeu, BP 1105, 44311 NANTES Cédex 3

Responsable Scientifique : Michel HAVET

13 septembre 2002

Ecole Nationale d'Ingénieurs des Techniques des Industries Agricoles et Alimentaires
Rue de la Géraudière, BP 82225, 44322 NANTES Cedex 3
Tél : 02.51.78.54.54 - Fax : 02.51.78.54.55

FICHE DE PRESENTATION D'UN CONTRAT D'ETUDE
à la commission de certification du service fait

Contrat n° 01/5 572 424

Date de remise du rapport : 26/09/02

Lieu de consultation du rapport : Laboratoire Génie Alimentaire

Nom du Chef de projet : Régis BARON

Mise en évidence de l'intérêt scientifique :

Le laboratoire Génie Alimentaire de l'IFREMER travaille depuis quelques années sur le procédé de fumage en utilisant une enceinte climatisée industrielle. Pour optimiser ce procédé afin d'en tirer le meilleur partie pour nos différentes recherches, il est apparu indispensable de modéliser et simuler l'écoulement des particules de fumée . Ce travail nécessite, à la fois, un recherche bibliographique critique très pointue et un travail de simulation avec des outils logiciels (code de calcul CFD) sophistiqués. Ne disposant pas des moyens nécessaires en interne, le laboratoire a donc choisi de contractualisé cette tâche avec l'ENITIAA.

Mise en évidence des résultats obtenus

Ce rapport met clairement en évidence l'intérêt de l'outil CFD (Computational Flui Dynamic) de type CFX 5 (à maillage non structuré et à solveur couplé) pour simuler l'aéraulique au sein d'une enceinte de fumage aussi bien pendant les phases de séchage du produit que pendant la phase de fumage. Le maillage fin de la structure a pu être réalisé avec différentes configurations du produit et de positionnement de ces produits. Les différents résultats numériques obtenus en calcul tri-dimensionnel et les modes de visualisation de ces résultats permettent un éclairage particulièrement intéressant sur l'analyse des différentes zones internes à la cellule. De même, l'utilisation d'un flux dynamique en entrée d'enceinte a été analysé par des°calculs en régime instationnaire. Notons toutefois, que les temps de calcul s'avère très important pour obtenir une convergence satisfaisant (de l'ordre de 3 jours).Ce travail est donc très conséquent et enrichissant. Notre objectif maintenant est d'entreprendre une campagne de validation expérimentale de ces résultats de simulation.

Je, soussigné, certifie que le rapport final fourni est bien conforme à la demande formulée dans l'annexe technique au contrat ci-dessus référencé.

Visa du Chef de Projet



Préambule

Lors de cette étude numérique concernant le fumage en cellule traditionnelle, nous avons opté pour le code de calcul CFX5.5 (AEA Technology). Les simulations ont été réalisées à l'ENITIAA par Mademoiselle Anne Le Niliot, élève ingénieur à l'Ecole Polytechnique de l'Université de Marseille. Son rapport de stage a été rédigé de telle sorte qu'il puisse constituer le rapport final du présent contrat. La suite du document correspond donc intégralement au travail réalisé par Anne Le Niliot.

Sommaire

Sommaire	1
Nomenclature	3
Introduction	3
I- Synthèse bibliographique	6
I.1- Le modèle physique.....	6
I.1.1- Système d'Euler pour l'air	6
I.1.2- Utilisation d'un scalaire passif	7
I.1.3- Utilisation d'un scalaire passif avec dépôt.....	7
I.1.4- Modèle Euler-Euler	7
I.1.5- Modèle Euler-Euler avec coalescence et dépôt.....	8
I.1.6- Modèle Euler-Lagrange	8
I.1.7- Conclusion.....	9
I.2- Modèle de Turbulence	9
I.2.1- Modèles basés sur une viscosité turbulente	9
I.2.1.1- Le modèle k- ϵ	10
I.2.1.2- Le modèle k- ω	10
I.2.2- Modèle aux tensions de Reynolds.....	10
I.2.3- Simulation aux grandes échelles (LES).....	11
I.2.4 Conclusion.....	11
II- Bases du modèle	12
II.1- Description de l'installation.....	12
II.2 La géométrie	12
II.3- Modèle physique.....	14
II.4- Conditions aux limites.....	14
II.4.1- Conditions d'entrées.....	15
II.4.2- Conditions de sortie.....	15
II.4.3- Conditions aux parois.....	15
III- Le Solveur	16
III.1- Les 'volumes finis' sur un maillage non structuré	16
III.2- Le maillage.....	17
III.2.1- Nos limites.....	17
III.2.2- Nos critères de qualité.....	17
III.2.3- Les solutions proposées.....	18
III.3- Le solveur couplé.....	18
III.4- La méthode.....	19
III.5- Accélération et aide à la convergence.....	19
III.5.1- Les critères de convergence.....	19
III.5.2- La géométrie	20
III.5.3- La physique.....	20
III.5.4- Les techniques classiques.....	20
III.5.5- Le pas de temps.....	20
III.6- Les réserves quant aux résultats	21
IV- Etudes préliminaires	22
IV.1- Etude préliminaire sur le modèle de turbulence.....	22
IV.1.2- Les modèles testés.....	22
IV.1.3- Les champs de vitesse.....	23
IV.1.4- La viscosité turbulente (μ_t).....	24

Nomenclature

Symbole	Unité	valeur	description
C	-		Grandeur scalaire
$C_{\epsilon 1}$	-	1,44	Constante du modèle k- ϵ
$C_{\epsilon 2}$	-	1,92	Constante du modèle k- ϵ
C_{μ}	-	0,99	Constante du modèle k- ϵ
C_D	-		Coefficient de traînée
C_p	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$	1003,8	Chaleur spécifique de l'air
C_u	-		Coefficient de Cuningham
d_p	m		Diamètre de particules
g	ms^{-1}	9,81	Constante de gravité
h	$J\ kg^{-1}$		Enthalpie
h_{tot}	$J\ kg^{-1}$		Enthalpie totale
k	$J\ kg^{-1}$		Energie cinétique turbulente
P, P _{sat}	Pa		Pression statique
P _{ref}	Pa	$1,013 \cdot 10^5$	Pression de référence
P _{tot}	Pa		Pression totale
Pr	1		Nombre de Prandtl $C_p \mu / \lambda$
Re	-		Nombre de Reynolds
T	K		Température
U	$m \cdot s^{-1}$		Vecteur vitesse ou norme suivant le cas
u_i	$m \cdot s^{-1}$		Composante de vitesse suivant i
u'_i	$m \cdot s^{-2}$		Fluctuation de vitesse suivant i
Γ	$kg\ m^{-1}\ K^{-1}$		Diffusivité
ϵ	$m^2\ s^{-3}$		Dissipation visqueuse
λ	$J\ m^{-1}\ K^{-1}$	0,02428	Conductivité thermique de l'air
μ	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$	$1,725 \cdot 10^{-5}$	Viscosité dynamique de l'air
μ_{τ}	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$		Viscosité dynamique turbulente
μ_{eff}	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$		Viscosité dynamique effective
ρ	$kg\ m^{-3}$	1,284	Masse volumique de l'air
ρ_g	$kg\ m^{-4}$		Masse volumique d'un gaz
ρ_p	$kg\ m^{-5}$		Masse volumique de particules
τ	$kg\ m^{-1}\ s^{-2}$		Contrainte
ϕ	0,01		Grandeur scalaire

Introduction

Le développement des techniques, qui permettent l'optimisation d'un processus de production tout en augmentant le niveau de qualité du produit fini, reste une problématique essentielle pour les industriels. Outre les aspects économiques, comme la réduction des coûts du processus de production par l'optimisation de la combinaison des facteurs à l'aide de technologies correspondantes, on trouve des effets écologiques et sanitaires. L'étude présentée ici est un premier pas vers la maîtrise de tous les aspects du procédé de fumage.

L'industrie du fumage est concentrée en France avec 7 opérateurs qui produisent 77% de la production de saumons, soit 15000 tonnes par an. La France est ainsi le leader mondial de production de saumon fumé, ce marché a connu une expansion énorme au cours des quinze dernières années : la consommation a été multipliée par six et le prix de vente a été divisé par deux [1].

Etant donné l'importance de cette industrie, elle représente un grand intérêt pour l'IFREMER dans le cadre de la valorisation des produits de la mer. C'est donc à la demande du laboratoire de génie alimentaire de l'IFREMER de Nantes et avec sa collaboration que cette étude a été réalisée.

Le procédé traditionnel de fumage des aliments constitue l'une des plus anciennes méthodes connues de conservation des produits carnés, associée au salage et séchage. Plus qu'un moyen de conservation, le fumage est surtout utilisé aujourd'hui à des fins organoleptiques (couleur, goût, odeur, texture), tout du moins dans les pays industrialisés.

Le traitement traditionnel complet comprend deux phases préalables au fumage : le salage et le séchage. Le salage contribue à éliminer une partie de l'eau du produit en diminuant ainsi la disponibilité pour la croissance des germes. Le séchage tend à réduire la teneur en eau du produit afin de favoriser sa conservation. Le fumage est un procédé dit continu : les produits empilés sur des grilles placées dans la cellule, sont traités durant environ quatre heures [2]. La fumée provient d'un générateur indépendant et est injectée dans la cellule climatisée pendant tout le traitement.

Ce type d'installation représente plus de 90% des équipements pour l'industrie du fumage de poissons. D'autres techniques récentes de fumage ont été élaborées. Le fumage électrostatique a été développé dans le but de réduire le temps de fumage et permettre une production en continue [1]. La 'fumersion' utilise des condensats de fumée. Ces diverses techniques restent marginales et ne correspondent pas à l'heure actuelle au cahier des charges type du marché. C'est pourquoi l'IFREMER a décidé de perfectionner le procédé traditionnel. Afin de mieux répartir la fumée sur le produit, un procédé de ventilation dynamique en entrée est déjà mis en œuvre. L'efficacité de cette méthode n'a pas été démontrée, c'est un des objectifs de l'étude numérique.

Dans le cas du séchage-fumage de poisson, une étude aérodynamique du fluide porteur, l'air, paraît indiquée dans le cadre d'une optimisation de procédé. L'étude portera essentiellement sur l'analyse de champ de vitesse au sein d'une enceinte de séchage-fumage. Les vitesses appliquées à proximité immédiate des produits à traiter influencent considérablement les effets des phases de séchage et de fumage sur ces derniers. Dans le cas du fumage l'étude du fluide porteur, l'air (principalement injecté lors de la combustion)

indique directement le comportement de la fumée. En effet les particules de fluides et les composés volatiles de la fumée (deux fois plus lourds que l'air) vont a priori suivre l'air. Cette étude de fumage sera faite suivant deux processus :

- une injection constante du fluide dans l'enceinte
- une injection dynamique correspondant aux modifications faites.

Le but de l'étude est d'évaluer l'homogénéité du fumage sur les poissons et de localiser les zones soumises à un trop fort ou trop faible écoulement. On tentera alors d'apporter des solutions à ces imperfections.

Ainsi l'objectif est de modéliser une cellule de fumage traditionnelle, pour cela on va utiliser un modèle physique d'écoulement turbulent et une résolution numérique sous CFD (Computational Fluid Dynamic) de type volumes finis. Une étude sera faite sur le procédé de séchage. Ce type d'étude n'est pas très fréquente dans le secteur agroalimentaire, il s'agit dans ce domaine de la première du genre.

Dans un premier temps on répondra à différentes interrogations par une synthèse bibliographique présentant : une recherche sur les modèles adaptés à la fumée et une recherche sur le modèle de turbulence.

Puis on posera les bases du modèle physique sur une géométrie réelle : le système d'Euler pour l'air et les conditions aux limites.

Ensuite on présentera succinctement le code de calcul (CFX), l'utilisation qui en a été faite.

Et enfin on abordera l'étude par des simulations préliminaires permettant de fixer les dernières bases du modèle (le modèle de turbulence et l'agencement des poissons) et de valider nos grandeurs de vitesses mesurées en entrée et en sortie.

I- Synthèse bibliographique

Cette étude bibliographique a pour objet de nous guider dans le choix du modèle physique de la fumée. L'écoulement de fumée peut être considéré comme un écoulement diphasique (gaz plus particules). On oriente l'étude vers des modèles adaptés à ce type d'hypothèse et applicables au code de calcul. Enfin cette recherche bibliographique résout en partie le dilemme du choix du modèle de turbulence.

I.1- Le modèle physique

La fumée est un mélange de gaz et d'aérosols d'agent de fumage partiellement brûlé et/ou de pyrolite décomposé (composés volatiles et gouttelettes d'huile)[2]. Elle agit par dépôt et par diffusion de ses composants dans le produit [3]. Il serait intéressant d'obtenir un champ de concentration (nombre de particules ou fraction massique) des composés de la fumée, et si possible d'y intégrer la notion de dépôt. Plus que des éléments de théorie il s'agit ici d'exemples d'utilisations de modèles diphasiques, car peu d'études ont été faites sur la fumée issue de combustion de bois. On entreprendra le parallèle avec la fumée.

Plusieurs travaux ont été consacrés aux problèmes liés à la simulation de fumée. En effet cette problématique apparaît lors de la conception et l'optimisation de détecteur de fumée ou encore dans une étude d'incendie [4] [5]. D'autres études ont été faites sur des écoulements de fines particules dans l'air dans le cadre de pollution urbaine [6]. Quelques critères, tels que : concentration initiale de fumée, rayon moyen de particules sont à prendre en compte dans le choix de ces modèles.

I.1.1- Système d'Euler pour l'air

A la base de toute simulation numérique d'écoulements de gaz, il y a le système conservatif d'Euler, qui dans notre cas est appliqué à de l'air (constitué principalement de l'air fourni pour la combustion) à 20°C et pression atmosphérique.

Conservation de la masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) = 0 \quad (1)$$

Conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla(\rho U \otimes U) = \nabla(-P \delta + (\nabla U)^T) \quad (2)$$

Conservation d'énergie

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} + \nabla(\rho U h_{tot}) = \nabla(\lambda \nabla T) \quad \text{avec} \quad h_{tot} = h + \frac{1}{2} U^2 \quad (3)$$

Puis deux approches sont possibles avec le formalisme Eulérien [6] : approche sur un fluide ou sur deux fluides.

1.1.2- Utilisation d'un scalaire passif

L'approche du scalaire passif est utilisée pour rendre compte d'une phase diluée agissant comme un scalaire passif [5]. La concentration a les caractéristiques d'une phase continue. Elle est inadaptée dans le cas de particules lourdes ayant des effets inertiels non négligeables. Des calculs sur le transport de contaminant ou des échappements de polluants domestiques ou urbains ont été faits avec cette méthode [6]. Elle est adaptée à des calculs en régime transitoire nécessaires à l'observation de volutes de fumée, notamment pour l'élaboration de systèmes de sécurités incendie [5].

L'équation de transport du scalaire passif s'écrit :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (UC) - \nabla \cdot \left[\left(\rho D_c + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla \left(\frac{C}{\rho} \right) \right] = 0 \quad (4)$$

Le calcul du coefficient de diffusivité dynamique peut se faire en considérant la fumée comme un ensemble d'espèces chimiques, les produits de combustion. En faisant l'hypothèse

d'équidiffusivité on a : $\rho D = \frac{\mu}{Sc} = \frac{\mu}{Pr} = \frac{k}{C_p}$

Une diffusivité ρD de $10^{-5} \text{ Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ est le plus fréquemment utilisée.

On peut aussi considérer les particules de suies de la fumée. Ces particules sont supposées monodisperses et sphériques de $1\mu\text{m}$ de diamètre. On calcul alors une diffusivité fonction du libre parcours moyen des particules. Cette méthode est plus particulièrement adaptée au comportement des composés volatils ; dans ce cas les particules de fumée sont transportées par la phase gazeuse. La phase dispersée n'influence pas la phase diluée. Ici le régime est turbulent et la diffusion par advection est donc dominante. En conséquence une erreur sur la diffusivité est négligeable.

1.1.3- Utilisation d'un scalaire passif avec dépôt

Le gros problème de la simulation à l'aide d'un scalaire passif est l'absence de la notion de dépôt. Un flux de particules (dominant dans les couches limites) dû à l'interaction particules parois peut être rajouté dans l'équation de transport sous forme d'un terme source [7].

1.1.4- Modèle Euler-Euler

Dans le cas d'écoulements chargés en particules, par exemple lits fluidisés ou de fines gouttelettes dans un milieu gazeux [6], la description quantitative de la concentration en particules ou fraction massique est plus simple avec la fermeture Eulérienne.

On résout un système symétrique à six équations (équations constitutives et équations de conservation en nombre de particules et en masse d'air), basé sur l'interpénétration des deux milieux continus. Le couplage des deux milieux homogènes se fait à l'interface de ceux-ci. En effet on introduit les interactions à l'interface. Ainsi on trouve :

- la force d'Archimède qui est imposée en terme source dans la conservation de quantité de mouvement (terme important en transitoire),
- la force de traînée,
- la dissipation turbulente.

Un modèle de turbulence est indispensable aux deux phases, même si les contraintes de la phase gazeuse sont très faibles devant celles du liquide (gouttelettes d'huile de la fumée).

La fumée est considérée comme une phase continue. La concentration en fumée est gouvernée par les mêmes équations que la phase porteuse. Ce système eulérien est utilisé pour des écoulements chargés en fines particules [5]. On peut avec ce modèle prendre en compte la phase particulaire comme la phase gazeuse de la fumée à l'aide d'un système sur le nombre de particules ou en fraction volumique de composés volatiles. Ce modèle comprenant beaucoup d'équations, est très lourd numériquement d'autant plus si le milieu est très chargé en particules.

1.1.5- Modèle Euler-Euler avec coalescence et dépôt

Il s'agit ici de prendre en compte les effets d'interaction entre particules, tout particulièrement la coalescence des particules. Un modèle Euler-Euler avec coalescence et dépôt a été élaboré dans le cadre d'une étude de lit fluidisé, donc pour des particules d'un diamètre supérieur à 10 μ m [8]. Il prend en compte : le travail des forces de cohésions (particules-particules parois-particules) et la dissipation qui en résulte. La fraction massique des particules est fonction du nombre d'agglomération par unité de volume et par unité de temps. Ce nombre et les coefficients dissipatifs sont des données empiriques. La coalescence des particules est un phénomène non négligeable sur la fumée. Les particules en présence ont un diamètre de l'ordre du micromètre[9], cet exemple n'est de ce fait pas applicable à la fumée.

