Simulation aux Grandes Echelles de l'écoulement d'air autour d'une aube fixe de turbine
- Comparaison des codes AVBP et elsA -

Thomas LEONARD
stage d'application
MATMECA

Tuteurs : Laurent Gicquel et Nicolas Gourdain

CERFACS

Contents

Résumé **3**

Introduction **3**

1 Présentation du CERFACS et des ressources disponibles **4**
1.1 Présentation du CERFACS : Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique . . . 4
1.2 Présentation du code AVBP . . . 4
1.3 Présentation du code elsA . . . 4

2 Principe de la Simulation aux Grandes Echelles (SGE) **5**
2.1 Formalisme de la SGE . . . 5
2.2 Présentation des modèles de sous mailles les plus courants . . . 5

3 Cadre de l'étude **7**
3.1 Thématique des turbomachines . . . 7
3.2 Configuration expérimentale de référence . . . 7
3.2.1 Géométrie . . . 7
3.2.2 Conditions physiques de simulation et expérimentales . . . 9
3.2.3 Topologie de l'écoulement . . . 10
3.3 Données expérimentales disponibles . . . 11

4 Principaux résultats **12**
4.1 Etude de l'influence des différents paramètres numériques : mise en place des simulations obtimales 12
4.2 Mise en évidence de l'apport de la SGE . . . 13
4.2.1 Champs moyens . . . 13
4.2.2 Comparaisons instationnaires . . . 15

Conclusion **18**

References **19**

Résumé

La Simulation aux Grandes Echelles (SGE ou LES en anglais pour Large Eddy Simulation), en simulant une partie du spectre turbulent, permet de réaliser des simulations instationnaires des grandes structures turbulentes, contrairement au RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) qui, modélisant l'integralité du spectre turbulent, est généralement utilisé dans un contexte industriel pour la recherche de solutions stationnaires. D'où l'intérêt de la SGE pour des applications telles que les écoulements dans des turbines.

Par conséquent l'objectif du stage à été de comparer sur le cas d'une pâle fixe les performances de deux codes SGE dévelopés au CERFACS:

- AVBP qui est un code non structuré orienté mécanique des fluides réactifs et qui n'est pas encore validé en aérodynamique pure, et
- elsA qui est un code structuré multi-blocs orienté aérodynamique mais dont les fonctionnalités SGE sont moins étendues que celles d'AVBP.

Introduction

Avec la constante évolution des moyens de calculs disponibles arrive la possibilité d'utiliser des technologies de plus en plus avancées et couteuses en terme de puissance de calcul afin de décrire numériquement de façon plus précise des écoulements d'une grande complexité tel que les écoulements se développant au sein des turbomachines. L'objectif d'une telle avancée technologique est d'augmenter la part de la simulation numérique dans le mécanisme de conception industrielles. En effet, le but est d'obtenir une richesse et une précision de plus en plus importantes des résultats de modélisations numériques afin de pouvoir être non plus seulement reproductif par rapport aux expériences, mais prédictif, pour pouvoir être inclu dans les chaînes de conception et plus uniquement comme un outil de vérification. Contrairement au RANS plus courament utilisé, la Simulation aux Grandes Echelles, en prenant en compte le développement des phénomènes instationnaires essaye de répondre à un besoin réel des industriels de mieux comprendre les phénomènes complexes pouvant apparaitre dans une turbomachine.

De plus, le CERFACS se trouve lui aussi devant une problématique stratégique d'utilisation des codes de simulations numériques disponibles. En effet, deux outils sont actuellement utilisés : elsA, qui est couramment utilisé pour la simulation aérodynamique dans les machines tournantes (compresseurs et turbines) et l'aérodynamique externe, et AVBP qui est quant à lui plus utilisé pour la simulation réactive des chambres de combustion. Cependant, les présentes avancées dans la conception des moteurs nécessites non plus le traitement séparé de chaque composant, mais une simulation des interactions existant entre chacun. Par conséquent, le couplage entre les deux précédents codes apparaît nécessaire. Il faut alors déterminer la répartition des taches pour chacun, et pour des zones telles que le distributeur haute pression (DHP) se trouvant en sortie de chambre de combustion se pose la question du choix du code. C'est dans ce cadre complexe que se place l'étude suivante ayant pour but de déterminer les capacités de chacun des codes à traiter une telle configuration et évaluer leur précision sur ce cas largement documenté et doté d'un nombre conséquent de données expérimentales.

1 Présentation du CERFACS et des ressources disponibles

1.1 Présentation du CERFACS : Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique

Le CERFACS est un centre de recherche ayant pour but de dévelloper des méthodes avancées pour la modélisation et la simulation numérique pour un large domaine de problématiques scientifiques et technologiques d'intérêt autant pour la recherche que pour l'industrie.

Le CERFACS est détenu par sept actionnaires : le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales), EADS (European Aeronautic Defence and Space Company), EDF (Electricité de France), Météo France, l'ONERA (Office national d'études et de recherches aérospatiales), SNECMA (Société Nationale de Construction de Moteurs d'Aviation) et Total.

Environ 110 personnes travaillent au CERFACS, dont environ 90 ingénieurs et chercheurs originaire de dix pays différents. Les activités du CERFACS se décomposent en sept principales dominantes : Algorithmique parallèle, couplage de code, aérodynamique, combustion, climatologie et environnement, assimilation de donnée et enfin éléctromagnétisme.

En particulier, le CERFACS dévellope activement les codes AVBP et elsA :

- A Virtual Burner Project : AVBP représente un des codes CFD (Computational Fluid Dynamics) les plus avancés pour la simulation numérique de turbulence instationnaire d'écoulements réactifs,
- Ensemble Logiciel pour la Simulation Aérodynamique : elsA est un code développé en collaboration avec l'ONERA et Airbus France pour la simulation numérique de problématiques aérodynamique.

Ces deux codes sont largement exploités pour la recherche comme pour la recherche appliquée à fins industrielles.

1.2 Présentation du code AVBP

AVBP est un code de simulation numérique parallèle résolvant les équations de Navier-Stokes laminaires et turbulentes en deux et trois dimensions sur des maillages non structurés et hybrides. Bien que initialement conçu pour la simulation aérodynamique d'états stationnaires, actuellement le domaine d'application exclusif du code est la modélisation instationnaire d'écoulements réactifs. Ces applications sont fortement liées aux besoins croissants de compréhension des mécanismes moteurs de la turbulence. La simulation de tels écoulements turbulents instationnaires est basée dans le code AVBP sur le formalisme de Simulation aux Grandes Echelles (SGE).

La prise en charge de maillages non structurés ainsi qu'hybrides est une des caractéristiques clée du code AVBP. En effet, avec l'utilisation de tels maillages au sein desquels il est possible de combiner des éléments de différentes topologies, sont réunis les avantages des maillages non structurés et structurés en termes de flexibilité de génération de maillage et de précision de simulation. Afin de traiter ces maillages autant complexes qu'arbitraires, le code utilise un formalisme "cell-vertex". Les méthodes numériques les plus courament utilisées sont basées sur un schéma numérique volumes finis de Lax Wendroff ou un schéma peu dissipatif de Taylor-Galerkin de type éléments finis, ceux ci étant combinés avec un modèle de viscosité artificielle.

Le code AVBP est actuellement co-propriété du CERFACS et de L'Institut Français du Pétrole (IFP), ceux-ci suivant un accord de dévelopement conjoint du code (l'IFP développant plus particulièrement les outils nécessaires à la simulation de moteurs à pistons).