1.1.6- Modèle Euler-Lagrange

L'intérêt de l'approche Lagrangienne par rapport à l'approche Eulérienne réside surtout dans la modélisation plus fine de la phase liquide (particules de fumée) dans un écoulement diphasique [10]. Le formalisme Eulérien-Lagrangien est une combinaison de deux approches distinctes : la formulation Eulérienne qui fournit le champ de vitesse et ses propriétés turbulentes, et le module Lagrangien qui utilise ces données pour définir la trajectoire des particules par un repère lié à la particule. Les transferts entre les deux phases sont introduits par un terme source dans le système conservatif. On utilise une approche discrète pour décrire la trajectoire des particules. Ce formalisme Lagrangien consiste à résoudre l'équation de mouvement associé à chaque particule. Il est adapté à l'étude de particule individuelle et à des nuages de particules.

Avec ce modèle on introduit plusieurs forces mises en jeu entre les phases.

La force de traînée :

$$F_{trainée} = \frac{3}{4} \frac{C_D \rho_g}{C_u \rho_p d_p} (\vec{U}_p - \vec{U}_g) |\vec{U}_p - \vec{U}_g| \quad (5)$$

De même on peut prendre en compte la gravité, l'accélération due aux gradients de pression ou d'autres forces extérieures telles que les forces d'interactions : moléculaires ou de thermophorèses.

I.1.7- Conclusion

La fumée se compose d'une phase particulière (gouttelettes d'huile) et d'une phase gazeuse ; les deux phases participent au fumage des produits. La contribution exacte de ces phases sur l'aspect organoleptique n'est pas parfaitement connue à l'heure actuelle. Cette courte étude bibliographique dresse la liste des différents modèles applicables à la fumée sans pouvoir vraiment fixer le modèle parfaitement adéquat à l'étude. Selon les différents modèles vus aux paragraphes précédents on peut conclure que :

- le scalaire passif est adapté à une étude préliminaire et peut être amélioré en introduisant la notion de dépôt,
- le modèle Lagrangien est performant pour une étude sur la phase particulière,
- le modèle Eulérien peut combiner une étude sur les deux phases.

En plus de ces considérations théoriques, il va falloir prendre en compte les limites de l'outil numérique. On est très limité quant à l'utilisation d'un modèle Lagrangien, en raison :

- du peu de connaissance sur les caractéristiques de la fumée,
- de l'impossibilité de faire les modifications nécessaires sur la version 5 de CFX.

Un modèle Eulérien constitue un calcul assez lourd à traiter numériquement. Dans un premier temps notre choix s'est porté donc vers un scalaire passif. Dans tous les exemples proposés on a tenté de modéliser la phase gazeuse et la phase particulière. La modélisation de la fumée s'est pour cette étude soldée par un échec du code.

I.2- Modèle de Turbulence

Le modèle de turbulence consiste en la simulation des fluctuations de vitesses de petites échelles. C'est un procédé complexe, principalement parce que ce phénomène est tridimensionnel, instationnaire et chaotique. Ses effets sur l'écoulement à nombre de Reynolds élevé sont très significatifs.

Les termes de quantités fluctuantes, appelés contraintes turbulentes ou de Reynolds, sont difficiles à déterminer directement. Ces contraintes ont besoin d'être modélisées par des équations supplémentaires, cette fermeture implique qu'il y ait autant d'équations que d'inconnus impliquant les composantes du tenseur résultant du calcul de moyenne. Ces équations de fermeture constituent le modèle de turbulence.

Deux types de modèles sont introduits ici : ceux introduits par une viscosité turbulente et le modèle aux tensions de Reynolds qui est basé sur le calcul approché des composantes du tenseur des contraintes. On évoquera la simulation aux grandes échelles qui n'est pas encore couramment utilisée car encore objet de recherches et de développements.

I.2.1- Modèles basés sur une viscosité turbulente

On s'intéressera ici à la fermeture à deux équations. Rappelons que la viscosité moléculaire est causée par les phénomènes de collision entre les particules du fluide, ce qui se traduit par une opposition de l'écoulement aux instabilités liées au cisaillement. La viscosité turbulente est un artifice de calcul permettant d'approcher les tensions de Reynolds.

Il est important de rappeler quelques éléments théoriques sur les grandeurs que l'on manipule. Le tenseur de Reynolds est supposé avoir les mêmes directions principales que le tenseur des vitesses de déformations moyennes. Sous l'hypothèse de viscosité turbulente son expression R_{ij} est de la forme :

$$R_{ij} = u_i u_j = -\mu_t \left(\frac{u_i}{x_j} + \frac{u_j}{x_i} \right) + \frac{2}{3} (k + \nabla \cdot U)_{ij} \quad (6)$$

Avec l'énergie cinétique turbulente :

$$k = \frac{1}{2} u_i u_j \quad (7)$$

1.2.1.1- Le modèle k-ε

Il s'agit d'une fermeture simplifiée à deux équations. Les autres modèles sont parfois lourds à traiter numériquement. Pour cette raison la fermeture k-ε est intéressante pour les applications industrielles dans lesquelles le détail du champ turbulent n'est pas recherché. Ce modèle utilise le concept de viscosité isotrope de la turbulence. L'énergie cinétique turbulente k est introduite dans la modification de la viscosité. Les deux équations en k et ε (la dissipation visqueuse) constituent la fermeture. Les deux équations sont données en annexe 1.

Il existe un modèle plus élaboré le RNG-k-ε qui diffère légèrement du standard k-ε, seuls les constantes changent, et l'une devient dépendante de la viscosité.

Notons que les modèles à deux équations tels que k-ω, k-l, k-φ sont tous construits sur le même principe. Ils diffèrent du k-ε sur deux points :

- k-ε a été conçu pour calculer des couches accélérées (relaminarisées), ce qui est réalisé avec un certain succès. Les résultats sont moins bons dans les couches retardées (gradient de pression positif), et dans le calcul du décollement.
- Le choix d'une quantité autre que ε pour la deuxième équation.

1.2.1.2- Le modèle k-ω

Il est préconisé pour des écoulements externes autour de volumes aérodynamiques (ailes d'avion), donc près des parois, mais il reste fiable pour des Reynolds faibles ($y^+ < 2$). En effet l'équation en ε ne prédit pas de bons résultats en amont de ces écoulements.

1.2.2- Modèle aux tensions de Reynolds

L'objectif est de s'affranchir des coefficients figeant l'anisotropie des tensions de Reynolds, et de pouvoir calculer les écoulements où la production de turbulence qui ne se réduit pas au seul terme de cisaillement. C'est par exemple le cas des géométries complexes, des écoulements accélérés, des parois courbes et des écoulements de coin. Le comportement numérique de ce modèle est parfois difficile. Il existe des versions simplifiées telles que

l'ASM (Algebraic Stress Model) ou EASM (Explicit Algebraic Stress Model) au comportement numérique plus stable.

Ces modèles sont basés sur les équations de transport de toutes les composantes du tenseur de Reynolds (soit en 3D, par symétrie du tenseur : six grandeurs) et du taux de dissipation visqueuse. Donc sept calculs sont à ajouter à la simulation, la notion de viscosité turbulente n'est pas utilisée ici.

Ils sont conseillés pour des écoulements fortement anisotropiques (anisotropie naturelle des phénomènes de turbulence), aussi pour des lignes de courant à courbures prononcées voire même à des tourbillons. Ils sont préconisés donc pour des champs de contraintes complexes. Toutefois les résultats sont souvent très proches de ceux obtenus avec un des modèles à deux équations étudiés précédemment.

1.2.3- Simulation aux grandes échelles (LES)

Lorsqu'il devient indispensable d'étudier des écoulements non stationnaires ou de décrire des effets d'intermittence spatiale ou temporelle, les modèles à deux équations ou aux tensions de Reynolds deviennent inopérants. La LES (Large Eddy Simulation) est adaptée dans ces cas [12]. Cela consiste à isoler les grandes échelles de l'écoulement au reste du champ. A l'aide d'une technique de filtrage spatiale, seuls les grands tourbillons sont pris en compte directement par la simulation. Le filtrage fait apparaître des termes supplémentaires appelés termes de sous-mailles, qui traduisent l'action des petites échelles sur les grandes et qui demandent à être modélisés. Une hypothèse de fermeture, ici basée sur la viscosité turbulente, est nécessaire. La LES est très complète et donc très lourde à traiter : deux grilles de calcul sont nécessaires.

1.2.4 Conclusion

Notre but est de décrire les caractéristiques principales de notre écoulement. Etant donné la complexité de la géométrie lié à l'encombrement et aux conditions aux limites extrêmes, il faut limiter la complexité du modèle de turbulence afin de rester dans des temps de calcul raisonnables. La 'LES' apparaît comme la plus adaptée. Mais elle est encore très controversée et pas forcément au point. Elle nécessite beaucoup de temps de calcul et n'est pas disponible sur CFX. Ensuite le calcul le plus complet et le plus fiable est le modèle aux tensions de Reynolds. Là encore on rajoute six équations au calcul augmentant alors considérablement le temps de simulation. Il faudra plutôt faire un choix au sein des modèles à deux équations, une étude préliminaire est utile.

II- Bases du modèle

Il est important de décrire le principe de fumage avant de poser les bases géométrique et physiques de notre modèle.

II.1- Description de l'installation

L'installation de fumage est constituée essentiellement du générateur de fumée et de conduits de raccords au fumoir. Ce générateur fonctionne de façon continue de manière à conserver la même qualité de fumée pendant tout le traitement. Du bois dur tel que chêne ou hêtre est généralement utilisé pour la combustion. Le générateur conventionnel utilise de la sciure, l'apport d'air est contrôlé, la combustion se fait à l'aide d'une plaque thermostatée. Le modèle à auto combustion utilise plutôt des copeaux de bois. Il est équipé d'une chambre de combustion et d'un épurateur. Le refroidissement et l'élimination de grosses particules se font par le passage au travers de chicanes.

Le conduit issu du générateur de fumée débouche sur la partie supérieure de la cellule de fumage et passe par une batterie froide nécessaire pour une régulation à 20°C, puis on y mélange la fumée avec de l'air. Le mélange passe par un système dynamique de ventilation commandé par un clapet. La distribution du mélange se fait alternativement de chaque côté de la cellule où sont placées six injections. Une partie du mélange est recyclé en batterie froide, l'extraction se fait au travers d'une grille centrée au fond du fumoir. Une évacuation naturelle est sur la partie haute. L'étanchéité de la porte est assurée par un joint. L'ensemble est isolé par de la laine de roche. Le chariot contenant les poissons est placé au centre de cette cellule.

II.2 La géométrie

L'installation de l'IFREMER (fumoir climatisé et chariot de la société THIRODE) est à la base des formes et des cotes de notre géométrie. Les buses d'entrées sont au nombre de 16 et avancées à une profondeur de 15cm dans la cellule. Les 170 sorties, au fond, sont représentées par une grille perforée (cf. *figure 1*). Le détail des cotes est en annexe N°2. L'aération 'naturelle', au-dessus, est représentée au bout d'un conduit. Le chariot est standard, il est constitué de 23 plateaux espacés de 6,5cm. On dispose sur ces grilles les poissons, une des problématiques de la géométrie est la modélisation des poissons : sous quelle forme et avec quelle disposition.

Plusieurs géométries sont utilisés :

- géométrie de 'plateaux' représentant un remplissage de cellule de 100% : cette configuration est la plus simple, toutes les études préliminaires ont été faites sur celle-ci.
- de 'poutres déphasées' suivant les couches : on augmente ici la complexité de la géométrie, elle correspond à un remplissage de 50%.
- de 'pavés' à disposition symétrique suivant la hauteur correspond aussi à 50% de remplissage.
- de 'pavés déphasés' suivant la hauteur avec le même remplissage.

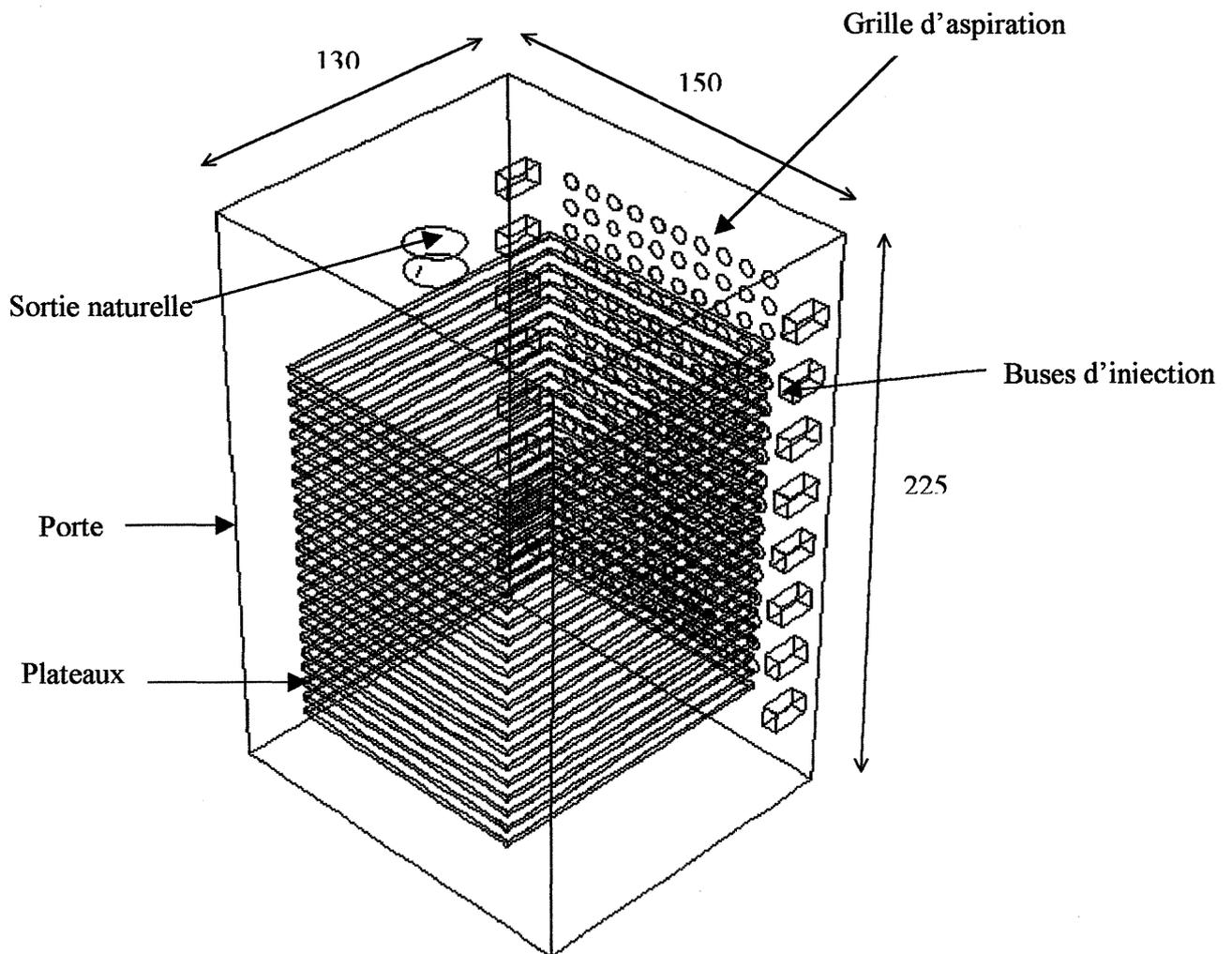


Figure 1 : vue en perspective de la cellule (cote en cm)

Le choix de ces différentes géométries s'est fait sur plusieurs critères :

- techniques telle que la possibilité de générer un maillage suivant nos critères et nos moyens de calculs,
- pratique comme la garantie d'une cohérence dans la répartition et bien sûr suivant les différents agencements possibles sur ce genre de grille.

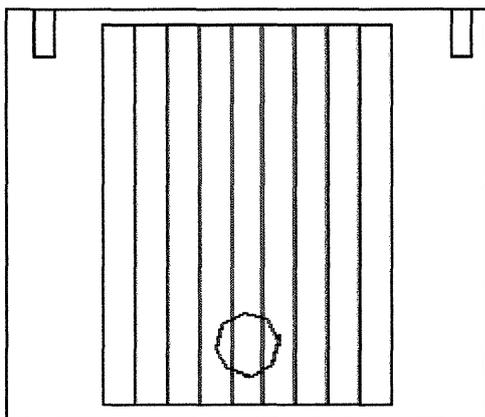


Figure 2 : vue de dessus des poutres en quinconce

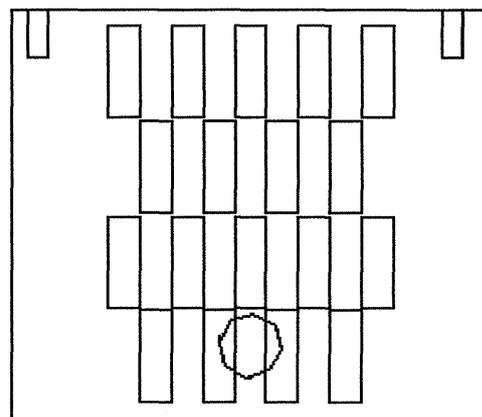


Figure 3 : vue de dessus des pavés en phase

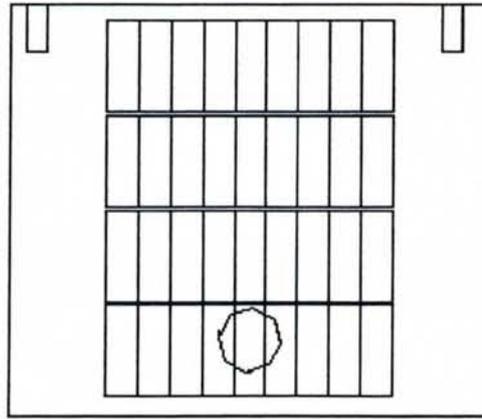


Figure 4 : vue de dessus des pavés en quinconce

II.3- Modèle physique

L'étude est essentiellement basée sur le profil de vitesse du fluide porteur, on travaille donc sur de l'air à 20°C. Son comportement dans la cellule est modélisé par les équations de Navier Stokes (1), (2) et (3).