De forts rapprochements ont aussi été établis avec l'industrie pour l'utilisation du code, notement avec le groupe SAFRAN (regroupant notement Turbomeca et Snecma), Air Liquide, Gaz De France, Alstom et Siemens Power Generation. Le code est par conséquent utilisé dans de nombreuses thématiques en collaboration avec l'industrie ainsi que des programmes de recherche internationaux (les principaux étant actuellement les projets européens Ecomet, Limousine, My Planet).

1.3 Présentation du code elsA

Depuis plusieurs années, l'Onera développe différents codes de calcul de mécanique des fluides. Dans les années 90, deux codes prédominaient et en 1997, l'Onera a décidé de lancer le projet elsA (pour "ensemble logiciel de simulation en Aérodynamique") en collaboration avec Airbus France et le CERFACS. L'objectif premier de

ce projet était de regrouper les fonctionnalité CFD disponible au sein d'un code unique évolutif, c'est à dire qui tire partie de la programmation orientée objet (du C++ qui permet d'articuler les différents modules de calculs codés en Fortran, et communiquant avec une surcouche en Python pour l'interfaçage utilisateur) afin de permettre l'intégration progressive de nouvelles capacités, résultants de projet de recherches.

Le code elsA est un code CFD multi-application utilisé pour la modélisation aérodynamique interne et externe d'écoulements allant du subsonique jusqu'à des écoulements largement supersoniques. Les équations 3D compressibles de Navier-Stokes sont résolus avec un formalisme volumes finis, cell-centered sur des maillages multiblock structurés. Une grande flexibilité de maillage est atteinte dans elsA avec l'utilisation des fonctionnalités multiblock, d'adaptation de maillage et de la technique Chimère. Les équations discrétisées sont intégrées temporellement par un schéma implicite 4 étapes de Runge-Kutta utilisant une méthode Gear de "dual time stepping" pour une meilleure précision temporelle. Une grande variété de modèles de turbulences est aussi disponible pour le RANS, la SGE et la DES (Detached Eddy Simulation).

Actuellement, un important effort est porté sur le dévellopement des fonctionalités massivement parallèles (des simulations ont déjà été réalisées sur des milliers de coeurs de calcul) et de schéma numériques haute fidélité adaptés à la Simulation aux Grandes Echelles.

2 Principe de la Simulation aux Grandes Echelles (SGE)

2.1 Formalisme de la SGE

La simulation aux grandes échelles est une approche alternative intermédiaire entre la méthode RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) plus courement utilisée dans le domaine industriel et la Simulation Numérique Directe (DNS) qui est la plus couteuse. Les approches RANS et SGE cherchent à résoudre différents systèmes d'équations pour simuler des écoulements turbulents, ces systèmes étant des formes filtrées des équations de Navier-Stokes. Au contraire, la DNS n'utilise aucun filtre de façon à résoudre numériquement toutes les structures turbulentes présentes dans l'écoulement.

La différence principale entre le RANS et la SGE est l'opérateur de filtrage appliqué aux équations de Navier-Stokes afin d'obtenir le nouveau système à résoudre. Du fait de cette opération de filtrage des équations résultent des termes non fermés, d'où la nécessité d'utiliser des modèles afin de traiter ces termes.

Le formalisme RANS consiste en l'utilisation d'un operateur de moyenne temporelle. Par conséquent toutes les structures turbulentes doivent être modélisées ([3],[10]). Au contraire la méthode de Simulation aux Grandes Echelles résout le système obtenu à partir des équations de Navier-Stokes en appliquant un filtre spatial indépendant du temps de taille explicite ou implicite. En pratique ce filtre est relié à la taille locale des mailles. La conséquence d'un tel filtrage spatial est une séparation entre les structures de grandes (plus grandes que la taille locale de maille) et petites tailles (plus petites que la taille locale de maille). Les termes qui vont donc nécessiter l'utilisation d'un modèle sont ceux associés aux structures de petites tailles présentes dans l'écoulement (Fig. 1).

La turbulence est caractérisée par un transfert d'énergie depuis les structures de grande échelle vers celles de petite taille, par conséquent, les structures de forte énergies étant résolues, les petites structures doivent uniquement dissiper la bonne quantité d'énergie (théorie de cascade de turbulence : [8]). Pour la SGE, cela signifie que pour avoir une solution compatible avec la physique réelle, il suffit que le modèle dissipe une quantité correcte de l'énergie obtenue par la résolution numérique des grandes échelles.

Du fait de son approche de filtrage temporel, le formalisme RANS est communément utilisé pour trouver des solutions à des problèmes stationnaires. Au contraire, la SGE permet une représentation dynamique des structures de plus forte énergie et autorise donc l'étude de phénomènes instationnaires de grande échelle tels que la propagation d'onde acoustique, ou des détachement tourbillonaires sur des profils.

2.2 Présentation des modèles de sous mailles les plus courants

Comme il a été dit précédement, l'utilisation de modèles pour modéliser l'impact des structures de petites tailles non résolues, appelés communément modèles de sous maille (SGS pour Sub-Grid Scale models), est un prérequis pour la Simulation aux Grandes Echelles. Dans les codes AVBP et elsA disponibles pour cette étude les modèles utilisés sont des modèles relativement communs dans la communauté SGE :

- Smagorinsky model ([15]) : la particularité de ce modèle est de fournir le bon niveau de dissipation

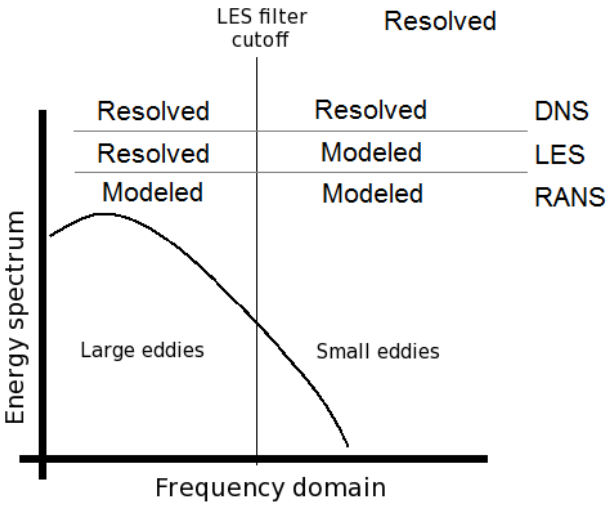

Figure 1: Comparison of the treatment of turbulence with RANS, LES and DNS

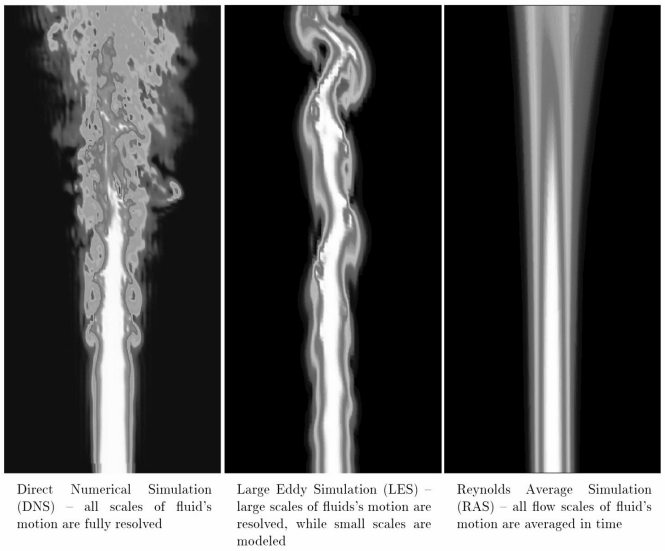

Figure 2: Comparison of DNS, LES and RANS on a turbulent jet

d'énergie cinétique dans des écoulements turbulents homogènes isotropes (THI), mais il est connu pour être trop dissipatif dans des simulations réelles ([2],[11]),

- Wall Adapting Local Eddy-viscosity model (Wale) ([4]) : ce modèle a été développé pour des écoulements dans des cavités et à pour but de retrouver les bonnes valeurs en proche paroi,
- Filtered Structure Function model (FSF) ([12] : de même que le modèle de Smagorinsky, ce modèle est réputé pour être trop dissipatif.