Notre enceinte est régulée en température. Il s'agit d'un problème tridimensionnel et turbulent. Le choix du modèle turbulent est délicat, des tests préliminaires sont nécessaires Cf.IV.

Un deuxième modèle est indispensable aux parois, les détails de calcul dans la couche limite sont donnés en annexe N°3.

II.4- Conditions aux limites

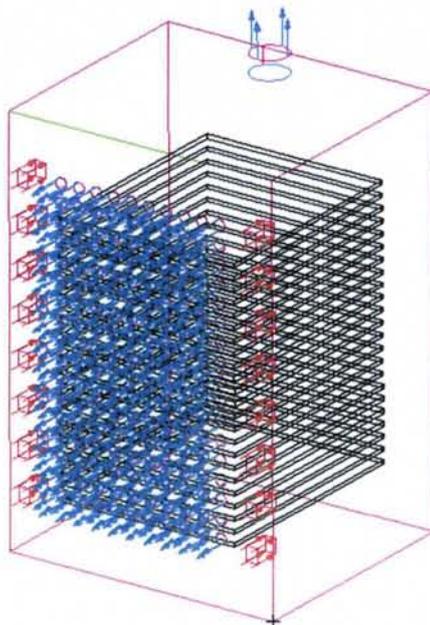


Figure 5 : conditions aux limites

Vue de l'arrière de la cellule

—▶ Débit normal sortant

—▶ Débit normal entrant

Des mesures de vitesse ont été effectuées sur les entrées et sur les sorties avec une sonde dont la précision est de $0,5\text{m.s}^{-1}$. Les valeurs obtenues sur les sorties varient entre $0,5$ et 1 m.s^{-1} . L'entrée droite est soumise à un cycle sinusoïdal, de 5 minutes entre 6m.s^{-1} et $9,5\text{m.s}^{-1}$. L'entrée gauche a un cycle en déphasage avec l'entrée droite entre 5m.s^{-1} et $8,5\text{m.s}^{-1}$.

II.4.1- Conditions d'entrées

Les seize buses d'entrée ont une vitesse normale à la surface imposée de $7,5$ ou $8,5\text{m.s}^{-1}$ pour les calculs préliminaires en stationnaire, vitesses moyennes du cycle. Dans un deuxième temps des cycles sont imposés sur ces entrées à l'aide d'expressions sinusoïdales fonctions du temps, l'étude est alors en régime instationnaire.

Une intensité turbulente I (rapport de fluctuation de vitesse sur vitesse globale) de 20% est imposée, cette valeur élevée correspond aux grandeurs utilisées pour les jets : les buses d'entrée génèrent des débits importants et sont assimilables à des jets. Avec un modèle k - ϵ l'énergie cinétique devient $k_{\text{entrée}} = \frac{3}{2} I^2 U^2$ la dissipation turbulente $\epsilon_{\text{entrée}} = \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\mu}$ avec la viscosité turbulente : $\mu_t = 1000\mu$.

II.4.2- Conditions de sortie

Un gradient de pression nul est imposée sur la 'sortie naturelle' du dessus, laissant un degré de liberté sur les conditions. Dans le cas du séchage ce volet d'évacuation naturel est fermé.

Un vitesse normale de sortie est fixée à 1 ou $0,8\text{m.s}^{-1}$ pour les 170 sorties. Un gradient de pression nul est imposé dans l'étude de séchage, toujours pour laisser un degré de liberté au logiciel.

II.4.3- Conditions aux parois

Les parois sont lisses adiabatiques et une vitesse nulle y est imposée. Le détail du modèle est en annexe N°3.

III- Le Solveur

Il s'agit ici de donner les grandes lignes de la résolution utilisée par CFX.5, données de la documentation technique [13].

III.1- Les 'volumes finis' sur un maillage non structuré

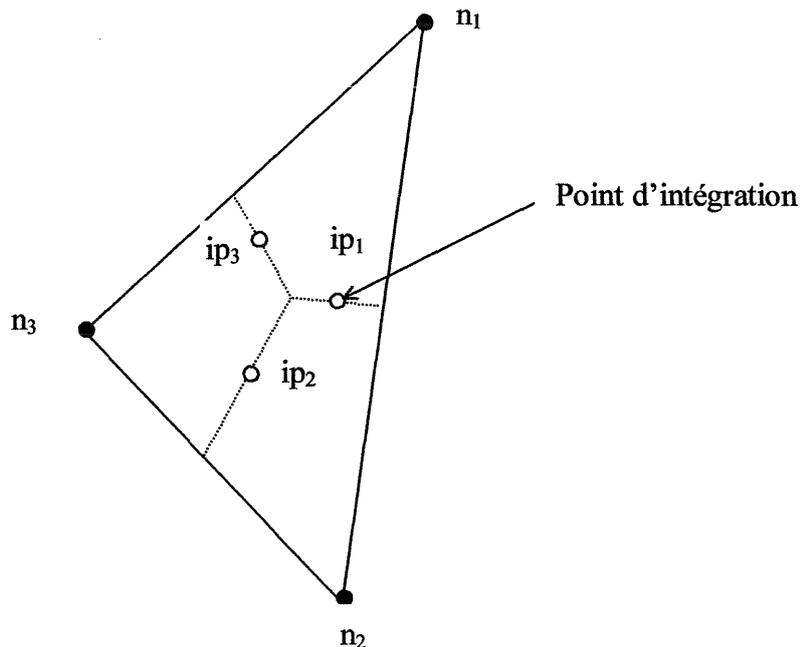
CFX.5 est basé sur la méthode des volumes finis, soit une résolution des équations sous forme intégrale sur un nombre (fini) de volumes. A chaque nœud correspond une solution et les propriétés des fluides. Rappelons la démarche suivie par cette méthode.

Soit ϕ la variable considérée, elle est régie par une équation de conservation :

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_j \phi}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) = 0 \quad (8)$$

qui devient pour un volume élémentaire $\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \int_A \rho U_j n_j \phi dA - \int_A \mu_{eff} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} n_j dA = 0$ (9)

Avec n_j la normale sortante, A et V respectivement la surface externe et le volume de contrôle. Dans un premier temps ces équations sont numériquement approximées par des fonctions discrètes.



Pour la discrétisation des équations intégrales, on se place aux points ip_n , placés au 1/3 des médianes des surfaces de l'élément 3D. Par exemple l'advection devient :

$$\int_A \rho U_j n_j \phi dA \approx \sum_{ip} m_{ip} \phi_{ip} \quad (10)$$

Où $m_{ip} = \rho U_j n_j \Delta A$ est le débit massique à travers le volume de calcul, ΔA la surface, ϕ_{ip} la valeur discrète de la variable au point d'intégration. Pour compléter la discrétisation on doit apparenter la variable ϕ_{ip} à celle fixée aux nœuds, ϕ_n . Il semble physiquement raisonnable de prendre la variable au nœud amont pour la variable en ip : $\phi_{ip} = \phi_n$.

III.2- Le maillage

On l'a vu la première étape de cette méthode est la division de la géométrie en volumes élémentaires.

La CAO intégrée du logiciel construit un maillage non structuré. Donc par défaut le mailleur génère des éléments tétraédriques de discrétisation, il peut aussi utiliser plusieurs variétés d'éléments 3D tels que des prismes, des pyramides, des hexaèdres ou utiliser un maillage hybride constitué de plusieurs types d'éléments.

La géométrie a des détails de constructions qui sont de l'ordre de la dizaine de centimètres, alors que sa hauteur fait deux mètres. C'est une architecture qui impose une petite taille d'éléments impliquant très rapidement un maillage énorme.

III.2.1-Nos limites

Posons d'abord les limites imposées par les moyens de calculs, soient 450 000 nœuds, sachant que le maillage par défaut de CFX construit 200 000 nœuds. Il faut donc se fixer des zones prioritaires de raffinement.

III.2.2-Nos critères de qualité

Dans le cadre de notre étude, l'écoulement autour des saumons est l'information principale recherchée. On se fixe un minimum de sept éléments de calcul entre les saumons, sachant que les volumes aux parois ont une vitesse nulle. On s'assure ainsi d'avoir une grandeur de vitesse significative. On tachera toutefois de contrôler le maillage autour des zones d'entrée où la turbulence est très élevée. Notons que toute surface affinée impose un affinement du volume sur un grand rayon d'action pour assurer une cohérence dans le maillage.

De plus le critère de qualité principal est l'homogénéité des tailles d'éléments, sans laquelle on peut s'attendre à des difficultés de résolution. Ainsi le ratio entre les différents éléments de calcul est un paramètre qui prédit bien les difficultés à venir.

Le nombre de nœuds est bien sûr la grandeur principale gérant notre temps de calculs. Un maillage grossier sur notre géométrie fait 55000 nœuds et converge en trois heures, affiné il fait entre 400 000 et 450 000 (limite fixée par la mémoire) nœuds et aboutit en plusieurs jours.

III.2.3-Les solutions proposées

On utilise le paramètre le plus basique proposé par CFX, en fixant uniquement la taille maximale des mailles. On affine le maillage autour de chaque arête, de façon à assurer la définition de chaque détail géométrique, buses d'entrée et trous de sortie.

On procède à un raffinement local autour des 'poissons', pavés, grilles ou poutres. Pour cela on place deux contrôles de maillage, 'mesh control', sous forme de deux triangles au milieu des poissons, le rayon d'action de ce raffinement prend toute la hauteur du chariot. On fixe le facteur d'expansion et la taille des éléments. Rappelons que sept éléments de calculs sont nécessaires entre les saumons.

Le maillage le plus grossier fait 52 000 nœuds et aucun affinement n'a été pratiqué autour des poissons. Le maillage le plus fin fait lui 440 000 nœuds.

III.3- Le solveur couplé

On est donc amené à écrire un système d'équations sur chaque maille :

$$\sum_j a_j \phi_j = b \quad (11)$$

Avec ϕ la solution, b le second membre, a le coefficient, i identifiant le volume ou le nœud considéré, j les nœuds voisins.

Cette méthode peut s'adapter aussi bien à un maillage structuré ou non. Pour des variables scalaires, tels que k ou l'enthalpie, on manipule uniquement des scalaires. Tandis que pour les solutions de la conservation de mouvement et de masse on a :

$$a_i^j = \begin{pmatrix} a_{uu} & a_{uv} & a_{uw} & a_{up} \\ a_{vu} & a_{vv} & a_{vw} & a_{vp} \\ a_{wu} & a_{wv} & a_{ww} & a_{wp} \\ a_{pu} & a_{pv} & a_{pw} & a_{pp} \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} b_u \\ b_v \\ b_w \\ b_p \end{pmatrix} \quad \phi = \begin{pmatrix} \phi_u \\ \phi_v \\ \phi_w \\ \phi_p \end{pmatrix}$$

Ici les équations sont toutes résolues à chaque itération, le système (11). L'itération se fait sur toutes les grandeurs recherchées, le vecteur ϕ .

Un solveur découplé (Fluent, star-CD...) résout d'abord la conservation de quantité de mouvement, puis corrige la valeur de la pression à partir de ces résultats. Ce bouclage sur la pression nécessite beaucoup d'itérations.

Pour le solveur couplé, le pas de 'temps' agit comme un accélérateur de convergence pour les calculs stationnaires.

III.4- La méthode

Pour chaque pas, les équations non-linéaires, polynômes après développement en série, et les équations linéaires sont résolues. On fixe à l'avance le type de pas (cf. Annexe N°4), physique ou local. Une linéarisation se produit par pas dans le cas stationnaire. Pour le calcul transitoire, on se fixe là le nombre de pas et le nombre de boucles itératives par pas.

Après linéarisation, le système devient donc

$$[A] \cdot [\phi] = [b] \quad (12)$$

Avec $[A]$ la matrice de coefficients, $[\phi]$ le vecteur solution et $[b]$ le second membre.

Le processus itératif commence avec une solution approchée ϕ^n , pour laquelle on introduit une correction ϕ' , pour obtenir une meilleure solution, ϕ^{n+1} . Notons n le rang de l'itération.

$$\text{On obtient donc : } \phi^{n+1} = \phi^n + \phi'$$

i.e : ou ϕ' est la solution de $A\phi' = r^n$, où r^n est le résidu obtenu par :

$$r^n = b - A\phi^n \quad (13)$$

C'est ainsi jusqu'à ce qu'on atteigne les critères de convergence.

Plusieurs problèmes de convergence inhérents au solveur, nous obligent à utiliser des techniques pour l'amélioration à la convergence.

III.5- Accélération et aide à la convergence

Etant donné la complexité de notre problème, de part la géométrie et les conditions aux limites extrêmes, le solveur a beaucoup de difficultés à atteindre rapidement nos critères de convergence. L'élaboration de ces techniques a été longue : ce n'est pas la prise en main du logiciel qui a posé des difficultés mais plutôt l'obtention de résultats convergés et cohérents. C'est pourquoi on insiste ici sur les difficultés rencontrées.

III.5.1- Les critères de convergence

L'arrêt du calcul se fait suivant deux critères : le nombre maximum d'itérations fixées ou au résidu minimum. Deux résidus normalisés sont définis sur CFX, le maximum de résidus (13) et le résidu au moindre carré, RMS (Root Mean Square) correspond au maximum des valeurs absolues des résidus. Ce résidu est calculé en utilisant uniquement les termes spatiaux des flux, et représente essentiellement un défaut d'équilibre de nos grandeurs conservatrices.

Ces résidus sont les principaux critères de convergence, on estime que pour un résidu 'RMS' de 10^{-6} atteint ou dépassé, le résultat est numériquement très bon, pour un résidu de 10^{-5} il est acceptable et de 10^{-4} assez médiocre.

Pour atteindre ces critères rapidement, il faut prendre quelques précautions avec la géométrie, la physique et surtout avec le choix du pas de temps.

III.5.2- La géométrie

La partie CAO de CFX génère pour chaque figure créée une paramétrisation. Les conséquences d'une paramétrisation trop pauvre sur le maillage sont des difficultés de génération et un aspect de tétraèdre à angles aigus, éléments à résolution médiocre. Par exemple créer un parallélépipède à partir de six surfaces plutôt que d'extruder une courbe donne une meilleure définition de l'élément.

Il est important de prédire les zones où la résolution sera ardue. Notre condition limite 'sortie naturelle' est placée au bout d'un conduit, pour aider à la résolution dans cette zone de la cellule et avoir une meilleure idée du comportement de l'écoulement en sortie.

III.5.3- La physique

Le solveur de CFX est très sensible à la physique de la simulation. La cohérence des conditions aux limites est capitale. Garder un degré de liberté, soit donc un gradient de pression nulle en sortie dans notre système, laisse au solveur le soin d'assurer la conservation des grandeurs masse, quantité de mouvement et énergie. Une vitesse plus élevée en entrée donne des tendances plus franches dans l'écoulement et améliore ainsi les conditions d'utilisation du solveur.

III.5.4- Les techniques classiques

Les premiers calculs sont lancés sur des maillages grossiers, les champs obtenus servent à l'initialisation des calculs sur des maillages plus fins après interpolation. On gradue la complexité du modèle physique, sur le modèle de turbulence notamment. On fait des essais en passant en instationnaire. Le début des calculs est souvent instable, il faut dépasser 'la barre' d'instabilité numérique, pour cela on joue sur le pas de temps.

III.5.5- Le pas de temps

Il constitue le principal paramètre accélérateur de calculs stationnaires. Mal choisi, il provoque une divergence dans la résolution. On peut fixer un pas de temps différent pour les différentes équations sélectionnées. Trois pas de temps sont possibles en stationnaire : le pas choisi par défaut, le physique et le local. Ils sont décrits en annexe n°4. En instationnaire c'est un pas de temps lié à l'échelle de temps du phénomène observé.

III.6- Les réserves quant aux résultats

Il est important de noter qu'aucune validation expérimentale n'a pas pu être mise en place. Elle sera certainement faite courant 2003. Seules des mesures de débits en entrée et en sortie ont pu être effectuées, mais certaines valeurs restent incertaines à cause de la marge d'erreur des sondes utilisées. La solution obtenue est une solution pas la solution.

De plus quelques erreurs numériques apparaissent dans l'exploitation. En effet tous les schémas numériques ont un degré d'erreurs. Certaines résultent de la troncature de terme additionnel sur des série. Beaucoup de ces effets diminuent la pertinence de résultats.

Par exemple la diffusion numérique vient des différentes équations où le terme d'advection est approximé à l'aide d'un développement limité d'ordre trop faible. Ce phénomène apparaît lorsque le maillage n'est pas bien aligné avec le flot dominant. La grandeur est lissée suivant la normale sortante de la maille. Dans un maillage non structuré, aucune direction n'est privilégiée. Ce problème atteint donc toutes les directions. Pour pallier ce problème, il faut essayer d'affiner le maillage, de passer éventuellement au second ordre pour le schéma d'advection.

IV- Etudes préliminaires

Trois objectifs sont à atteindre dans ces études préliminaires. Le premier doit fixer la dernière base théorique manquante : le modèle de turbulence. Le second a pour but de définir l'agencement optimal des poissons : donnée qui va déterminer la géométrie à étudier par la suite. Le dernier est destiné à valider nos grandeurs de vitesse par une étude de sensibilité à l'erreur de mesure.

IV.1- Etude préliminaire sur le modèle de turbulence.

Dans le contexte d'étude préliminaire la géométrie 'plateaux' est apparue la plus appropriée à des calculs rapides. Une des préoccupations des modèles de turbulences est de rendre compte de manière précise de la diffusion turbulente. Cette diffusion augmente efficacement les transferts et homogénéise les fluides.

Les propriétés de la turbulence dépendent des écoulements eux-mêmes. Cela suggère qu'il n'existe pas de théorie adaptée à tous les écoulements.

Toute la difficulté du problème réside dans le choix approprié du modèle de turbulence selon des considérations aussi bien physique que numérique. On recherche ici le meilleur rapport qualité/temps de calcul. Dans cette optique, les différents modèles disponibles ont été testés sur un maillage grossier. En effet face à une géométrie aussi complexe, beaucoup de questions se posent quant au choix de la fermeture, notamment sur des considérations telles que la notion d'écoulements externes autour des 'poissons' (ici sous forme de plateaux) ou d'écoulements internes dans la cellule. Ce fort encombrement de cellule est à la limite du milieu poreux, il nécessite un modèle aux parois (annexe N°2) plus adapté que celui utilisé.

IV.1.2- Les modèles testés.

La modélisation turbulente peut ici être abordée de deux façons différentes, soit par la viscosité turbulente soit par les équations de transport des tensions de Reynolds. Un modèle turbulent est indispensable à notre simulation, mais on peut se demander dans quelles proportions notre modèle de turbulence influence notre champ de vitesse.

Le $k-\epsilon$ est un modèle adapté aux écoulements internes, basé sur une répartition isotrope de la turbulence, le modèle $k-\omega$ est lui préconisé plutôt pour des écoulements externes. Le 'Shear Stress Transport' est lui basé sur ce dernier modèle, avec une meilleure prédiction sur les bords d'attaque et en aval de l'obstacle, mais est inadapté aux surfaces courbes.

La deuxième famille de modèles est constituée du modèle aux tensions de Reynolds, le 'Shear Stress Model' varie de ce dernier par l'expression de la corrélation sur les tensions de pressions. Ces modèles sont les plus complets, mais les plus coûteux en terme de temps de calcul et de mémoire. Ils sont basés sur le calcul du tenseur des contraintes.

Pour ces raisons et en l'absence de validation expérimentale, le modèle aux tensions de Reynolds sera la référence ici, on choisit ainsi le modèle le plus complet.

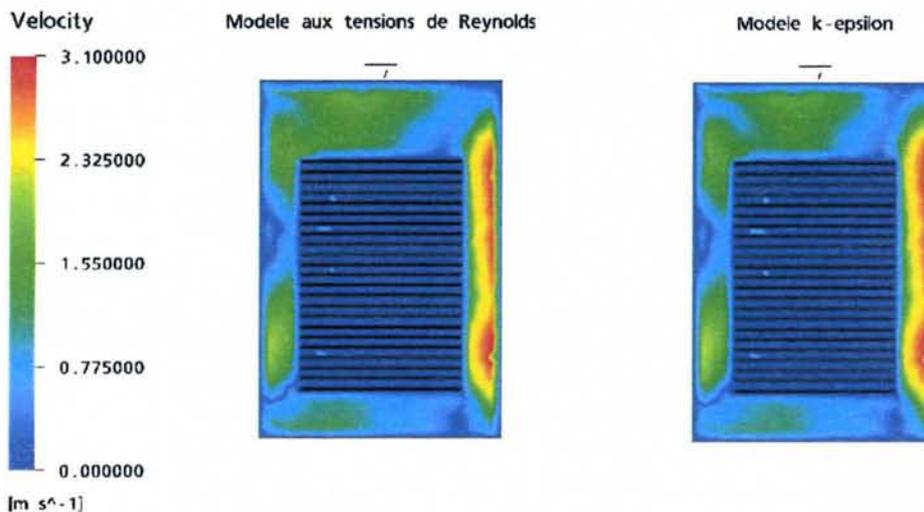
Pour la visualisation on a fait le choix d'un plan de la cellule (plan XY en $Z=0,6m$) significatif de similitudes et de différences entre l'utilisation des différents modèles. Le calcul a été fait avec les conditions limites d'entrées de $8,5 \text{ m.s}^{-1}$ et de sorties 1 m.s^{-1} .

Dans une logique de tests rapides, le maillage utilisé est constitué de 52805 nœuds et 259048 éléments, soit donc un maillage très grossier avec un ratio entre les tailles d'éléments très correct assurant ainsi une convergence rapide. Notre choix se fera à partir de l'observation de la vitesse, essentielle à notre projet, et de deux grandeurs turbulentes : la viscosité turbulente et l'énergie cinétique turbulente.

IV.1.3- Les champs de vitesse

Les champs de vitesse sont des résultats cruciaux de notre étude. On constate peu de différences significatives entre ces champs. On a gardé en illustration les résultats du calcul aux tensions de Reynolds et le modèle $k-\epsilon$, *figure 6*, les autres champs sont en annexe N°5. les différences résident dans des tendances moins nettes sur la partie haute de la cellule, zone où les volumes de calcul sont très grands. La turbulence n'a donc que très peu d'influence sur les vitesses à l'extérieur des plaques.

Ce même test appliqué à un maillage très fin nous permettrait de conclure sur l'impact du modèle sur l'écoulement au niveau des plaques. Etant donné les atouts et inconvénients des cinq traitements l'écoulement autour des plateaux peut présenter des différences sur le champ de vitesse suivant le modèle de turbulence. Mais la priorité est d'assurer un calcul cohérent dans l'ensemble de l'enceinte.



*Figure 6 : Champ de vitesse suivant de plan de coupe XY en $Z=0.6m$
(Notons que la même échelle est utilisée pour les différents champs visualisés ici)*

La taille de maillage fixée par notre puissance de calculs limite la marge de manœuvre sur le nombre d'éléments autour des plaques. On peut alors prévoir que les petites différences liées à la turbulence dans cette zone ne seront pas significatives au vu du nombre de volumes de calculs considérés, *figure 7*.

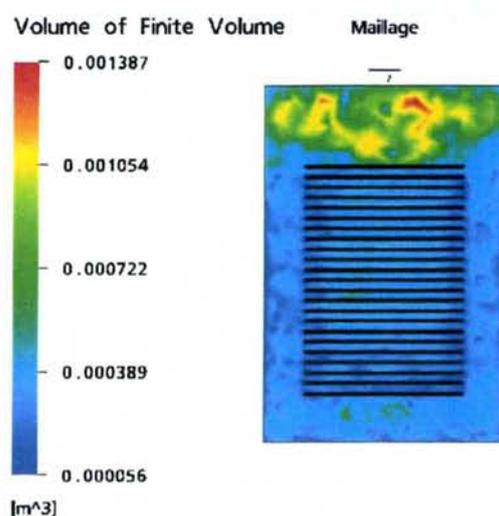


Figure 7 : Taille des éléments de calculs

Pour bien distinguer les différences entre modèles il ne faut donc pas s'arrêter au champ de vitesses, mais pousser l'étude vers les grandeurs de la turbulence telles que la viscosité turbulente ou l'énergie cinétique turbulente.

Sachant que le champ de vitesse est cohérent et très ressemblant avec les cinq modèles de turbulence testés, avec l'analyse de la viscosité turbulente et l'énergie cinétique turbulente, c'est le calcul du tenseur des contraintes qui va ici être validé cf.I.2.1.

IV.1.4- La viscosité turbulente (μ_t)

Qualitativement et quantitativement les deux modèles basés sur les équations en $k-\omega$ donnent un champ de viscosité très différent des trois autres modèles. La viscosité turbulente est globalement 20 fois plus élevée. Le profil est très différent de celui obtenu par le calcul du tenseur des contraintes. Le $k-\omega$ et le SST sont inadaptés aux calculs en écoulement interne, calculs concernés par notre visualisation. Le transport de la turbulence est très largement surestimé dans la zone d'écoulement interne pure. En effet les 'spectres' des buses d'entrées se projettent sur toute la profondeur de la cellule.

Quant aux trois autres modèles de turbulence la tendance est la même. Sur les deux calculs du tenseur de Reynolds on obtient des gradients plus nets sur le 'Shear Stress Model' (SSM), mais là encore c'est peut-être un artefact de l'interpolation sur une nouvelle grille ou un défaut de résolution, on entend par-là un résidu élevé dans les localisation concernées.

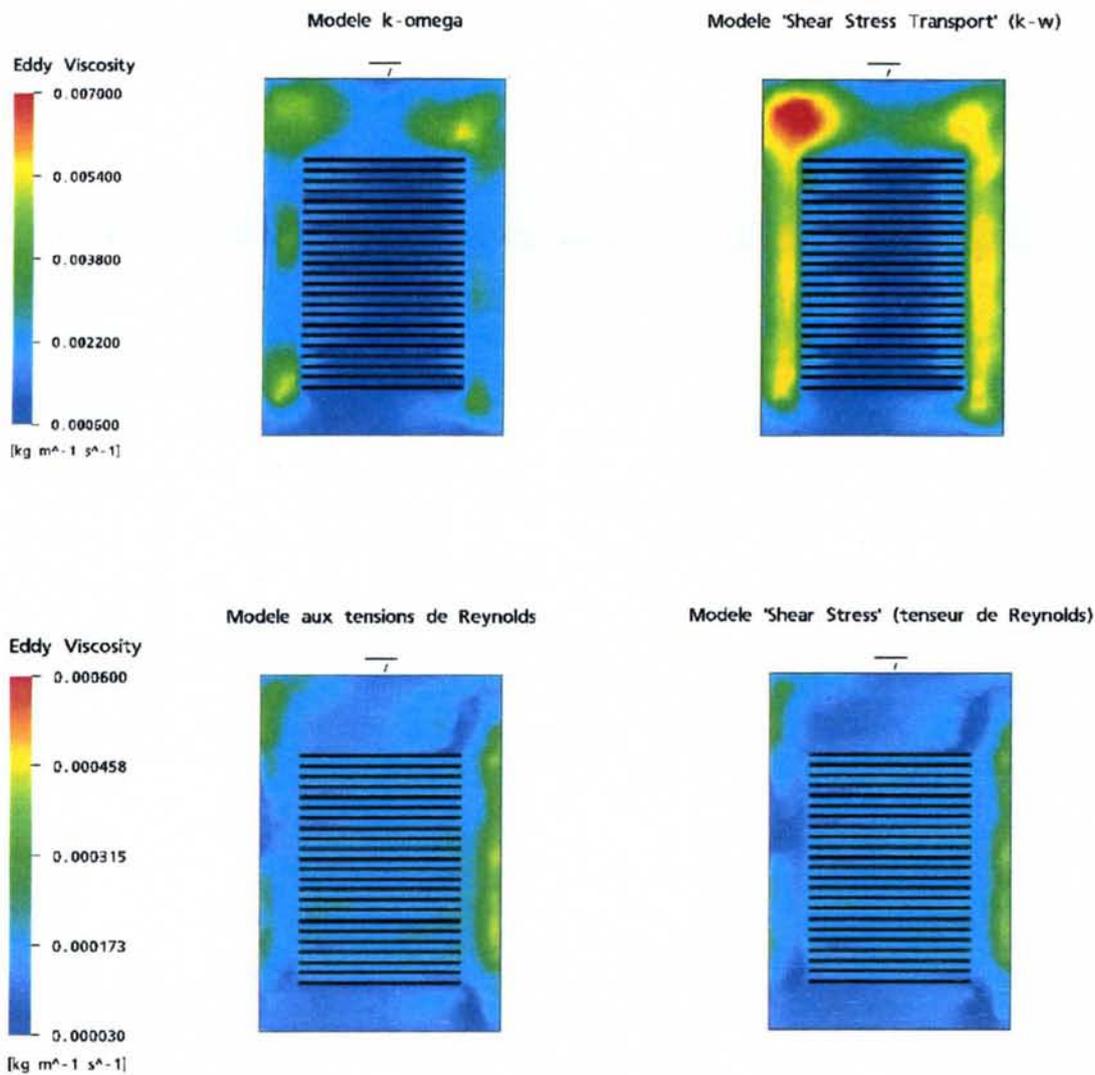


Figure 8 : Viscosité turbulente suivant de plan de coupe XY en $Z=0.6m$ avec $\mu_{air}=1,7.10^{-5}$
 La même échelle est utilisée pour les deux premiers basés sur $k-\omega$. Une échelle est aussi commune aux calculs de tenseurs et au $k-\epsilon$.

Le modèle $k-\epsilon$ se rapproche plus des modèles de calculs de tenseurs. Toutefois ces différences semblent venir de problèmes aux parois. En effet c'est aussi bien au niveau des grilles qu'au niveau des parois de la cellule que la viscosité est très éloignée de celle issue d'un calcul de contraintes. Les couches limites concernées ont une viscosité turbulente élevée. Les limites du modèle (voire annexe N°2) de couches limites visqueuses faussent la pertinence du modèle algébrique utilisé. A cela vient se cumuler l'erreur faite par l'hypothèse d'isotropie du phénomène turbulent posée dans le $k-\epsilon$. Cela diffuse des zones de forte turbulence, viscosité élevée, dans les différentes directions. Voilà pourquoi de grandes zones à forte turbulence sont observées, dans la continuité des couches limites, s'étalant sur une large bande autour des parois.

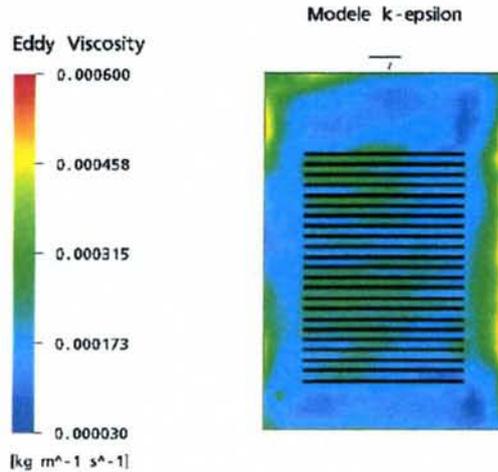


Figure 9 : viscosité turbulente obtenu à partir d'un modèle k-ε

Le k-ε reste encore, dans un rapport qualité coût de calculs, le meilleur dans la mesure où il ne s'agit pas d'une étude de turbulence.

IV.1.5- L'énergie cinétique turbulente (k)

On observe ici la deuxième partie du calcul approché des contraintes cf.I.2.1 équation (7). Les mêmes caractéristiques que pour la viscosité sont observés.

Les modèles k- ω présentent une répartition de k similaire à celle de μ_t pour les mêmes raisons.

Le modèle aux tensions de Reynolds et le SSM sont ici identiques. Le k-ε présente les mêmes défauts que dans la visualisation de μ_t , mais nettement moins prononcés. On observe ici, mieux que sur μ_t , l'image des buses, source de turbulence, projetée sur le plan de coupe. Soumis à l'effet Coanda, ces foyers turbulents sont collés aux parois, alors que les jets entrants d'origine sont eux à 10 cm de celles-ci. Globalement l'énergie cinétique turbulente est mieux prédite que la viscosité turbulente, par conséquent les fluctuations de vitesses de ce modèle sont cohérentes par rapport au calcul d'un tenseur de Reynolds.

Là encore le k-ε présente des caractéristiques turbulentes correctes par rapport à un calcul de tenseur : le modèle aux tenseurs de Reynolds est la référence.

Au vu des différentes grandeurs observées, de nos moyens de calculs et du temps dont nous disposons, notre choix se porte sur le modèle à deux équations k-ε. En effet il est le moins coûteux en calcul, le plus stable à la convergence et celui qui se rapproche le mieux des calculs approchés complets du tenseur, seule référence ici. Le champ de vitesse obtenu correspond parfaitement à la résolution des équations différentielles de contraintes. Utilisé un modèle différentiel n'est pas donc justifié ici. Toutefois on restera prudent quant aux phénomènes observés aux parois. L'étude d'écoulement sur les poissons se fera sur des plans éloignés des zones pariétales. La turbulence est dans le transport de fumée un phénomène important.

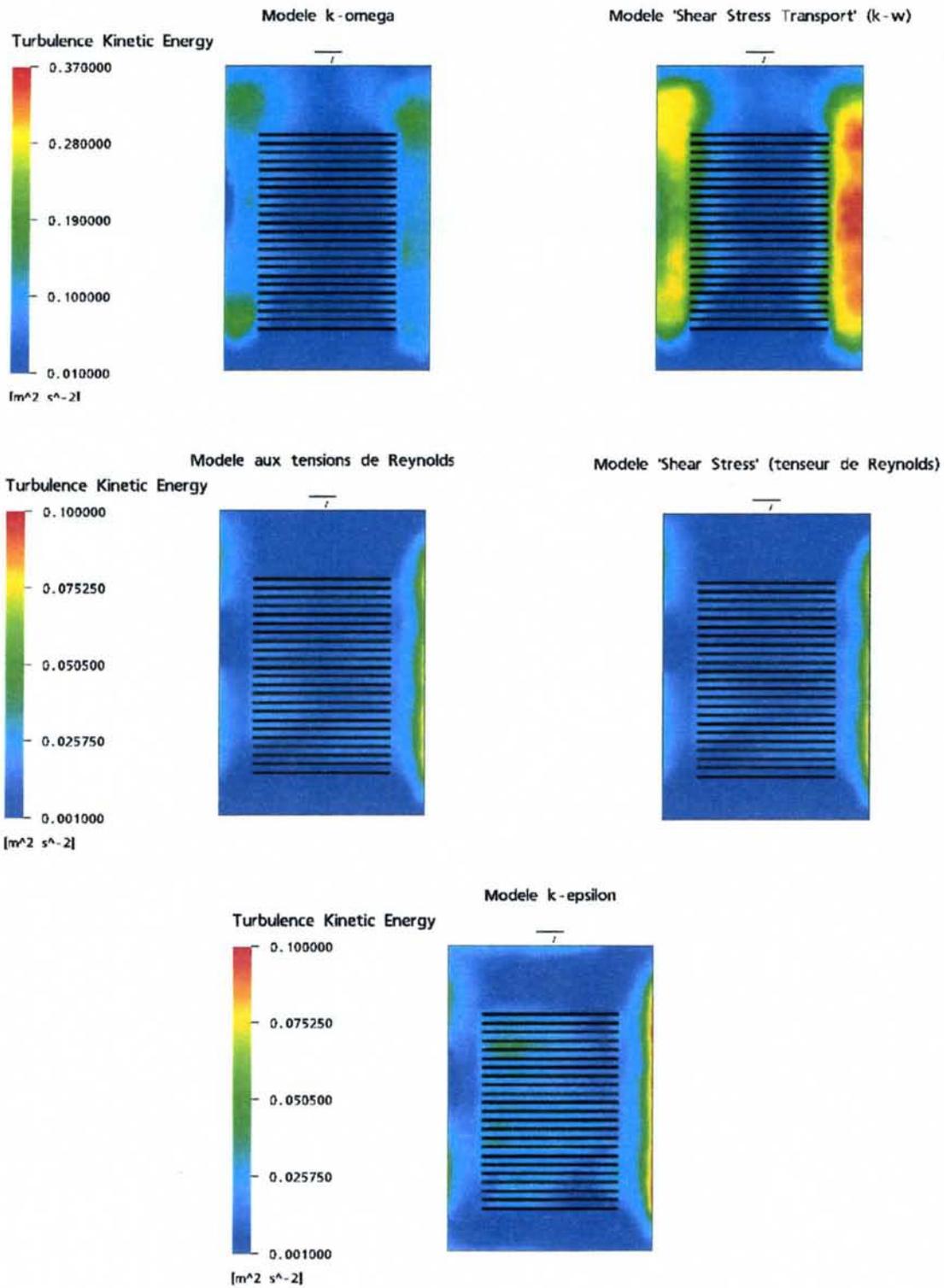


Figure 10 : Energie cinétique turbulente suivant de plan de coupe XY en Z=0.6m
 (La même échelle est utilisée pour les deux premiers basés sur k- ω . Une échelle est aussi commune aux calculs de tenseurs et au k- ϵ)

IV.1.6- Le modèle k-ε

Le modèle k-ε, voire partie I.2.1, est le modèle standard utilisé dans l'industrie. Sa simplicité assure un temps de calcul raisonnable et ne perturbe pas le solveur. Tout cela, on l'a vu en assurant un résultat correct sur le champ de vitesse et les grandeurs turbulentes par rapport au modèle aux tensions de Reynolds plus complet.