Plus particulièrement le modèle de Smagorinsky est calibré sur une valeur de constante C_s dont l'impact à été étudié au cours du stage. Il existe aussi une version dynamique de ce modèle, qui adapte la valeur de la constante en fonction de la position dans l'écoulement (cette méthode a aussi été utilisé).

3 Cadre de l'étude

3.1 Thématique des turbomachines

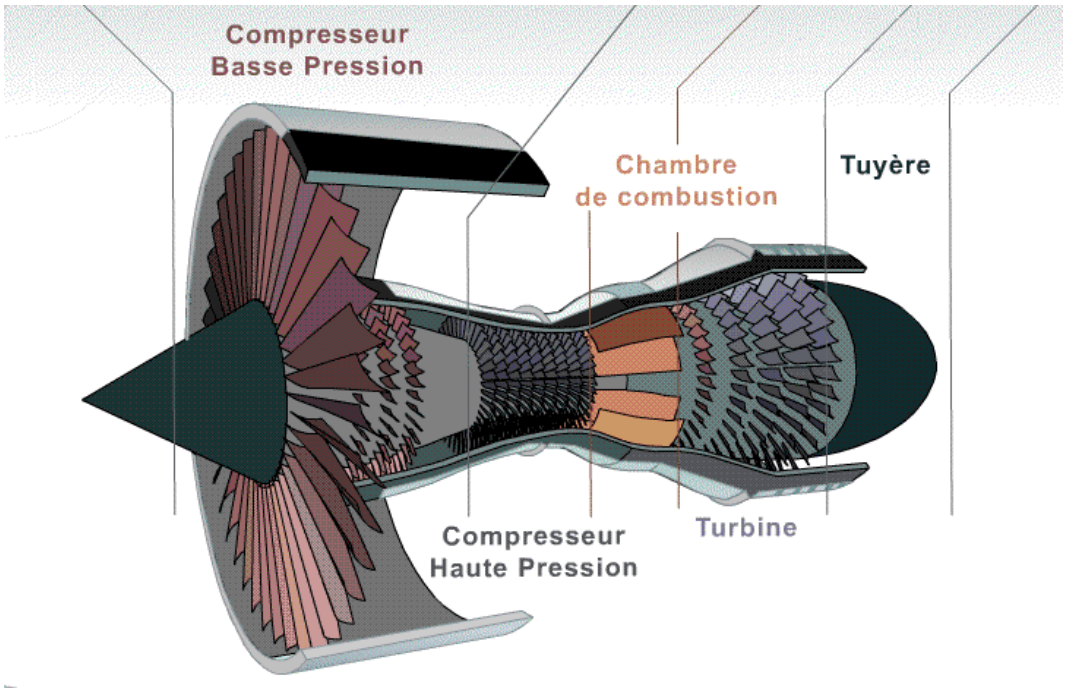

Figure 3: Schéma d'un turboréacteur

L'étude effectuée pendant le stage se place dans la thématique générale des turbomachines. Plus spécifiquement, comme présenté sur la Fig. 3, un turboréacteur générique peut être décomposé en quatres sous-parties :

- les compresseurs permettant de comprimer l'air avant qu'il ne soit injecté dans la chambre de combustion, ou qu'il ne la contourne (flux secondaire) : il existe deux principaux types de compresseurs tournant : les compresseurs axiaux (Fig 4.A) composés d'une successions de roue d'aubes, et les compresseurs centrifuges (Fig 4.B) (plus couramment utilisé pour les moteurs d'hélicoptère car plus compact)
- la chambre de combustion où l'air est mélangé à du carburant puis enflammé, les gaz brulés fortement dilatés sont ensuite évacués vers la turbine
- la turbine est entrainée par l'écoulement et permet ainsi de récupérer de l'énergie (pour alimenter les compresseur, ou le rotor d'un hélicoptère)
- la tuyère évacue ensuite les gaz brulés vers l'extérieur (afin d'obtenir une poussée dûe à l'accélération de ces gaz).

Le stage s'est focalisé sur la modélisation d'un étage de distributeurs situé entre la chambre de combustion et le premier jeu de turbines dont l'objectif est de rediriger l'écoulement en sortie de chambre.

3.2 Configuration expérimentale de référence

3.2.1 Géométrie

La géométrie étudiée numériquement durant le stage est basée sur une configuration expérimentale réalisée par C. H. Sieverling ([13],[14]), sur laquelle des mesures ont été effectuées sur un montage composé d'une cascade de quatre pâles (cf Fig. 5) afin de conserver au mieu le phénomène de périodicité (toute les mesures étant réalisées sur la troisième pâle en partant du haut)

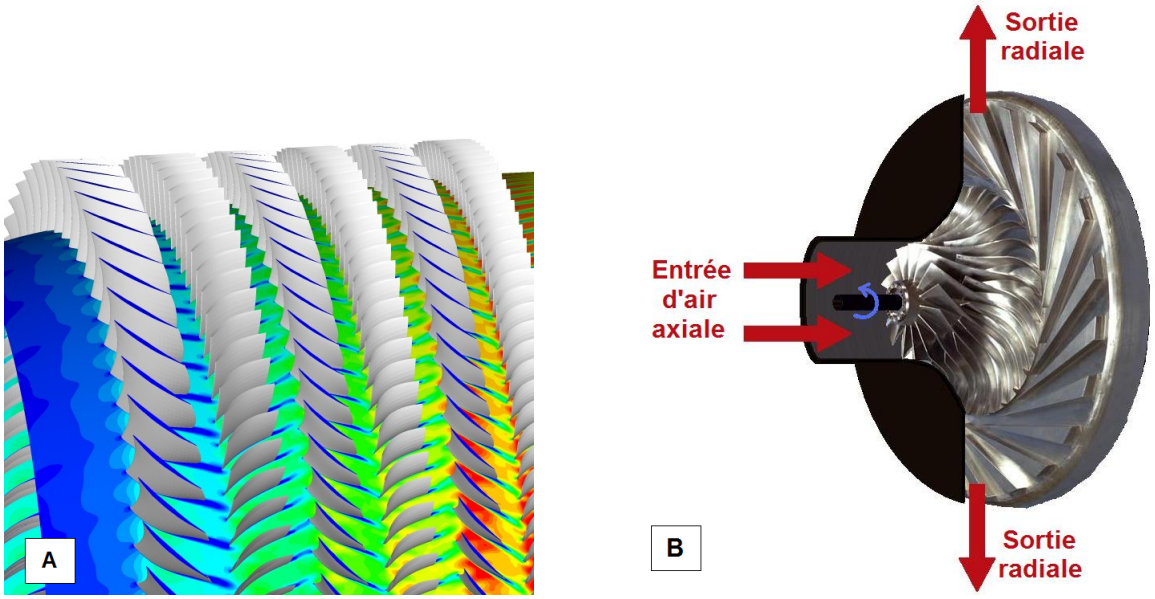

Figure 4: A: roues d'aubages d'un compresseur axial modélisé avec elsA, B: photo d'un compresseur centrifuge (avec sa couronne de distributeurs)