Rappelons que la fermeture se fait sur les deux grandeurs k et ε, respectivement l'énergie cinétique turbulente massique en m^2s^{-2} et le taux de dissipation visqueuse en m^2s^{-3} , le détail du modèle est en annexe N°1.

IV.2- Etude sur les différentes configurations géométriques

Il s'agit ici de faire le choix d'une disposition optimale pour les poissons, cela à partir d'une étude de sensibilité à l'arrangement des poissons sur le chariot. L'influence des différentes configurations sera jugée sur le champ de vitesse à la surface des poissons, sur la vitesse moyenne et les maxima.

Notons que le critère fixé sur la vitesse maximale d'écoulement en surface du poisson est de 2m.s^{-1} pour les traitements de séchage et de fumage.

Le calcul sur les différentes géométries est lancé sur un maillage fin, entre 420 000 et 440 000 éléments, avec une condition limite en entrée de $8,5\text{ m.s}^{-1}$ et 1m.s^{-1} en sortie. Dans un souci d'optimisation de temps de calculs, les simulations sont lancées en stationnaire avec des conditions symétriques. Les conclusions sur la géométrie sont a priori indépendantes des phénomènes instationnaires.

Dans le post traitement les grandeurs de vitesses relatives aux poissons sont calculées sur des plans situés entre chaque grille. Ce protocole sera le même dans toutes les simulations.

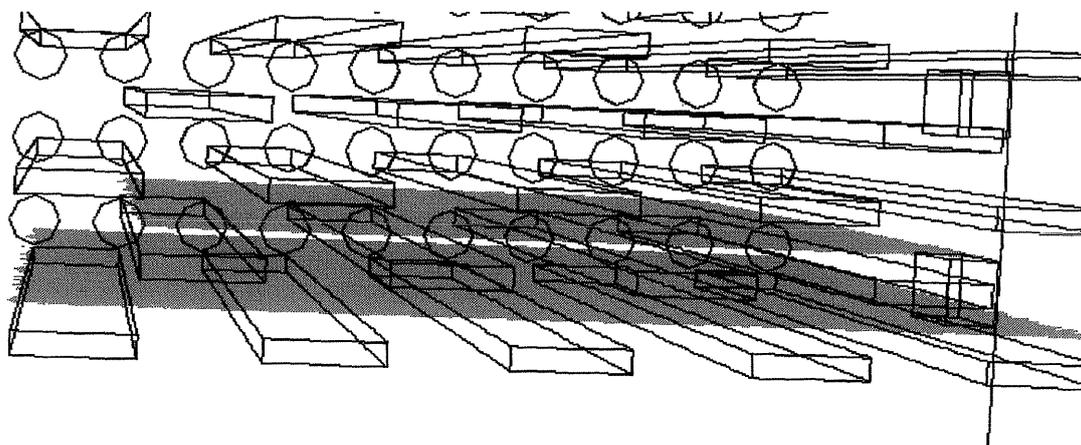


Figure 11 : plans d'étude utilisés sur la géométrie 'poutres'

La vitesse moyenne sur un plan est calculée avec une pondération par la surface, de façon à prendre en compte les irrégularités de maillage, de même pour la vitesse dans la cellule qui comprend une pondération volumique.

La numérotation des 23 plans se fait de bas en haut, le plan 1 correspond aux poissons en bas du chariot.

Notation utilisée :

V_{cellule} : vitesse moyenne dans toute la cellule.

V_{poissons} : vitesse moyenne sur les 23 plans considérés.

$V_{\text{poissons}} \text{ maximale}$: vitesse maximale atteinte en moyenne sur les 23 plans.

En m.s ⁻¹	Plateaux	Poutres	Pavés	Pavés déphasés
V _{cellule} en moyenne	1,23	1,53	1,14	1,45
V _{poissons} en moyenne	1,05	1,42	1,26	1,30
V _{poissons} maximale	1,83	2,70	2,75	2,54

Figure 12 : tableau de bilan de l'étude sur la géométrie

Des différences significatives sur la vitesse en surface du poisson existent suivant la géométrie utilisée.

L'agencement poutre est celui où la vitesse à la surface des poissons est la plus rapide, trop pour les traitements de séchage et de fumage. Les 100% d'encombrement de la géométrie 'plateaux' limitent évidemment la circulation d'air sur les poissons, on a donc des vitesses très faibles. Toutefois il est à noter que la différence entre la vitesse maximale et la vitesse moyenne est le plus faible, impliquant ainsi que cette géométrie procure l'écoulement le plus homogène sur les poissons. Un fort encombrement diminue donc les risques de dépassement des 2m.s⁻¹ et homogénéise le traitement. Mais ces deux configurations par leurs propriétés extrêmes sont à exclure.

Les configurations pavés sont géométriquement très proches mais les différences sur l'écoulement dans la cellule et le maximum de vitesse sont notables. Au vu des différents résultats, l'agencement 'pavés déphasés' apparaît comme le plus adapté. En effet le maximum de vitesse est plus modéré, 2,54 m.s⁻¹ au lieu de 2,75 m.s⁻¹ pour les pavés entassés. La vitesse moyenne sur les pavés est acceptable et présente un maximum le plus faible. Son encombrement de 50% se rapproche de la réalité. La géométrie déphasée se rapproche le plus de l'arrangement de l'utilisateur. Le gradient de vitesse entre la moyenne et le maximum est le plus faible, le champ est plus homogène sur l'ensemble des plateaux. On utilisera cette géométrie pour la suite de l'étude.

IV.3- Etude de sensibilité à la vitesse

La géométrie étudiée est celle déduite de l'étude précédente : l'agencement de 'pavés déphasés'. Il faut s'assurer de l'influence d'une erreur de vitesse faite lors des mesures sur le prototype.

Il s'agit ici de se fixer un peu mieux nos grandeurs de conditions aux limites. C'est une priorité avant de conclure sur le champ de vitesse. Toutefois il faudra rester prudent quant aux interprétations quantitatives, tant qu'une validation expérimentale n'a pas été mise en place.

Les deux calculs étudiés diffèrent par les grandeurs d'entrées en conditions limites. L'un a une vitesse d'entrée de $8,5\text{m.s}^{-1}$ et une vitesse de sortie de 1m.s^{-1} , l'autre $7,5\text{m.s}^{-1}$ et $0,8\text{m.s}^{-1}$.

En m.s^{-1}	Vitesse d'entrée à $8,5\text{m.s}^{-1}$	Vitesse d'entrée à $7,5\text{m.s}^{-1}$
V_{cellule}	1,45	0,92
$V_{\text{poissons}} \text{ moyenne}$	1,30	1,18
$V_{\text{poissons}} \text{ maximale}$	2,54	2,25

Figure 13 : tableau de résultats de l'étude de vitesse

Globalement dans la cellule la vitesse moyenne diminue de $0,5 \text{ m.s}^{-1}$, faible différence au vu des modifications faites. Au niveau des poissons, le gradient est nettement plus faible, avec deux chiffres significatifs après la virgule, la diminution atteint $0,15\text{m.s}^{-1}$. La valeur maximale de vitesse sur les poissons (2m.s^{-1}) est largement dépassée dans les deux cas.

On peut conclure que l'erreur des sondes de mesure n'a pas une influence énorme sur l'étude. On peut constater que diminuer la vitesse moyenne dans la cellule de 40% ne fait diminuer la vitesse moyenne sur les poissons que de 10%. De plus on obtient une plus faible différence sur les plateaux. Diminuer le taux de renouvellement dans la cellule peut donc permettre de diminuer les gradients de vitesse entre les plateaux sans trop diminuer l'efficacité du traitement.

Pour la suite on se fixe une vitesse de $7,5\text{m.s}^{-1}$ en entrée et $0,8\text{m.s}^{-1}$ en sortie dans la géométrie 'pavés déphasés'.

Le critère de 2m.s^{-1} est dépassée. Il est indispensable de délimiter la zone concernée et de trouver l'origine de cette vitesse excessive.

V- Le fumage

Le procédé de fumage a été modifié par une ventilation dynamique d'entrée cf.II.1. L'efficacité du nouveau mode de fonctionnement doit être mise en évidence. Deux simulations du procédé illustrent l'évolution du fumage :

- en 'statique', avec un débit entrant constant : correspondant à l'ancien processus
- en 'dynamique', avec un cycle dynamique en entrée de buses : correspondant à l'évolution du procédé.

Dans les deux cas les conclusions sur le fumage reposeront sur des réflexions sur la vitesse du fluide porteur. L'étude débute avec des considérations sur le champ de vitesse dans le fumoir et le profil dans le chariot. Elle doit aboutir à :

- l'évaluation de l'homogénéité de la vitesse dans le chariot et sur les plateaux
- la localisation des zones ne respectant pas une vitesse maximale de 2m.s^{-1} en surface du poisson.

V.1- L'écoulement en 'statique'

V.1.1- Les caractéristiques générales de l'écoulement

Le sujet a déjà été abordé sur les profils dans la partie IV.2. Le champ obtenu est très déstabilisant. A partir de conditions symétriques le champ résultant est dissymétrique. On a tout d'abord pensé à un problème numérique. Mais après plusieurs semaines de tests on ne peut que conclure sur une réalité physique surprenante.

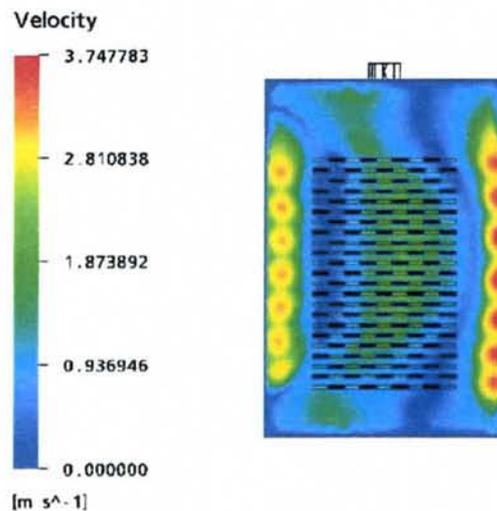


Figure 14 : Coupe à une profondeur de 60

Cependant on peut noter que ce type de profil correspond à ceux observés en présence de jets. L'instabilité des jets (nos buses d'entrée) est difficile à saisir. On peut citer qu'il s'agit de phénomènes physiques instationnaires et instables visualisés ici en stationnaire.

Les jets issus des entrées de droite sont soumis à l'effet Coanda, ils vont se coller à la paroi, contrairement à celles de gauche qui génère des jets parfaitement alignés avec les buses.

L'écoulement est caractérisé par un mouvement vers la droite, les jets de droite plus puissants engendrent une dépression, dirigeant peut-être le champ dans cette configuration.

Une zone de vitesses 'plus élevées' est localisée au centre de la cellule probablement du au retour d'impact des jets sur la porte, pour en avoir la confirmation il faudra étudier les lignes de courants dans la cellule. L'aspiration du dessus, 'sortie naturelle', peut accentuer ce phénomène en créant un mouvement ascendant au centre tel un conduit de cheminée.

V.1.2- Le profil dans le chariot

Le but est d'observer le profil de vitesse dans le chariot. Afin de connaître les différences de traitement des saumons suivant leur emplacement sur le chariot. On s'intéresse donc toujours au profil de vitesse.

Rappelons que les plateaux sont numérotés de 1 à 23 en partant du bas.

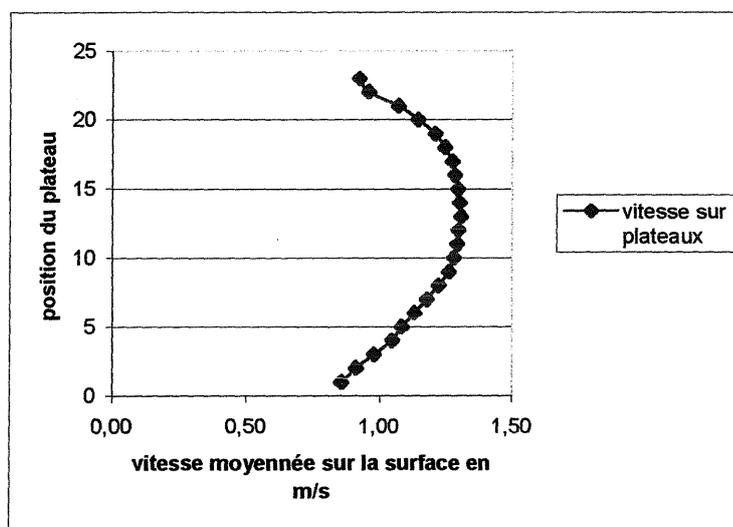


Figure 15 : Vitesse moyenne sur plateaux

Les plateaux disposés aux extrémités, 1 à 5 et 19 à 23, ont une vitesse moyenne faible. Le centre, plateaux 10 à 18, correspond à la zone de vitesse élevée observée sur le champ cf.IV.2.1.

Aux extrémité l'écoulement se disperse dans les espaces libres voisins. Le centre est lieu de conflits entre les mouvements issus des buses. De plus l'écoulement y est confiné entre les plateaux, générant des vitesses élevées parfois supérieure à $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (le secteur concerné fera l'objet d'une étude).

On obtient sur ce profil un écart type de $0,1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ autour d'une vitesse moyenne sur tous les plateaux de $1,15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Cette grandeur raisonnable amène à conclure que le traitement du poisson est quasiment le même quelque soit le plateau où il est disposé.

Néanmoins les fortes différences de vitesse (dans le cadre d'un traitement de fumage) observées sur la *figure 14* requièrent une étude d'homogénéité par plateau.

Une des priorités est aussi de cerner la zone de vitesse supérieure à $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans le chariot.

V.1.3- Localisation des maxima

On tente ici de localiser et de trouver l'origine de la zone au delà de la vitesse de $2m.s^{-1}$ qui touche les poissons.

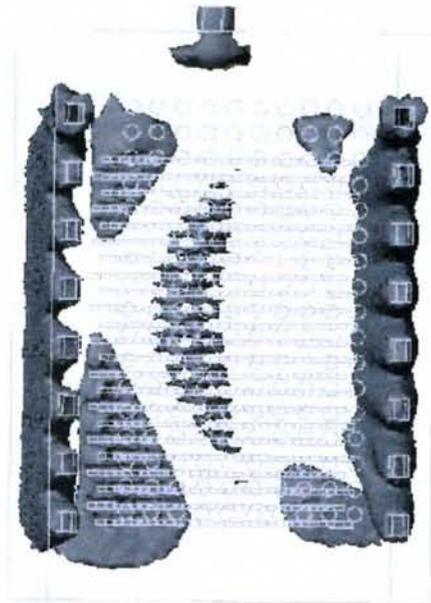


Figure 16 : iso surface à $2m.s^{-1}$

On peut constater que les zones à risques sont en forme de croissant au centre du chariot et sur les bords d'attaque coté porte. Une réflexion sur les lignes de courant apporte des éléments de réponse.

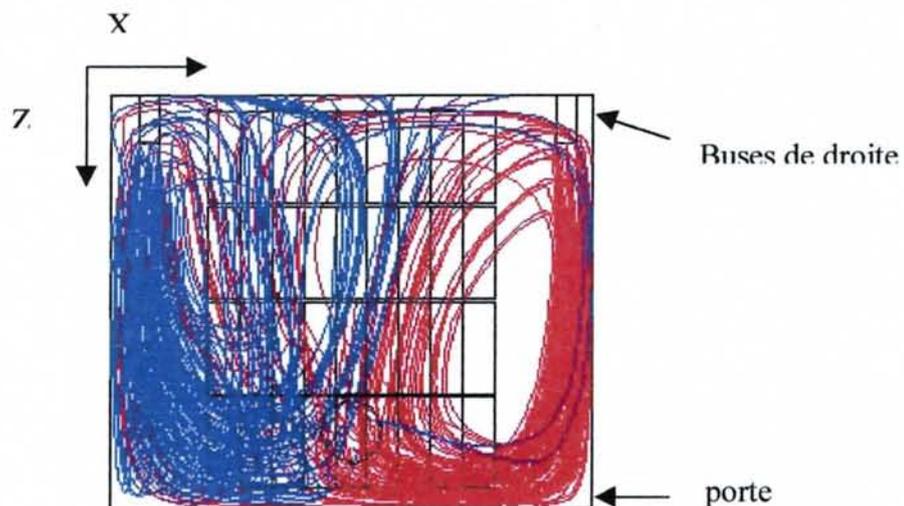


Figure 17 : lignes de courants sortant des buses d'entrée

La direction privilégiée de la vitesse sur les plateaux est suivant $-Z$, avec $U_z = -0,73m.s^{-1}$ pour une vitesse de $1,15m.s^{-1}$. Les lignes de courants des buses d'entrée vont faire impact avec la porte du fumoir pour fusionner au centre de la porte et ceci sur toute la hauteur des buses, soit la hauteur du chariot. Aux extrémités du chariot l'écoulement se disperse dans les

espaces libres du bas et du haut de la cellule. Au cœur par contre il s'engouffre entre les poissons. La zone d'impact s'étale jusqu'aux bords d'attaque du chariot créant un secteur hors norme.