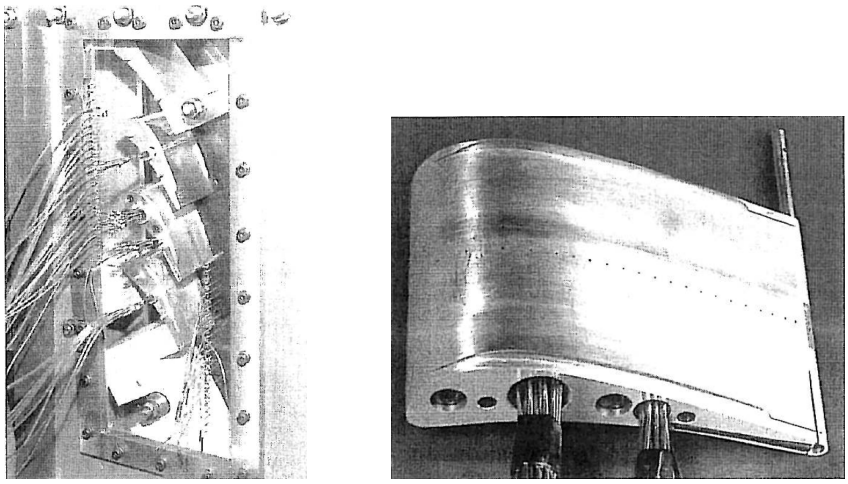

Figure 5: Banc expérimental et détail de l'instrumentation sur la troisième pâle

Pour les simulations, la géométrie à été dessinée grâce au logiciel CFD-GEOM, et les maillages ont été réalisé en utilisant Centaur Soft pour les maillages non structurés nécessaires pour AVBP et ICEM pour les maillages structurés utilisés avec elsA. Le domaine modélisé dans les simulations est composé d'uniquement une pâle (cf Fig. 7) de même géométrie et dimensions que celles utilisées dans les expériences (cf Fig. 6), excepté pour l'envergure (direction z) dont l'influence de la taille a été étudiée via des simulations utilisant des domaines d'épaisseurs différentes. La hauteur de domaine (direction y) est quant à elle choisie égale à l'écart inter-pâle afin de pouvoir utiliser une condition de périodicité entre le haut et le bas du domaine pour reproduire l'effet de "réseau de pâles".

Dautre part, les résultats expérimentaux semblent mettre en évidence que la topologie de l'écoulement est quasi bi-dimensionnelle (les structures dans la direction z semblent quasi inexdistantes) . Ceci permet pour la pluspart des simulations d'utiliser des domaines de faible épaisseur, et même des simulations 2D ont été réalisées (pour diminuer le coût en temps de calcul, ainsi que pour mettre en évidence l'influence des effets 3D).

Longueur de corde c	140 mm
Corde axiale c_{ax}	91.84 mm
Distance inter-pâles g	97.44 mm
Epaisseur de pâle h	100 mm
Diamètre du bord de fuite D	7.434 mm

Figure 6: Dimensions caractéristiques des pâles

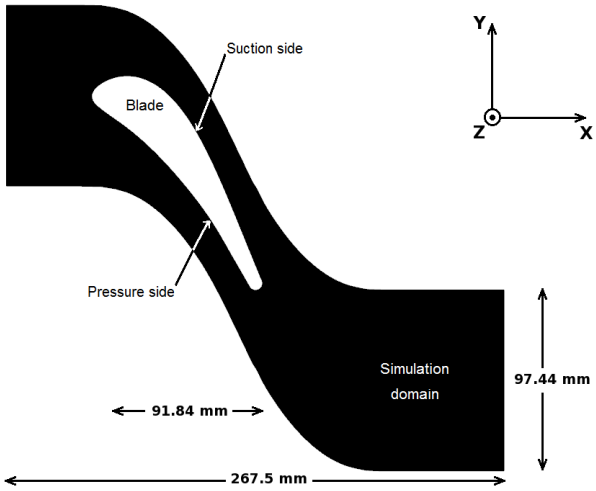

Figure 7: Domaine de simulation

3.2.2 Conditions physiques de simulation et expérimentales

De même que la géométrie, les conditions physiques utilisées dans les simulations ont été choisies afin d'être le plus proche possible des conditions rencontrées dans les expériences (cf Fig. 8).

Condition d'entrée
Les conditions d'entrée utilisées dans les expériences sont clairement décrites dans [13] et [14], et ont donc pût être aisément imposées dans les simulations: une injection normale (dans la direction x) d'air à une température totale de 280 Kelvin et une pression de totale de 1400 mbar est imposée (dans AVBP, pression totale et température totale sont imposées directements, par contre dans elsA, pression totale et enthalpie sont imposées).

Condition de sortie
La condition de sortie est plus compliquée à imposer pour être proche de la configuration expérimentale. En effet, dans [13] et [14], la condition imposée est une valeur moyenne de Mach isentropique de 0.79 sur un plan distant de $x/c_{ax} = 0.5$ du bord de fuite. Dans les simulations, ce plan est situé à l'intérieur du domaine de calcul et donc cette condition ne peut être imposée directement. Il a fallu estimer une valeur de pression fixée en sortie de domaine afin d'obtenir cette valeur de $M_{iso} = 0.79$ sur le plan donné. De plus la condition limite de sortie employée utilise un coefficient de relaxation sur cette valeur de pression de référence, ceci étant indispensable pour diminuer au maximum les réflections d'ondes acoustiques sur le plan de sortie. En fait, l'objectif d'une telle condition est d'obtenir la valeur de référence en termes de moyenne temporelle et spatiale. Au final, cette condition limite dans AVBP et elsA résulte en une erreur d'environ 3% par rapport à la condition expérimentale.

Condition sur la surface de la pâle
Sur la surface de la pâle est imposé une condition de paroi adiabatique. Dans la nécessité d'en estimer l'efficacité, différents types de conditions de paroi ont été utilisés (conditions d'adhérences, conditions de paroi glissante, loi de paroi).

Condition de périodicité
Comme il a été dit précédement, une condition de périodicité dans la direction y a été utilisée entre la surface haute et basse du domaine afin de conserver l'effet de "cascade de pâles ".

Il a aussi été choisi d'imposer une condition de périodicité dans la direction z, étant donné la courte épaisseur du domaine simulé comparé à l'épaisseur expérimentale réelle.

De telles conditions de périodicité ont été adoptées dans le but de diminuer la taille de domaine de calcul et donc la taille du maillage pour réduire le temps de calcul nécessaire.

Nombre de Reynolds Re (basé sur la longueur de corde et la vitesse de sortie)	2.8x10^6
INLET Température totale T_{tot} Pression totale P_{tot}	 280 K 1400 mbar
OUTLET Mach isentropique M_{iso} (sur le plan $x/c_{ax} = 0.5$)	 0.79

Figure 8: Overall flow conditions

3.2.3 Topologie de l'écoulement

La topologie de l'écoulement d'air autour de la pâle mise en évidence expérimentalement et numériquement est relativement complexe.