Le croissant observé *figure 16* provient de la coalescence des lignes de courants au centre de la cellule, ce phénomène est accentué par la présence d'un conduit d'aération. Ces zones de vitesses élevées génèrent de forts gradients dans le chariot qui peuvent engendrer une hétérogénéité de traitement par plateau.

V.1.4- L'homogénéité de traitement dans le chariot

La notion d'homogénéité de traitement est traduite et appréciée ici par l'écart type de la vitesse du fluide porteur à la surface du produit. On évalue ainsi l'écart quadratique moyen de la vitesse sur chaque plateau. Cette grandeur traduit la dispersion de la vitesse autour de la vitesse moyenne de $1,15\text{m.s}^{-1}$ sur le produit.

Ecart type : $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_i - V)^2}{N}}$; N est le nombre de surface de calculs, V_i la vitesse moyenne sur la surface i , V la vitesse moyenne sur les N surfaces de calculs.

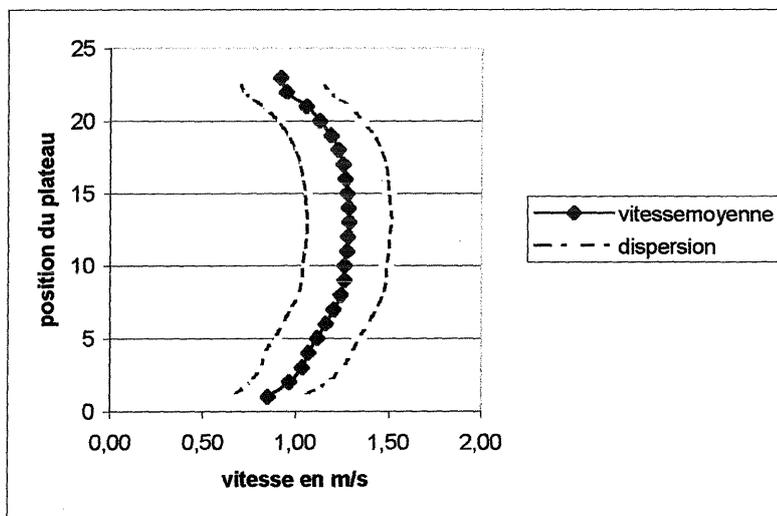


Figure 18 : dispersion (à partir de l'écart type) de la vitesse sur les plateaux.

De façon générale tous les plateaux ont un champ hétérogène centré sur une vitesse moyenne de $1,15\text{m.s}^{-1}$ et se dispersant avec un écart type de $0,40\text{m.s}^{-1}$. Le traitement n'est donc pas parfaitement uniforme sur un plateau.

V.1.5- Champ de vitesse sur un plateau

Le champ de vitesse sur les plateaux est qualitativement le même sur tout le chariot. L'illustration *figure 19* est celle du plateau 8 qui en présente des caractéristiques typiques.

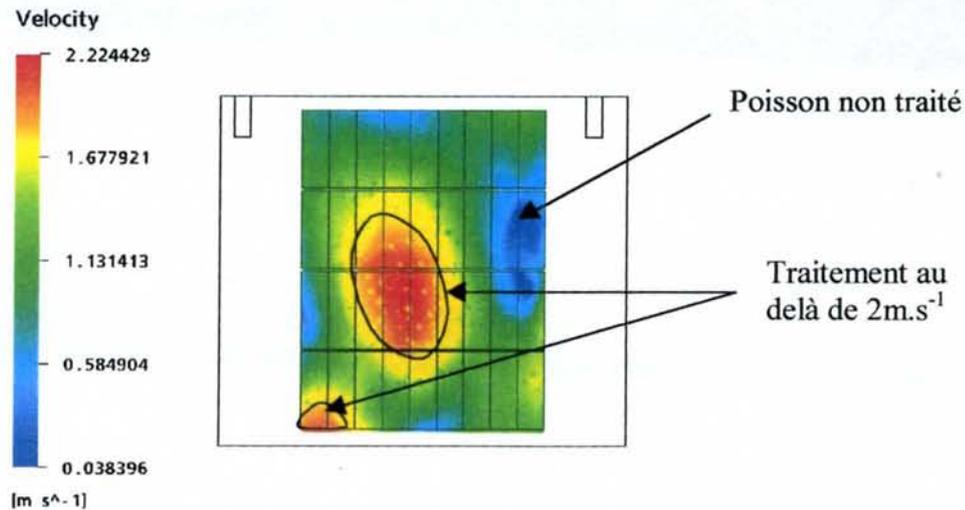


Figure 19 : champ de vitesse sur le plateau n°8

Notons que l'on visualise une vue de dessus, seul un pavé sur deux de la visualisation est concerné par ce champ.

On retrouve la zone centrale, le bord d'attaque près de la porte, lieux de vitesses élevées et le déséquilibre entre les jets, le gauche se disperse un peu sur le plateau, le droit passe tout droit, sans s'engouffrer dans le chariot créant une zone de vitesse faible.

Le traitement est on le voit encore ici hétérogène sur un plateau : le fumage est moins bon sur les bords et trop fort au centre et près de la porte. Un même poisson peut avoir une petite différence de traitement. Un poisson est ici traité inefficacement et ceux du centre le sont mais au delà de la norme : soient 5 poissons sur les 18 sont 'mal' fumés.

V.1.6- Conclusion sur le fumage en 'statique'

Globalement le traitement est homogène suivant la position du plateau mais hétérogène sur un plateau. Quelques poissons sont traités avec une vitesse supérieure à $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pour palier à ces problèmes, plusieurs solutions sur la configuration de la cellule ou sur le système de ventilation sont possibles :

- provoquer une redistribution des lignes de courant sur toute la hauteur et la largeur du chariot, en dispersant plusieurs petites aérations autour de la porte créant des zones dépressionnaires qui disperseraient l'écoulement sur la porte.
- diminuer la puissance des jets (le débit) pour limiter la force d'impact et ainsi le retour de l'écoulement dans le centre de la cellule,
- augmenter l'aspiration des trous de sortie du fond pour rediriger les lignes de courant et mieux les répartir sur le largeur
- jouer sur l'encombrement des plateaux des extrémités pour obliger l'écoulement à s'y engouffrer.

On ne peut pas combiner toutes ces modifications. Elles sont évidemment délicates à mettre en place sur une cellule déjà existante : une validation expérimentale et d'autres calculs sont indispensables. Elles doivent respecter le taux de renouvellement de la fumée dans la cellule pour assurer un fumage efficace.

V.2- Le fumage en Dynamique

Les conditions aux limites d'entrée sont fonctions du temps : deux cycles sinusoïdaux (en opposition de phase) d'une période de cinq minutes issus des mesures faites. La simulation est en transitoire, le pas de calcul est de 2s, valeur très faible par rapport au phénomène physique mais assurant un résultat très cohérent. Le résultat est une simulation de 9 minutes et 45 secondes obtenue au bout de dix jours de calculs. On a procédé à une sauvegarde des grandeurs de vitesses toutes les 25 secondes. L'exploitation est délicate, à partir de considérations sur tout le cycle on se fixera des centres d'étude :

- les plateaux caractéristiques des différents traitements dans le chariot, dont l'évolution sur un cycle traduit les spécificités de traitement,
- les temps significatifs du traitement, qui feront alors l'objet d'une étude plus complète sur les plateaux.

Ainsi on réduit l'étude aux temps et aux localisations significatives du nouveau traitement. Toutes les illustrations ne peuvent être jointes au rapport, seules les plus pertinentes le sont.

V.2.1- Les caractéristiques générales sur un cycle

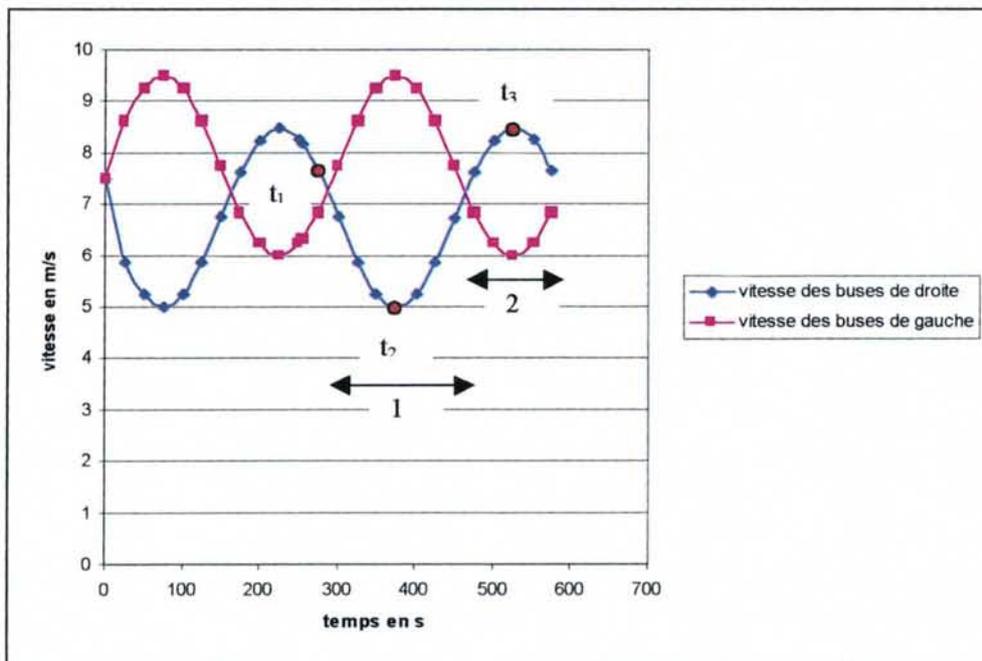


Figure 20 : cycle dynamique de ventilation avec les deux phases principales et les trois temps caractéristiques retenus pour l'étude.

D'après les observations faites sur l'écoulement dans la cellule son temps de réponse à un changement de vitesse d'entrée est très court. On note trois tendances de l'écoulement dans le fumoir. La première est le transitoire très court : au temps t_1 . La seconde est lorsque les buses de gauche deviennent l'entrée principale : au temps t_2 caractéristique de la phase 1. Quand cela bascule sur l'entrée droite, on définit le temps t_3 , caractéristique de la phase 2.

Afin de se fixer les tendances de l'écoulement on illustre le champ de vitesse en ces trois instants.

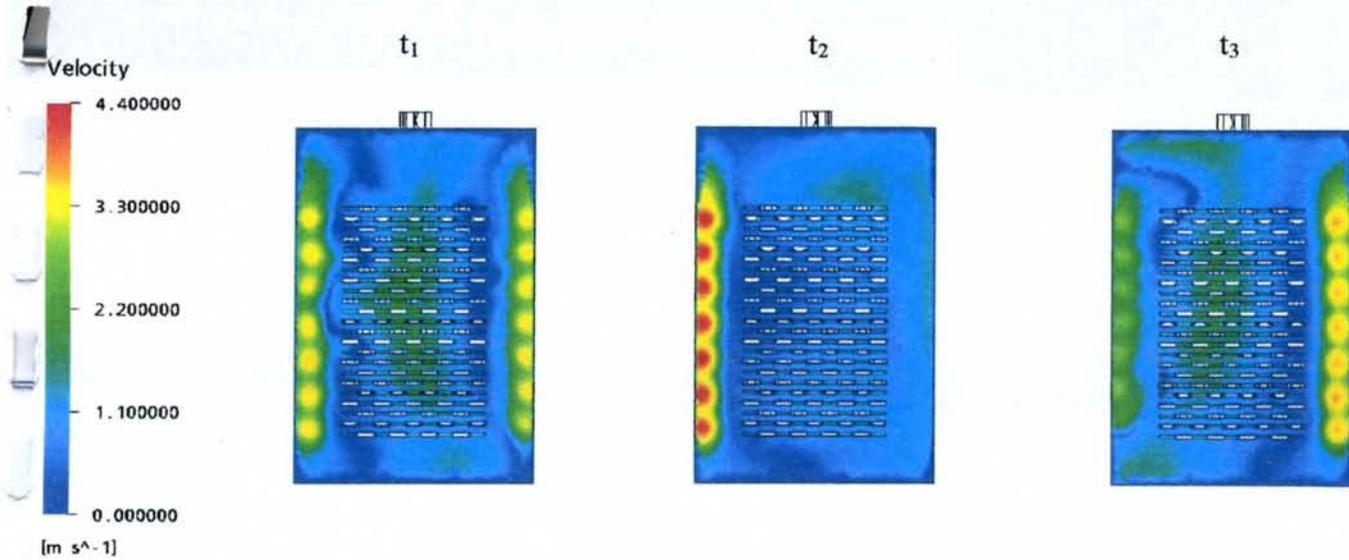


Figure 21 : plan de coupe à 60cm de profondeur aux temps t_1 , t_2 et t_3 .

Sur la *figure 21* on remarque une symétrie au moment de la transition en t_1 , lors de l'équilibre entre les entrées, cette tendance est très courte pendant le cycle. En effet 25 secondes après c'est la deuxième qui apparaît.

Par contre les deux autres en t_2 et t_3 sont constatées dès qu'il y a déséquilibre dans un sens ou dans l'autre.

La vitesse en sortie des buses de gauche est manifestement trop élevée dans la phase 1 (temps t_2). Le déséquilibre entre les buses est trop grand. Le jet principal de gauche impacte sur la porte, épouse la forme de la cellule pour finir par se disperser dans la moitié droite du fumoir, constatation corroborée par l'observation des lignes de courants.

Par contre lorsque les buses de droite deviennent le débit entrant principal : le déséquilibre entre les entrées est moins grand. En conséquence le profil est proche de celui observé en 'statique' avec les mêmes problèmes.

Notons que la vitesse est toujours plus élevée au centre de la cellule, sauf peut-être dans le phase 2. On se soucie des plateaux 1 et 11, correspondants respectivement au bas et au centre du chariot : deux plateaux significatifs des différences de traitement dans le chariot.

V.2.2- Le profil dans le chariot

V.2.2.1- Profil de vitesse des plateaux 1 et 11 au cours du cycle

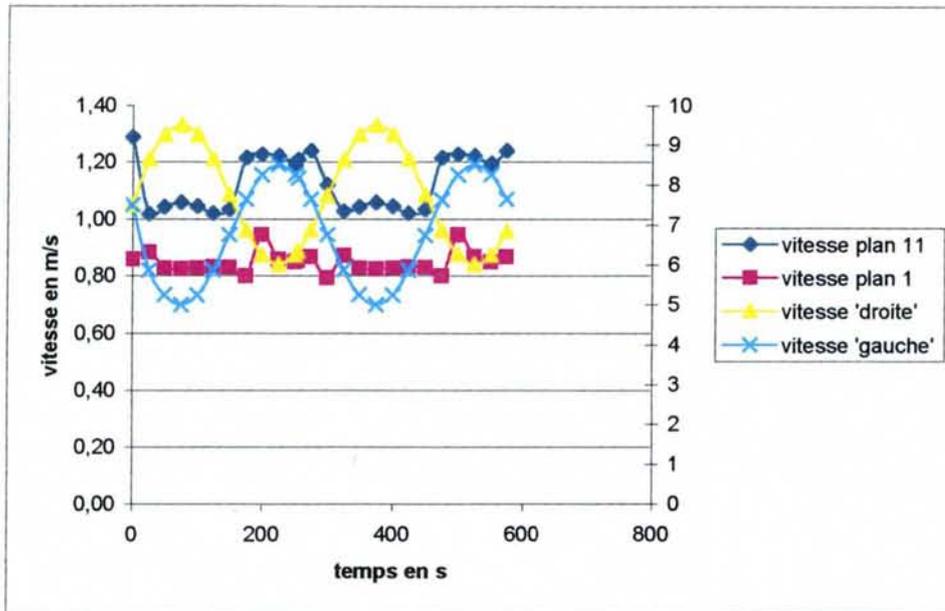


Figure 22 : vitesse moyenne des plateaux 1 et 11 au cours du processus.

La vitesse sur le plateau 1 est constante pendant le cycle autour d'une moyenne de $0,85\text{m.s}^{-1}$ suivant un écart type de $0,03\text{m.s}^{-1}$. Tandis que la vitesse du plateau 11 suit des paliers entre $1,23\text{m.s}^{-1}$ (phase 2) et $1,06\text{m.s}^{-1}$ (phase 1). Le temps de réponse au basculement des buses d'entrée est très court. On remarque que là encore trois tendances : les deux paliers et le court moment de transitoire.

On peut donc conclure sur une hétérogénéité de traitement, inhérent au processus, des plateaux du centre. Il faut maintenant s'intéresser au problème d'homogénéité de traitement dans le chariot. On appliquera l'étude aux temps caractéristiques des trois tendances t_1 , t_2 et t_3 .

V.2.2.2- Profil de vitesse dans le chariot en t_1 , t_2 et t_3

On procède à une étude de profil de vitesse dans le chariot et à une étude d'homogénéité sur plateau aux trois temps : t_1 , t_2 et t_3 .

Aucune différence notable entre le profil en 'statique' et les profils obtenus en t_1 et t_3 ne justifie le système dynamique de ventilation. En effet le profil est qualitativement le même. L'écart type moyen sur chaque plateau est dans les trois cas (t_1 , t_3 et 'statique') de $0,45\text{m.s}^{-1}$ autour d'une valeur moyenne de vitesse comprise entre $0,98\text{m.s}^{-1}$ et $1,15\text{m.s}^{-1}$. On observe aucune amélioration sur l'homogénéité du traitement sur ces deux points du cycle. On peut conclure que la phase 2 et le transitoire n'atteignent pas les objectifs souhaités, à savoir une meilleure répartition de l'écoulement sur les plateaux.

Le profil obtenu en t_2 est identique, seuls les grandeurs sont modifiées: écart type de $0,60\text{m.s}^{-1}$ autour d'une vitesse moyenne de $0,98\text{m.s}^{-1}$. La phase 1 correspond à un traitement encore plus hétérogène des plateaux.

Lorsqu'il y a un gros déséquilibre entre les débits entrants (phase 1), le traitement est plus hétérogène par plateaux. La balance est rétablie en phase 2, les caractéristiques de l'écoulement sur les plateaux sont proches de celles du traitement statique, i.e: plus homogènes par plateau que dans la phase précédente. Le fumage est le même suivant la position du plateau dans le chariot mais toujours pas uniforme par plateau. Il devient médiocre en phase 1.

Si le régime dynamique n'améliore pas la qualité du traitement en chaque instant il peut néanmoins jouer sur les maxima supérieurs à 2m.s^{-1} .

V.2.3- Localisation des maxima pendant un cycle

La zone concernée par des vitesses supérieures à 2m.s^{-1} est toujours visualisée toutes les 25s à l'aide d'une iso surface de 2m.s^{-1} , contenant les vitesses supérieures. On s'arrêtera sur les visualisations caractéristiques des phénomènes observés.

On résume donc les différentes étapes du mouvement de cette iso surface à partir du début de la phase 1 :

- dans un premier temps la zone hors norme est localisée coté droit sur toute la hauteur de chariot près de la porte,
- puis elle s'étale sur toute la largeur de la cellule atteignant une profondeur de 15cm dans le chariot soit une demie longueur de poisson : point t_2 *figure 23*,
- Elle se rétracte sur la droite et naît une deuxième zone à gauche : on bascule sur la phase 2
- Le secteur diminue sur les bords d'attaques du chariot près de la porte, le croissant observé en statique apparaît à l'instant t_3 *figure 23*.
- Cette zone centrale grossit, le secteur sur le bord droit près de la porte persiste
- Enfin le croissant atteint sa taille maximale et renaissent les zone des bords d'attaque en t_1 *figure 23* : on passe en phase 1.

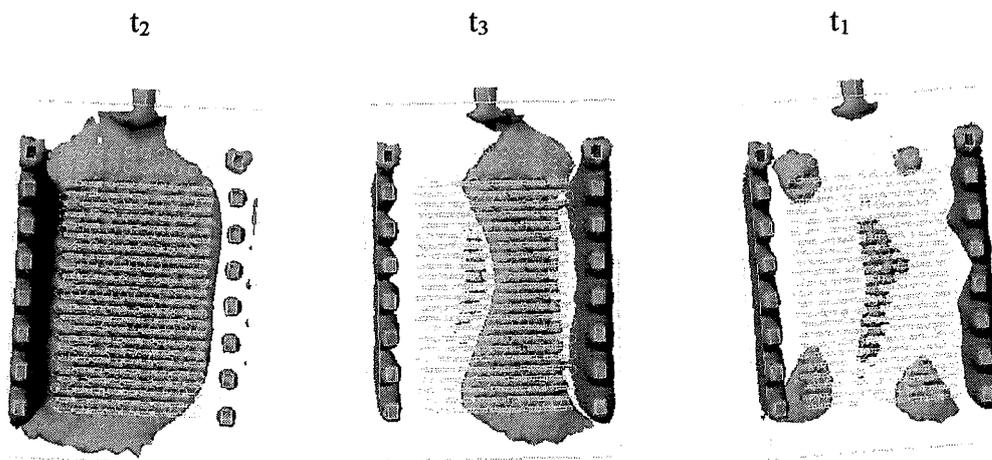


Figure 23 : iso surface à 2m.s^{-1} en t_2 , t_3 et t_1 (vue du fond)

Au final sur le cycle un plus grand nombre de poissons sont traités à un moment ou à un autre au delà de la norme fixée : si ce ne sont pas ceux collés à la porte ce sont ceux au centre du chariot. L'iso surface se déplace beaucoup pendant le cycle : les poissons traités au delà des $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ sont différents au cours du cycle.

V.2.4- Champ de vitesse du plateau 11 pendant le cycle

Le champ de vitesse change très peu au cours du cycle, là encore on peut caractériser les deux tendances sur les deux phases aux instants t_2 et t_3 .

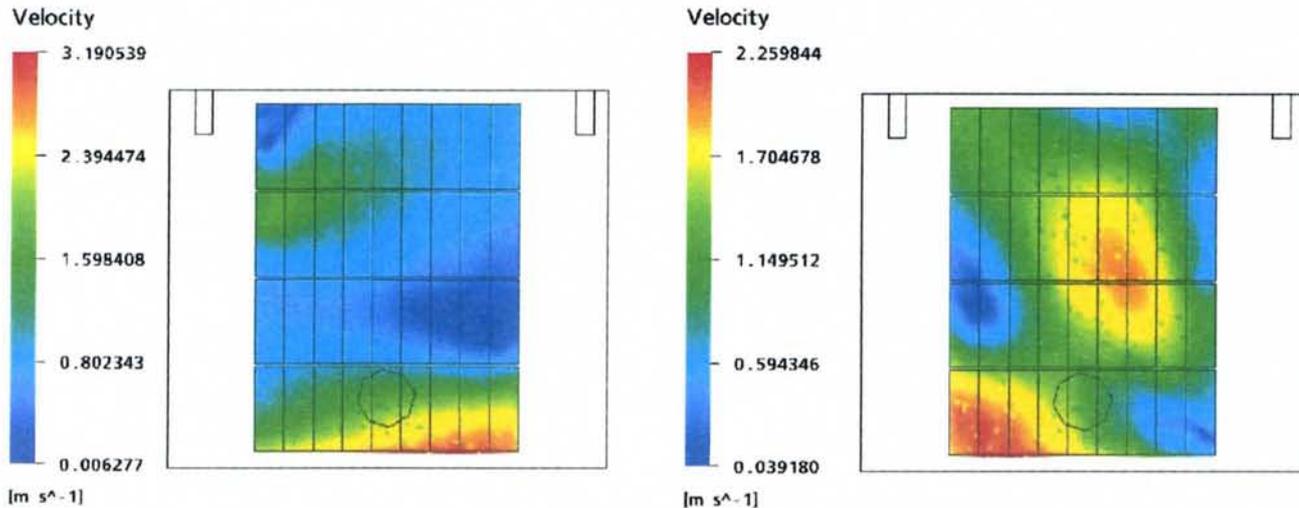


Figure 24 : Champ de vitesse sur le plateau 11 en t_2 (phase 1) et t_3 (phase 2)

Là encore il ne faut considérer qu'un pavé sur deux comme poisson disposé sur le plateau.

En t_2 , les poissons près de la porte sont soumis à des vitesses trop grandes. Le traitement est inefficace sur un grand nombre d'entre eux où la vitesse ne dépasse pas les $0,5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

En t_3 , le champ est plus homogène mais reste hors norme au centre et près de la porte. Peu de produit n'est pas fumé à cet instant.

La phase 1 montre de grosses hétérogénéités de fumage. La phase 2 a un champ plus régulier très proche de l'ancien procédé. Les poissons qui n'étaient pas fumés précédemment le sont maintenant.

En moyenne l'hétérogénéité est quantitativement la même sur les deux phases, mais elle se traduit un peu différemment sur chaque plateau.

Pour bien saisir le traitement du poisson sur le cycle, on moyenne le champ de vitesse du plateau 11 (représentatif du traitement fait dans le chariot) sur un cycle (de t_1 à la fin de la simulation).

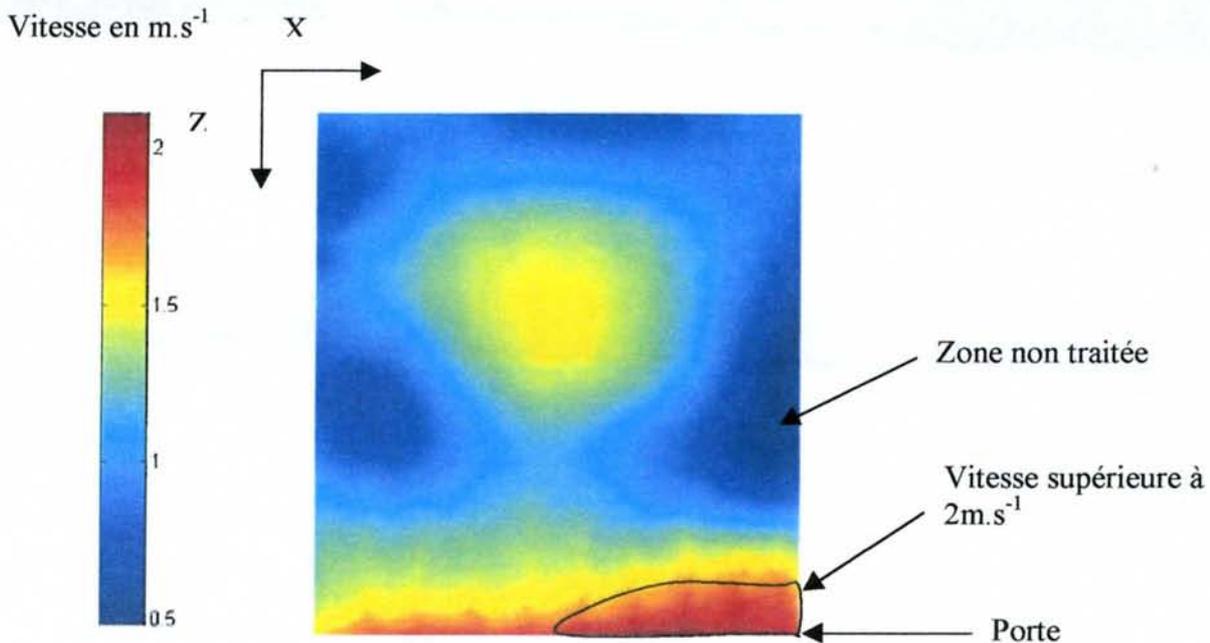


Figure 25 : champ moyen du plateau 11 sur un cycle de t_1 jusqu'à la fin de la simulation.

Au fond du plateau ce sont les tendances de la phase 2 plus fortes dans ces zones qui l'emporte sur tout le cycle. Au niveau de la porte d'entrée c'est la puissance des jets de gauche dans la phase 1 qui ressort ici.

Tous les poissons concernés par des vitesses d'écoulement entre 0,8 et 1,5 $m.s^{-1}$ sont considérés comme fumés correctement, soient ici les $\frac{3}{4}$ des poissons disposés sur le plateau. Il reste ensuite ici un poisson pour lequel le traitement est inefficace (milieu bord droit) et les cinq poissons près de la porte qui eux sont fumés avec une vitesse au delà de $2m.s^{-1}$ (cf. *figure 25*).

V.2.5- Conclusion sur le fumage en 'dynamique'

La mise en place d'un système dynamique d'aération n'est à l'issue de cette étude numérique pas complètement justifiée. Un régime dynamique ne joue pas en faveur d'un traitement plus uniforme en chaque instant du cycle et augmente le nombre de poissons touchés par un traitement hors norme à un moment du cycle. Toutefois l'objectif du dynamique est de faire un traitement homogène sur le temps. Ces imperfections ponctuelles de traitement ne constituent donc pas un gros défaut.

Sur le temps la majorité des poissons est correctement traitée. En effet, un poisson ne sera pas soumis à un écoulement de $2m.s^{-1}$ plus d'une minute par cycle alors qu'en statique il le serait pendant les 5 minutes. Au final seuls les poissons près de la porte sont concernés par ce traitement, en statique ils sont au centre et près de la porte : une zone à risque a été éliminée par le passage en dynamique. Enfin, un poisson traité inefficacement en phase 1 sera correctement traité en phase 2, somme toute le nombre de poissons mal fumé est le même qu'en statique.

Au final les deux phases du traitement sont complémentaires et assurent une qualité de fumage plus uniforme sur les poissons *figure 25*. Sur un cycle il subsiste une zone de forte vitesse près de la porte mais plus au milieu. Quelques changements peuvent améliorer le

processus dans cette configuration. Il suffirait de diminuer le déséquilibre entre grandeur de débit d'entrée en jouant sur la position du clapet pour éliminer le secteur critique près de la porte et de diminuer la puissance des jets (le débit). Celle-ci on l'a vu, ne doit pas être trop réduite car une trop faible vitesse de jet génère une plus grande hétérogénéité de traitement (phase 1).

Avec ces changements mineurs ce procédé deviendrait plus efficace que le précédent. L'ancien procédé par son caractère stationnaire assure le même traitement pendant 4 heures, alors que le 'dynamique' traite différemment les poissons en chaque instant du cycle.

Si les zones qui à l'issue de cette étude sont concernées par un écoulement supérieur à 2m.s^{-1} s'avèrent ne pas l'être après validation expérimentale, elles constituent néanmoins des zones à risque et des sources d'hétérogénéité de traitement.

Les zones d'hétérogénéité de traitement sont les mêmes en statique et en dynamique. Dans un souci d'optimisation de temps de calcul les modifications qui peuvent être apporter au processus actuel (le dynamique) pourront être simuler avec des conditions aux limites constantes. Des études de sensibilités, à la vitesse (plus complète que celle proposée) en respectant le taux de renouvellement, à la taille de l'aération, à la position de l'évacuation, à l'encombrement, à une accélération du cycle après rééquilibrage : même si le transitoire n'apporte pas dans les conditions actuelles des éléments de réponses, il peut s'avérer être bénéfique à un meilleure répartition de l'écoulement

VI Le séchage

Le séchage s'effectue dans la même cellule et dans les mêmes conditions que le fumage, on peut aisément faire la même étude. La seule différence est l'absence de l'évacuation du haut. On travaille sur la géométrie 'pavés déphasés' avec $7,5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ en entrée et $0,8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ en sortie.

VI.1- Caractéristiques principales du champ de vitesse

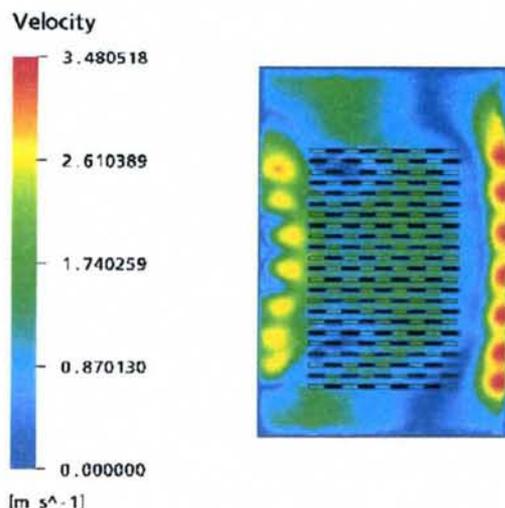


Figure 26 : champ de vitesse à 60cm de profondeur

Le champ obtenu est très proche de cellule avec l'aération cf V.1.2. Une différence est notable sur les jets de gauche. Ceux placés au centre sont déviés vers la droite et diffuse dans le chariot. Sans la dépression lié à l'aération, le phénomène dépressionnaire lié à la puissance des jets de droite s'intensifie. Les valeurs sont du même ordre que dans V.1.2 *figure 15*.

VI.2- L'homogénéité de traitement dans le chariot

Dans le cas du séchage, on obtient un écart-type moyen sur chaque plateau de $0,45\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ autour d'une vitesse moyenne de $1,02\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Sur un plateau l'écoulement est hétérogène. Par contre l'écart type de la vitesse moyenne dans le chariot (calculé sur les vitesses moyennes des 23 plans) est de $0,07\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, on a donc une homogénéité de l'écoulement suivant la hauteur du chariot.

La direction privilégiée du champ de vitesse sur chaque plateau reste suivant $-Z$ avec $U_z = -0,50\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ pour une vitesse moyenne de $0,54\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, la composante U_y est nulle.

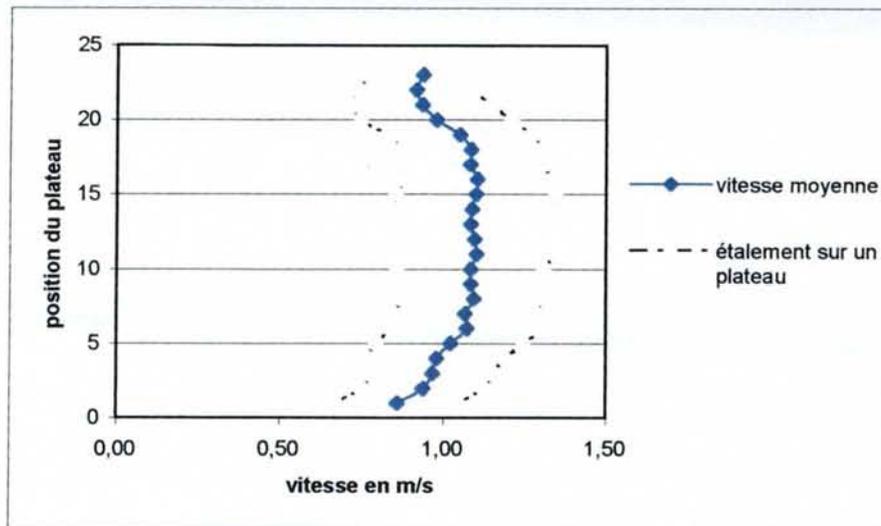


Figure 27 : dispersion de la vitesse sur les plateaux

Ainsi suivant la position du plateau le traitement est le même, mais le traitement n'est pas le même suivant l'emplacement du poisson sur la grille. Les conclusions sont les mêmes que pour le fumage. Toutefois la vitesse moyenne sur les plateaux est plus faible ce qui implique des zones où le séchage est moins efficace ou alors une zone de vitesse élevée réduite.

VI.3- Les maxima

Sur chaque plan d'étude, il existe une zone où la vitesse dépasse $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, en moyenne le pic atteint $2,3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Rappelons qu'un plan d'étude contient 18 poissons. L'écart type étant de 0,44 autour d'une vitesse moyenne de 1,03, la zone hors norme ($2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) est très petite.

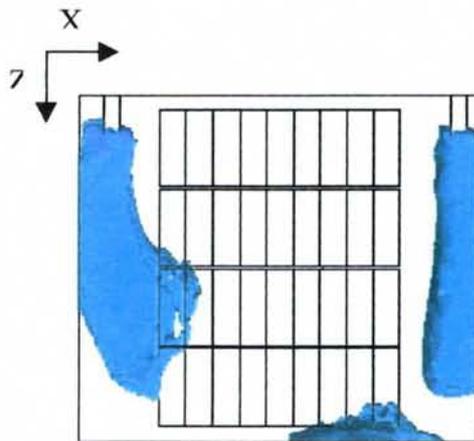


Figure 28 : isosurface à $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ vue de dessus

La localisation des vitesses critiques se trouve :

- sur les bords d'attaque du côté droit de la porte : zone d'impact des jets de droite,
- au milieu du côté gauche du chariot : zone de dispersion des jets du milieu gauche.