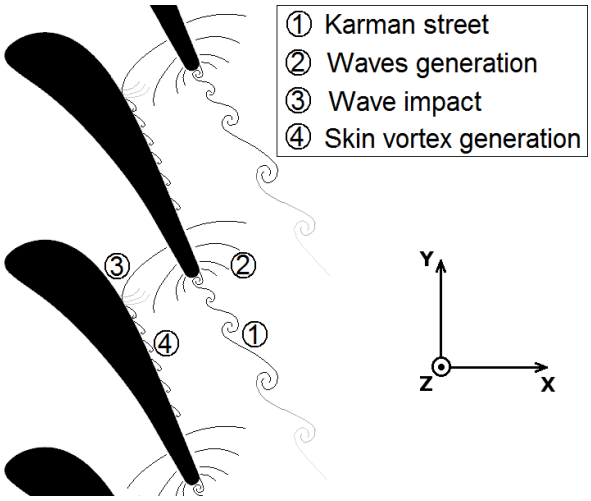

Figure 9: Topologie de l'écoulement autour des pâles

Quatre phénomènes dominants peuvent cependant etre relevés comme représenté sur la Fig. 9 :

- 1 : des tourbillons sont générés dans le sillage de la pâle comme dans la largement étudiée expérience des allées de Karman (oscillations instationnaires du sillage d'un cylindre circulaire : [6])
- 2 : cette génération de tourbillons au bord de fuite de la pâle provoquent la libération d'ondes acoustiques se propageant en amont
- 3 : ces ondes acoustiques finissent par impacter et se réfléchir sur la surface de la pâle située en dessous (les ondes générées à l'extrados vont quant à elles venir perturber le sillage de la pâle d'au dessus)
- 4 : l'impact des ondes de pression sur l'extrados de pâle inférieure combiné avec le décollement de la couche limite provoque l'apparition de tourbillons de surface se propageant en aval sur la surface de la pâle (il faut noter que ce phénomène n'a pas été clairement identifié au cours des expériences).

Une topologie d'écoulement aussi complexe, doit bien évidement être prise en compte dans la mise en place de la simulation afin de bien reproduire tout ces phénomènes, notement lors de la réalisation du maillage qui devra être spécialement rafiné dans les zones concernées.

3.3 Données expérimentales disponibles

Cette expérience bien documentée a été choisie principalement pour le nombre important de données expérimentales disponibles pour la comparaison avec les simulations numériques. En effet, [13] et [14] mettent à disposition deux types de résultats utiles:

- des données sur l'écoulement moyen (moyenne en termes temporels) : la distribution de Mach isentropique sur la surface de la pâle, le profil moyen de pression sur le bord de fuite et enfin deux profils de couches limites pris de chaque coté de la pâle (cf Fig. 10), de telles données sont particulièrement intéressantes pour valider "au premier ordre "les simulations et pour les comparer avec des simulations RANS (comparaison qui a été faite dans [7]);
- des données instationnaires : l'évolution temporelle des variations de pression enregistrée à différentes positions sur la peau de la pâle (cf Fig. 10) et la fréquence de lâcher tourbillonnaire au bord de fuite, ces différents critères permettent ainsi d'évaluer la capacité de la SGE de reproduire correctement les phénomènes instationnaires d'un écoulement d'une telle complexité.

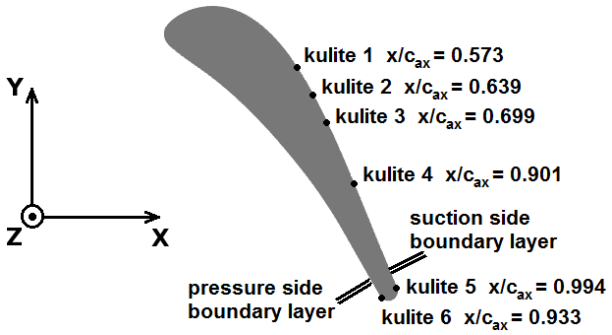

Figure 10: Positions des sondes de pressions (kulite) et des plans d'extractions des profils de couche limite

Ce dernier type de données étant très sensibles, ils n'ont été comparé que sur les simulations les plus abouties (départagées en fonctions des résultats obtenus sur le premier type de valeurs expérimentales).

4 Principaux résultats

4.1 Etude de l'influence des différents paramètres numériques : mise en place des simulations obtimales

Au cours du stage un grand nombre de simulations ont été réalisées afin de tester les différents outils numériques disponibles dans chacun des codes dans le but d'obtenir une configuration numérique optimale (en terme de précision des résultats et coûts de calcul) pour la comparaison avec les expériences et avec les simulations RANS afin de mettre en évidence l'apport de la SGE. Ce genre d'étude complète de toute la gamme de paramètres modifiables n'est pas habituellement fait, du moins pas à une telle échelle. En effet ce genre de tests demande la réalisation d'un grand nombre de simulations, pouvant être longues et très couteuses. C'est pourquoi une telle étude peut apporter des informations intéressantes pour la suite puisqu'elle permet de déterminer les principaux paramètres intéressants pour ce type de simulations et l'impact de leur modification.

La difficulté de ce type d'étude est le nombre de paramètres différents pouvant influencer les résultats et dont l'impact n'est pas toujours évident, mais surtout le plus compliqué reste de savoir trouver un compromis entre le coût de calcul et la précision des résultats.

Il a été dans un premiers temps réalisé une étude de topologie et de rafinement de maillage (en 2D et 3D sur AVBP et 3D uniquement sur elsA) afin de déterminer le maillage 3D offrant le meilleur compromis précision/nombre de maille (ainsi que raffinement local pour AVBP, puisque le code étant explicite, le pas de temps du calcul est imposé par une condition CFL basée sur la taille de la plus petite maille du domaine, au contraire elsA étant implicite une telle limitation n'est pas présente). Les maillages retenus sont présentés sur la Fig. 11. Il a aussi été utilisé des maillages hybrides (maillage non structurés composé de thétrahèdres dans le domaine et de quelques couches de prismes en proche parois ce qui permet de mieux résoudre les couches limites) qui ont donné des résultats très encourageants mais qui ne seront pas être présentés dans ce rapport.

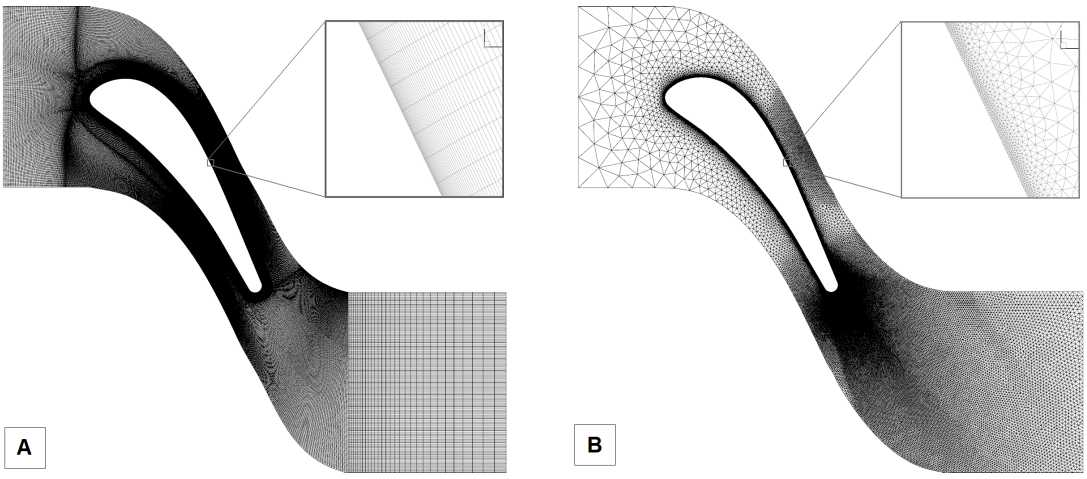

Figure 11: Maillages 3D retenus pour A: elsA et B: AVBP

Il a ensuite été étudié l'impact :

- du modèle de sous-maille utilisé (chacun des codes proposant différents modèles de sous maille décrits précédement): le modèle de Smagorinsky (avec une constante de 0.09 courament utilisé pour des écoulements confinés) semblant donner les meilleur résultats;
- du schéma numérique (avec AVBP) : le schéma de Lax Wendroff donnant des résultats interessants surtout en prenant en compte le gain en temps de calcul par rapport au schéma d'ordre plus élevé de Taylor-Galerkin qui n'apporte pas nécessairement un gain de précision (contrairement à ce qu'on pourrait imaginer, ceci pouvant être dû à la stabilité moindre du schéma nécessitant par exemple l'augmentation locale de la viscosité du fluide);
- du traitement de la condition limite de sortie (sur AVBP) afin d'obtenir un minimum de réflections tout en conservant des valeurs proches de la référence expérimentale : la distance la plus raisonable (en terme

de taille de maillage et précision des résultats) étant à une corde axiale du bord de fuite, et le type de condition de LODI ([9],[1]) en ajoutant le traitement des termes transverses étant la formulation la plus efficiente comme il a été démontré dans [5];