Cela concerne une vingtaine de poissons sur les 414 disposés.

VI.4- Champ de vitesse sur un plateau

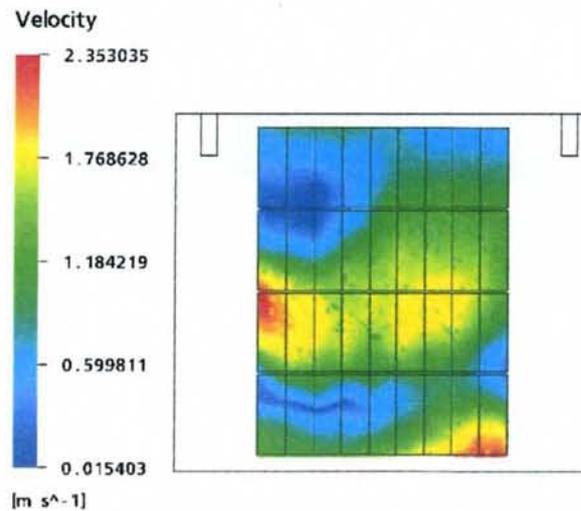


Figure 29 : Champ de vitesse du plateau 11

Le traitement est cohérent pour la majorité des poissons. Sur ce plateau de 18 poissons seuls trois sont vraiment soumis à un séchage inefficace ou hors norme.

VI.3- Conclusions sur le séchage

On a dans les chiffres les mêmes problèmes d'hétérogénéité sur un plateau que dans le fumage, mais une bonne homogénéité dans tout le chariot. Toutefois les hétérogénéités de traitement sont très localisées sur les plateaux, le nombre de poissons soumis à un traitement médiocre est au final de 10% : aucune comparaison avec le fumage. La norme de $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ est respectée sur la majeure partie des poissons. Les possibilités d'amélioration du procédé sont similaires à celles du fumage :

- diminuer légèrement les débits d'entrée : une diminution de $0,5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ suffirait cf. IV.3 (sens vitesse)
- augmenter l'aspiration du fond : toujours pour rediriger les lignes de courant parallèlement aux côtés de la cellule.

Le taux de renouvellement n'est plus ici une contrainte.

Conclusion

Le procédé traditionnel de fumage traditionnel est une technique ancienne de traitement de poissons, qui n'a jamais fait l'objet d'études approfondies. Le rôle de gestion et de développement de ces techniques par l'IFREMER l'engage à optimiser le procédé traditionnel.

L'objectif du travail présent était de démarrer une modélisation du procédé de fumage traditionnel dans le but de maîtriser les phénomènes en présence. Aux cours de ces travaux préliminaires, plusieurs simulations numériques ont fourni des informations générales sur l'écoulement.

Elles ont aussi permis de conclure sur une meilleure utilisation de la cellule. En effet la cellule fonctionne de façon optimale à condition d'être en pleine charge, une charge supérieure à 50% peut améliorer la qualité de l'écoulement horizontal, avec une répartition uniforme des poissons en quinconce.

Cette étude a cerné les défauts du traitement : hétérogénéité et dépassement des normes (trop forte vitesse en surface).

La régularité du traitement est difficile à atteindre. Cette étude numérique est basée sur des conditions de fumage extrêmes : volets d'aspiration du dessus à son ouverture maximale. Elles sont éloignées des conditions usuelles et cela dans le but de dégrossir la problématique du fumage. Les conclusions sont toutes aussi extrêmes : l'utilisateur de la cellule a un savoir-faire qui permet déjà une amélioration du fumage, sur l'ouverture du volet d'aération et le temps de fumage par exemple. Néanmoins des améliorations sont possibles quant à l'obtention d'un écoulement horizontal sur le produit plus homogène et à l'élimination des zones à 'risque' concernées par des vitesses d'écoulements supérieures à 2m.s^{-1} .

Les transformations ne sont concevables que sur le procédé dynamique de fumage. On n'a pas ici la prétention de modifier le procédé. Des évolutions à longs termes de la cellule peuvent être envisagées :

- la création de nouvelles aérations,
- le rétablissement de l'équilibre entre les buses d'entrée par une meilleure distribution de la fumée sur les buses,
- une augmentation de l'aspiration du fond.

Les problèmes sont similaires dans le cas du séchage mais moins conséquents, si l'on parvient à un meilleur fumage, l'amélioration du procédé séchage suivra.

Avant d'envisager tout cela une validation expérimentale et de nouveaux calculs sont nécessaires. Une campagne de mesure devrait être mise en place en 2003. Une thèse CIFRE en partenariat avec un industriel du fumage concernera le fumage et le séchage. Elle fera l'objet de nouvelles simulations numériques et d'une validation expérimentale. On déduit du travail présent de nouveaux axes d'étude en vue d'éventuelles modifications du procédé. Cette première modélisation du fumoir pourra servir de base aux futures études numériques et à la prochaine campagne de mesures.

Les nouvelles simulations tenteront de modéliser la fumée (tentative soldée par un échec avec CFX.5), de tester de nouvelles aérations et une étude plus complète de sensibilité à la vitesse.

Références bibliographiques.

- [1] **C.Knockaert**. Industrialisation du procédé de salage séchage fumage en continu, *rapport interne Ifremer*, 2000. Brevet N°9208958 Ifremer/Cirad
- [2] **C. Knockaert**. Le fumage de poisson, *Edition Ifremer*, 1990.
- [3] **M. Sainclivier**. L'industrie alimentaire halieutique, *bulletin scientifique et technique de l'école nationale supérieure agronomique et du centre de recherches de Rennes*, 1983.
- [4] **J. S. Rho and H. S. Ryou**. A numerical study of atrium fires using deterministic models, *Fire Safety Journal*, Volume 33, Issue 3, October 1999, Pages 213-229
- [5] **H. Xue, J. C. Ho and Y. M. Cheng**. Comparison of different combustion models in enclosure fire simulation, *Fire Safety Journal*, Volume 36, Issue 1, February 2001, Pages 37-54
- [6] **Djamel Lakehal**. On the modelling of multiphase turbulent flows for environmental and hydrodynamic applications, *International Journal of Multiphase Flow*, Volume 28, Issue 5, May 2002, Pages 823-863
- [7] **V. Novozhilov**. Computational fluid dynamics modelling of compartment fires, *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 27, Issue 6, 2001, Pages 611-666
V. Novozhilov
- [8] **Philipp Adomeit and Ulrich Renz**. Deposition of fine particles from a turbulent liquid flow: experiments and numerical predictions, *Chemical Engineering Science*, Volume 51, Issue 13, July 1996, Pages 3491-3503
- [9] **L.Pottier**. Procédé de fumage électrostatique : caractérisation de la fumée, *rapport DEA ENITLAA/Ifremer*, juillet 2002.
- [10] **A. Renoux, Boulaud**. Les aérosols, physique et métrologie, *Lavoissier*, 1998, Pages 37-47
- [11] **Hamid Arastoopour**. Numerical simulation and experimental analysis of gas/solid flow systems: 1999 Fluor-Daniel Plenary lecture, *Powder Technology*, Volume 119, Issues 2-3, 24 September 2001, Pages 59-67
- [12] **H.Lübcke, St.Schmidt, T.Rung,F.Thiele**. Comparison of LES and RANS in bluff-body flows, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 89, 2001, 1471-1485.
- [13] Documentation de CFX.5 2001

ANNEXE N°1

Le modèle k-ε

La quantité de mouvement intègre la turbulence, on y introduit une viscosité effective μ_{eff} :

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) = \nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) + B \quad (1)$$

B étant la somme des forces extérieures.

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k \quad (2)$$

On introduit la viscosité turbulente :

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3)$$

$$\text{avec } \mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

C_μ est une constante. On déduit k et ε des équations différentielles de transport.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) - \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \nabla k \right) = P_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) - \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) = \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (6)$$

Avec P_k le terme de production turbulente :

$$P_k = \mu_t \nabla U \cdot (\nabla U + \nabla U^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U (\mu_t \nabla \cdot U + \rho k) \quad (7)$$

ANNEXE N° 2

Détails de la géométrie

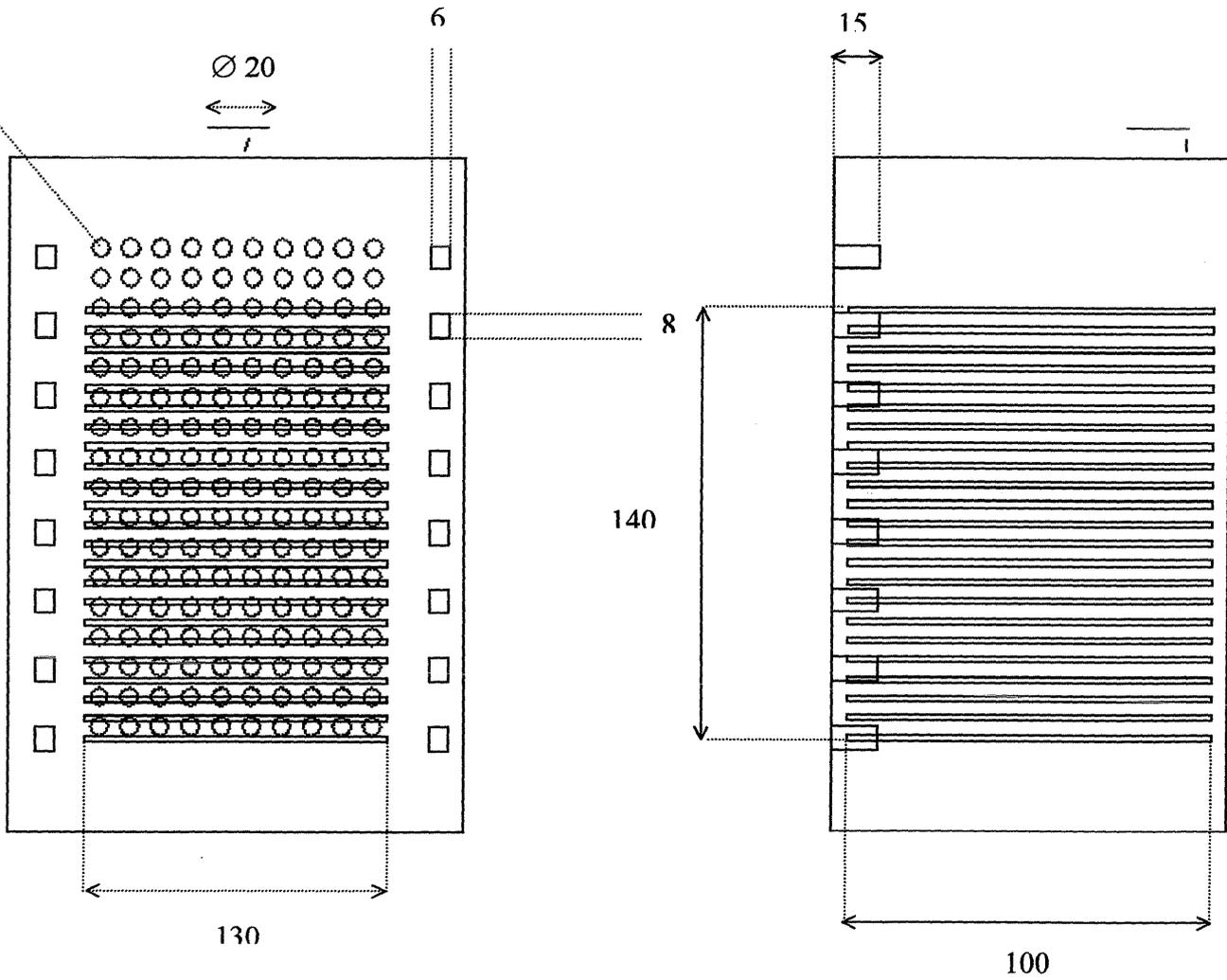


Figure 1 : plan de face de la cellule de fumage (cotes en cm)

Figure 2 : vue de droite

ANNEXE N° 3

Modèle de turbulence dans la couche limite :

Un des problèmes importants pour obtenir un écoulement turbulent cohérent est le traitement numérique des équations près des murs. On y détermine la contrainte de cisaillement du au mur et le développement de couche limite.

Ces zones sont lieu de forts gradients de vitesse dépendants des effets visqueux, importants ici, et de variations rapides des grandeurs de l'écoulement.

On utilise pour ce modèle une fonction pariétale, introduite par des formules empiriques qui sont appliquées au voisinage des parois. Cette méthode augmente peu le temps de calcul, évite de prendre en compte les effets visqueux dans le modèle de turbulence de l'écoulement et traduit bien les variations rapides dans la zone.

L'expérience montre que ces régions peuvent être décomposées en deux couches :

- La couche visqueuse où la viscosité moléculaire joue un rôle dominant dans l'équation de mouvement.
- La couche turbulente (complètement développée-elle) où turbulence et viscosité sont d'égale importance.

Un profil logarithmique approxime raisonnablement la distribution de vitesse aux parois. La composante du tenseur des contraintes dues au cisaillement pariétale est fonction de la vitesse à une distance donnée du mur.

Ainsi dans CFX ce modèle est choisi par l'option *scalable wall function*, cela correspond à la fonction utilisée dans le cas de modèles basés sur une équation en ϵ .

La formulation mathématique est donc la suivante :

$$u^+ = \frac{U_t}{u_\tau} - \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + C \quad (1)$$

$$y^+ = \frac{\rho \Delta y u_\tau}{\mu} \quad (2) \quad u_\tau = \left(\frac{\tau_w}{\rho} \right) \quad (3)$$

u^+ : vitesse pariétale en $m.s^{-1}$

u_τ : vitesse de cisaillement en $m.s^{-1}$

U_t : vitesse tangentielle à la paroi en $m.s^{-1}$

Δy : distance au mur en m

y^+ : nombre adimensionné traduisant la distance au mur

τ_w : composante pariétale du tenseur des contraintes

κ : constante de Von Karman

C : constante dépendant de la rugosité

La fonction paroi intervient lorsque U_t tend vers zéro. Dans la région logarithmique, une vitesse scalaire u^* est utilisée à la place de u^+ .

$$u^* = C_{\mu}^{1/4} \kappa^{1/2} \quad (4)$$

Ce scalaire ne tend pas vers zéro près de la paroi.

$$\text{On a : } \tau_w = \tau_{\text{visc}} \left(\frac{y^*}{u^*} \right) \quad (5) \quad \tau_{\text{visc}} = \frac{(\mu U_t)}{(\Delta y)} \quad (6) \quad y^* = \left(\frac{\rho u^* \Delta y}{\mu} \right) \quad (7)$$

Les prédictions du modèle dépendent de la location du point de calcul par rapport au mur et est donc sensible au maillage. Dans ce cas affiner le maillage ne donne pas toujours de meilleurs résultats.

L'idée de base derrière ce modèle est que la surface coïncide avec la limite de la couche visqueuse, soit $y^+ = 11$, soit encore l'intersection entre le profil log et le profil linéaire. Le calcul de y^+ est autorisé jusqu'à cette limite. Pour ce calcul dans $y^+ < 11$, les résolutions de k et ϵ dérivent. Pour parer le problème on remplace :

$$y^+ = y \frac{\rho}{\mu} u^+ \quad (8)$$

Ainsi très proche du mur le profil devient linéaire : zone de couche visqueuse où $u^+ = y^+$.

ANNEXE N°4

Les pas de temps : paramètre accélérateur de convergence

Le pas de temps physique

Cette valeur est une grandeur d'échelle de temps, typiquement la longueur sur la vitesse. Pour l'écoulement étudié à advection dominante, cette valeur est difficile à trouver, puisque l'on n'a pas vraiment de champ dominant. Mais c'est le pas le plus adapté à une stabilisation. Sa valeur optimale n'est pas évidente à trouver.

Les premiers calculs ont été faits avec un pas assez grand, que l'on réduit, par un facteur de deux par exemple, dès que le résidu augmente. Un pas trop petit provoque une convergence trop lente, voire même l'arrêt de la résolution (ratio entre résidus à 1). Ainsi une simulation stationnaire sur une telle géométrie et avec de gros maillages requière l'utilisation de plusieurs pas avant d'atteindre les critères de convergence. Notons qu'un pas de temps physique plus petit est nécessaire en cas de maillage médiocre (ratio entre éléments élevés), cas de la géométrie avec grilles.

Typiquement dans l'étude on utilise un pas plus faible, de l'ordre de $10^{-2}s^{-1}$ pour les équations de la masse et le modèle de turbulence. Le pas apprêté à la quantité de mouvement est en général plus élevé, de l'ordre de la seconde, et constitue le paramètre sur lequel il faut jouer le plus, les autres pas sont modifiés dans une optique de rééquilibrage.

Le pas physique calculé par le solveur

Le solveur de CFX.5 est capable d'estimer l'ordre de grandeur du pas physique. L'information est pratique dans le cas d'une nouvelle simulation sur un nouveau maillage ou avec de nouvelles conditions aux limites. Ce pas est souvent plus faible que le pas optimal.

Le facteur de pas local (Local Timestep factor)

Cette option autorise plusieurs pas suivant les régions du domaine. La valeur affectée multiplie la pas physique de l'éléments : des pas donc plus petits dans des zones d'écoulements lents, et localement plus grands dans les zones d'écoulements rapides. En général on commence par un pas assez grand. Donc dans le cas de grosses instabilités dans les cinquante premières itérations, la mise en place hétérogène du champ, cette option facilite le calcul. Il vaut mieux commencer par un facteur de 10 et aller en décroissant jusqu'à 5 si nécessaire.

Il ne sert qu'à amorcer la résolution, il faut finir le calcul avec un pas de temps physique pour être sûr de ne pas obtenir que le champ 'local'.

Le pas de temps dans un calcul instationnaire

En transitoire on fixe le pas de temps et le nombre d'itérations par pas, en général fixé à trois. La définition du pas est physique, il doit être caractéristique de l'échelle de temps du phénomène. Un grand nombre d'itérations par pas n'améliore pas forcément le calcul, il vaut mieux diminuer le pas de temps. Notre étude en dynamique a été faite avec un pas de l'ordre de la seconde.

ANNEXE N°5

Champ de vitesse suivant de plan de coupe XY en Z=0.6m

(Notons que la même échelle est utilisée pour les différents champs visualisés ici)