- de la condition imposée sur la surface de la pâle : les différents types de lois de parois qui permettent d'obtenir une meilleure résolution des couches limites en diminuant le rafinement du maillage, n'étant pas les plus adaptées pour ce type de calcul (les ondes acoustiques étant mal prises en compte, cela mennait à une mauvaise estimation de l'intensité des ondes provoquant une mauvaise ditribution de pression sur le bord de fuite et un mauvais traitement de la zone d'impact), une condition d'adhérence a donc été choisie;
- de l'épaisseur du domaine de simulation afin de s'assurer que l'hypothèse de quasi-bi-dimentionalité de l'écoulement faite précédement n'était pas trop restrictive : il a été mis en évidence que les simulation 2D étaient trop contraignantes pour l'écoulement, mais que les simulations 3D avec une faible épaisseur étaient suffisantes.

4.2 Mise en évidence de l'apport de la SGE

Comme décrit précédement, deux jeux de données expérimentales sont disponibles :

- des données moyénnées temporellement : celles ci vont permettre de comparer les simulations RANS et SGE ainsi que de s'assurer de la validité "au premier ordre "des topologies d'écoulements simulés,
- des grandeurs instationnaires : elles vont permettre de vraiment montrer l'apport de la SGE dans la compréhension de la physique d'un écoulement d'une telle complexité.

Les conclusions suivantes ont été plus longement présentées dans [7], il va donc être présenté brièvement les conclusions principales.

4.2.1 Champs moyens

Comparaison (U)RANS/SGE
Les simulations RANS ayant été réalisées avec le code elsA sur le même maillage que celui utilisé pour la SGE, les résultats obtenus vont uniquement être comparés aux résultats SGE obtenus avec elsA. (pour être indépendant des effets de changement de maillage et de code)

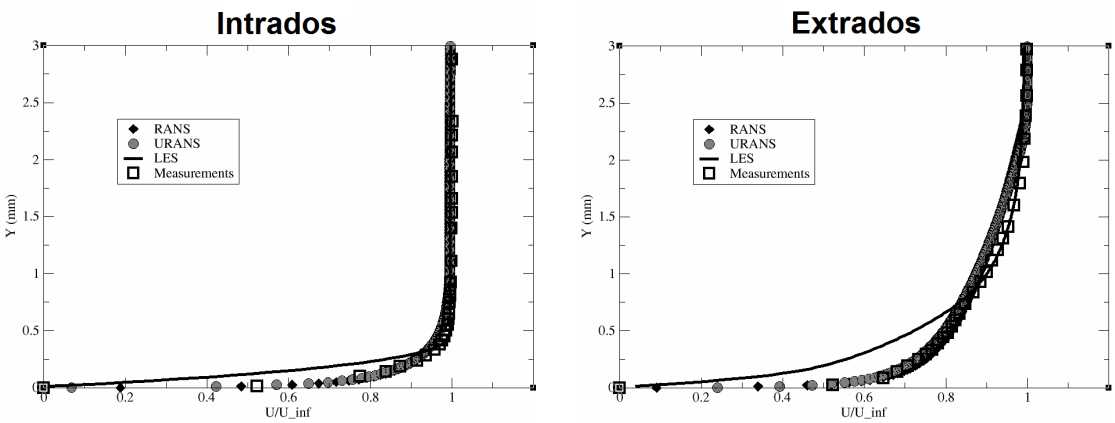

Figure 12: Profils de couches limites A: intrados et B: extrados

La Fig. 12 met en évidence la capacité du formalisme RANS à reproduire tres précisément les couches limites. En effet la SGE, qui est une méthode plus récement développée, est beaucoup moins mature sur ce critère, le RANS possède, du fait du grand nombre de développements déjà existant, de modèles de turbulence avancés prenant en compte la résolution des couches limites. Ce type de critère est un des points faibles bien connus de la Simulation aux Grandes Echelles et fait déjà l'objet de développements (notament du côté de

l'approche lois de paroi évoquée précédement). Par contre, la Fig. 13.A met clairement en évidence la perte d'informations dû au moyennage temporel implicite dans le formalisme RANS, et son impact important sur la physique de l'écoulement simulé : en effet on voit que la simulation RANS fait apparaitre un choc sur l'extrados (dans la zone environant $x/c_{ax} = 0.6$ correspondant au point d'impact des ondes acoustiques générées par la pâle sujacente) n'apparaissant pas dans les expériences. La simulation RANS instationnaire (URANS) parvient à palier ce problème, cependant la distribution de pression sur le bord de fuite (Fig. 13.B) montre vraiment un clair apport de la SGE qui est très proche des valeurs expérimentales contrairement aux simulations RANS et URANS qui présentent des profils non physiques, ce qui va notablement modifier la topologie de l'écoulement dans le sillage de la pâle.

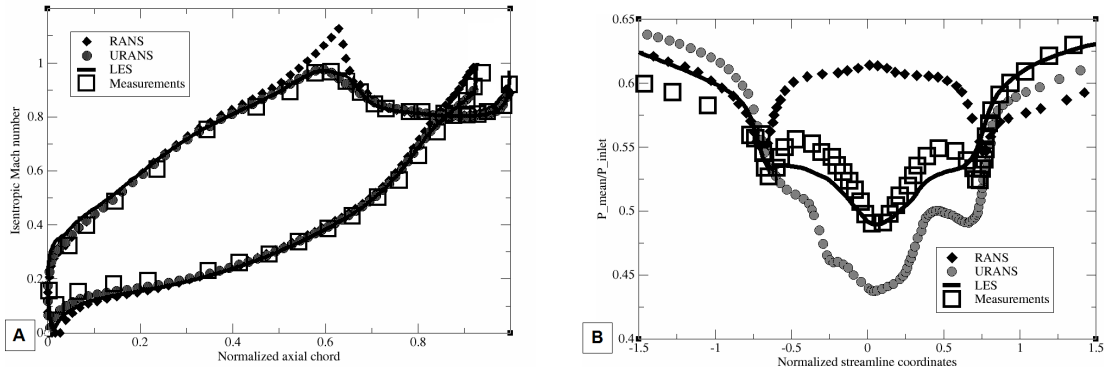

Figure 13: Comparaison des profils RANS, URANS et SGE de A: Mach isentropique sur la surface de la pâle et B: pression moyenne sur le bord de fuite

Comparaison elsA/AVBP

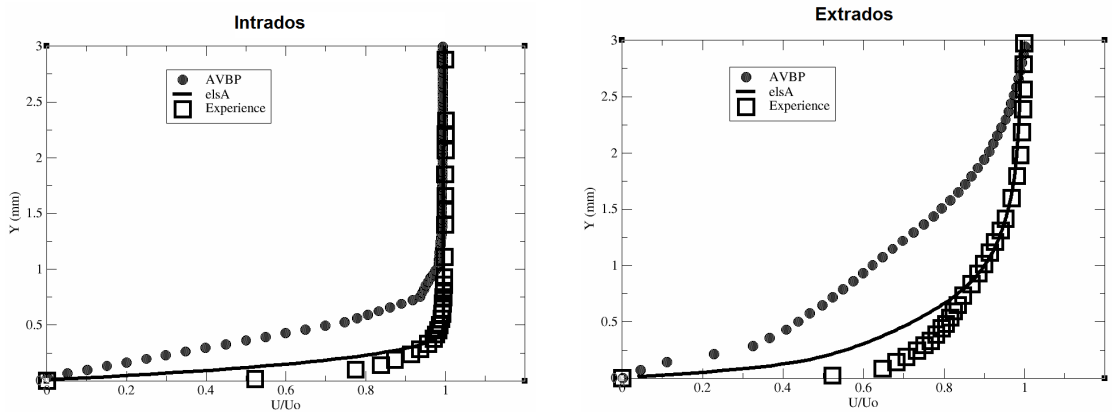

Figure 14: Profils de couches limites A: intrados et B: extrados

La résolution proche parois étant plus critique sur AVBP que sur elsA (pour des problèmes d'impact sur le pas de temps via la condition CFL discutés précédement), on a clairement une moins bonne estimation des profils de couches limites intrados et extrados comme le montre la Fig. 14.

On voit au contraire sur la Fig. 15 que les deux codes AVBP et elsA donnent des résultats très proches l'un de l'autre mais surtout en bon accord avec les données expérimentales, malgrès une moins bonne résolutions des couches limites. Ceci semble mettre en évidence que la résolution exacte des épaisseurs de couches limites ne semble pas être le paramètre dominant sur ce cas : en effet il faut d'abord agrandir la gamme de phénomènes physiques résolus aux phénomènes instationnaires avant de s'inquiéter de la précision des simulations dans les couches limites. Mais il ne faut tout de même pas négliger cet aspect, qui garde un impact non négligeable sur l'écoulement.

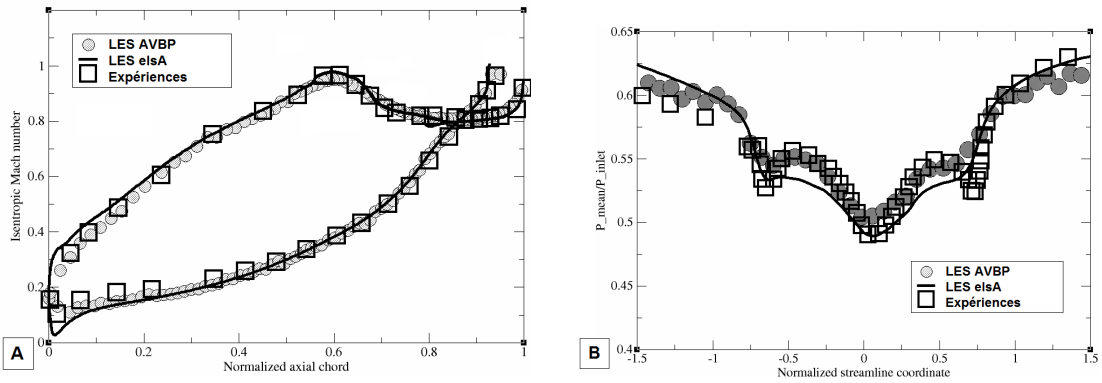

Figure 15: Comparaison des profils AVBP et elsA de A: Mach isentropique sur la surface de la pâle et B: pression moyenne sur le bord de fuite

4.2.2 Comparaisons instationnaires

Comparaison URANS/SGE

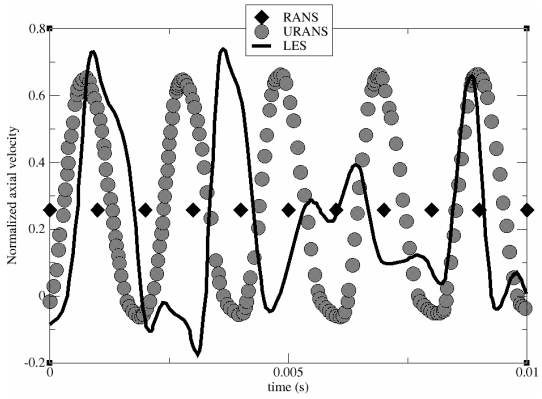

Figure 16: Evolution temporelle de la vitesse dans le sillage

Comme expliqué précédement, le formalisme RANS n'est pas capable de représenter les phénomènes instationnaires tel que les tourbillons de sillages de la pâle ou la propagation d'ondes acoustiques dans l'écoulement dû fait même du système d'équations qu'il résout qui correspondent à une version moyennée des équations de Navier-Stokes. Cependant l'alternative instationnaire URANS, permet de résoudre certaines structure instationnaires. Par contre la richesse fréquentielle des simulations URANS est largement moindre à celle de la SGE comme mis en évidence sur la Fig. 16. Cette perte de richesse d'information explique ainsi les écarts trouvés précédement entre URANS et SGE, ce qui disqualifie cette approche pour des simulations d'écoulements d'une grandes complexité instationnaire telle que celle rencontrée dans le cas étudié.

Comparaison elsA/AVBP

Comme on peut le voir sur la Fig. 17, les topologies d'écoulements simulées avec elsA et AVBP sont globalement similaires. On remarque tout de même certaines différences notables, comme la dissipation plus rapide du sillage sur la simulation réalisée avec elsA, pouvant être un effet combiné de la différence de dissipation des deux schémas numériques ainsi que du dérafinement plus brutal du maillage structuré. Il est aussi clairement visible une différence de comportement des tourbillons se propageant à la surface de la pâle, en effet, ces tourbillons sont beaucoup plus espacés et de plus grande taille avec elsA, ceci pouvant de nouveau être dû à une différence de maillage : le maillage elsA est moins rafiné dans la direction de l'écoulement que le maillage AVBP (étant donné que celui ci doit être quasi isotrope et donc empêche d'avoir des cellules avec un ratio d'aspect tres importants contrairement à ce qui a été choisi pour elsA afin de limiter le nombre de mailles).

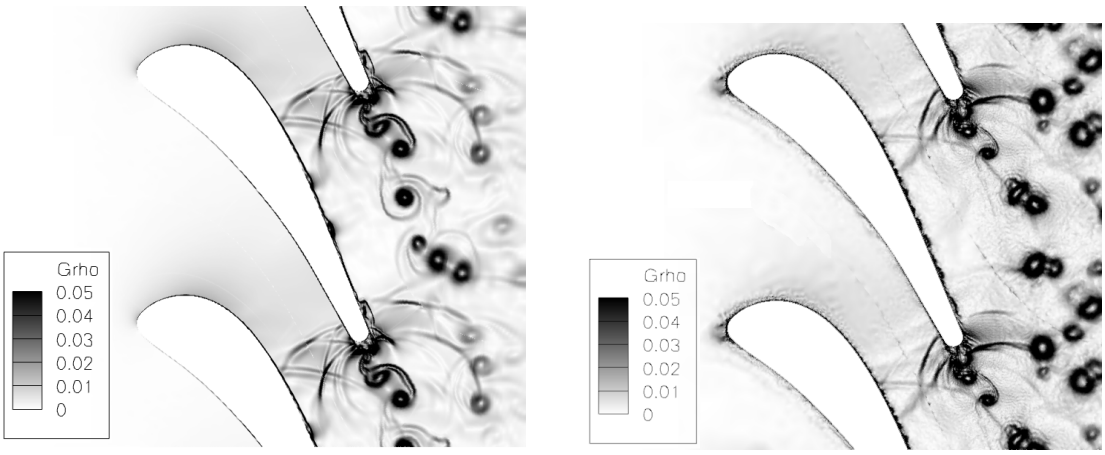

Figure 17: Champ de $\nabla\rho$ obtenus avec A: elsA et B: AVBP

Malgrès ces différences, on voit que des critères très sensibles tel que les signaux instationnaires de variation de pression tout le long de la surface de la pâle présentés sur la Fig. 18 sont relativement bien résolus par rapport aux éxpériences. En effet autant sur la fréquence que sur l'amplitude, on obtient un ordre de grandeur acceptable et une évolution spaciale plutôt précise.

Les expériences mettent aussi à disposition le nombre de Strouhal calculé à partir de la fréquence de laché tourbillonnaire obtenu par transformée de Fourier du signal de pression pris à la position de la kulite numéro 5 (cf. Fig 10). La valeur de Strouhal expérimentale étant de 0.219, on obtient 0.228 avec elsA et 0.218 avec AVBP, donc une erreur de moins de 4% sur les deux simulations SGE ce qui est particulièrement bons, surtout sachant que l'erreur obtenue avec la simulation URANS est de 26%.

Par conséquent, on peut conclure que les deux codes SGE ont réussi à simuler de façon satisfaisante les principaux phénomènes instationaires de cet écoulement complexe.

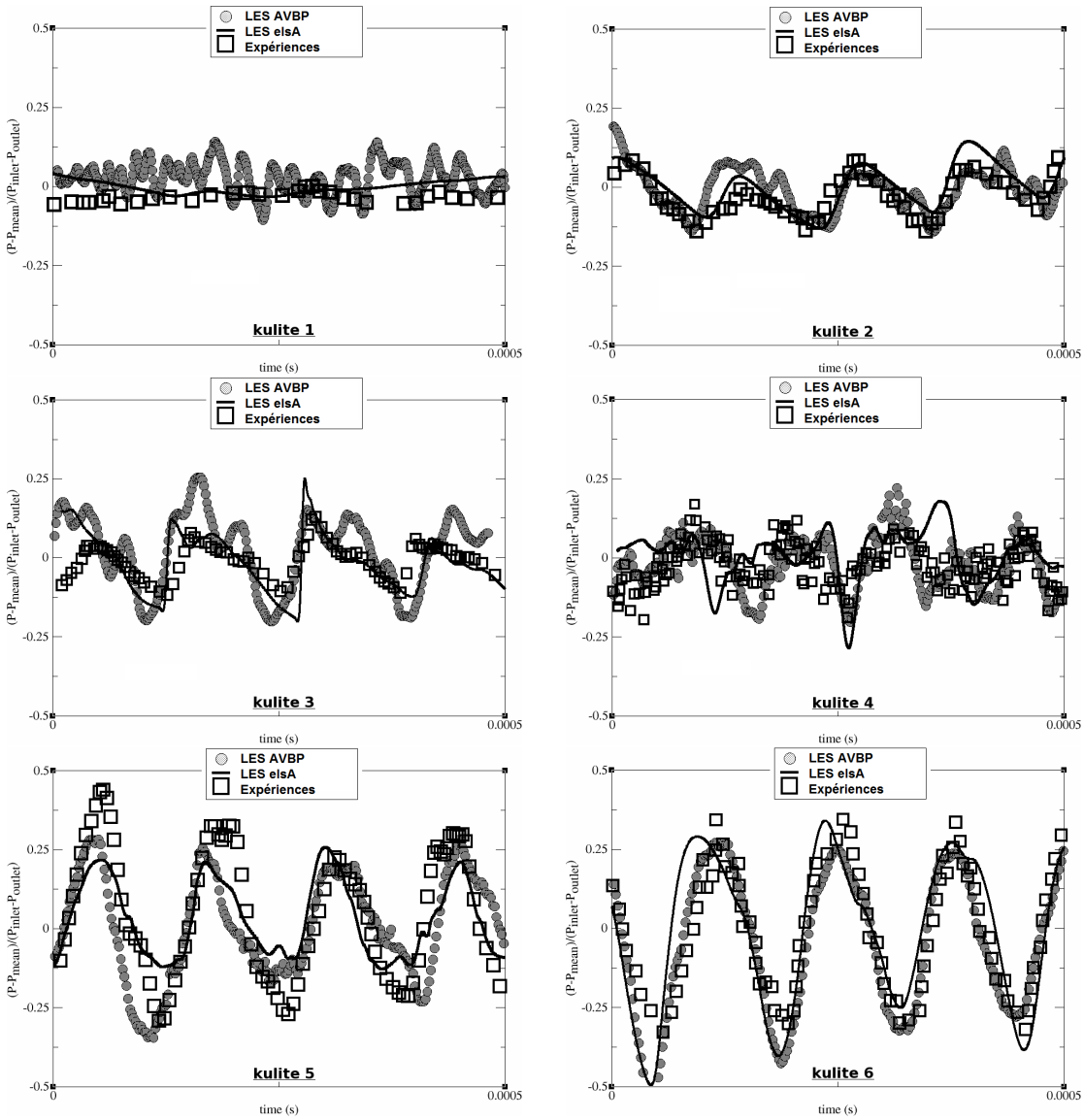

Figure 18: Evolution temporelle des variations de pression au différents points décrit sur la Fig.10

Conclusion

La Simulation aux Grandes Echelles d'écoulement d'une complexité importante tel que la configuration qui à été choisie dans le cadre de cette étude semble donner des résultats très interessants comparativement aux résultats expérimentaux. En effet, la totalité des éléments observés dans les expériences sont retrouvés dans les simulations, et même celle ci apporte des informations non disponibles dans l'expérience tel que l'observation de l'apparition de vortex se propageant le long de la surface extrados de la pâle suite à la perturbation périodique de la couche limite par l'impact d'ondes acoustiques générées par la pâle sujacente.

Cependant il faut quand même être conscient de la forte dépendance de la SGE aux schémas numériques, aux modèles de sous maille et au maillage. En effet, leur influence est tres importante sur la qualité des solutions obtenues et est pas toujours évidentes et prédictibles. Pour avoir des simulations d'une telle précision, cela nécessite donc un nombre important de test sur les différents paramètres disponibles. Il est encore nécessaire d'acquérir une plus grande expérience sur la Simulation aux Grandes Echelles.

D'autre part, la SGE est encore en pleine croissance, et de nombreux développements sont en cours comme l'implémentation de schémas numériques d'ordre élevés, des conditions aux limites évoluées, ou des modèles de sous-mailles plus avancés. Quoi qu'il en soit, cet étude s'étant déroulée avec une forte collaboration industrielle avec le groupe SAFRAN (Turbomeca plus particulièrement), il transparait un clair intérêt des industriels à cette méthode.

References

[1] Baum, M., Poinsot, T., and Thevenin, D. Accurate boundary conditions for multicomponent reacting flows. *Journal of Computational Physics Vol. 116* (1994).

[2] Cerfacs. *The AVBP Handbook*, 2008.

[3] Chassaing, P. *Turbulence en mécanique des fluides, analyse du phénomène en vue de sa modélisation à l'usage de l'ingénieur.* Cépaduès-éditions, 2000.

[4] Ducros, F., Nicoud, F., and Poinsot, T. Wall-adapting local eddy-viscosity models for simulations in complex geometries. *ICFD* (1998), 293–300.

[5] Granet, V., Vermorel, O., Leonard, T., Gicquel, L., and Poinsot, T. Comparison of nonreflectingoutlet boundary conditions for compressible solvers on unstructured grids. *AIAA Journal* (2010).

[6] Jaegle, F. Avbp quality program form : Turbulent channel (with wall-function).

[7] Leonard, T., Gicquel, L., Gourdain, N., and Duchaine, F. Steady/unsteady reynolds averaged navier-stockes and large eddy simulations of a turbine blade at high subsonic outlet mach number. *ASME Conference 2010* (2010).

[8] Piomelli, U., and Chasnov, J. Large eddy simulation: theory and applications. *Turbulence and transition modelling* (1996), 269–336.

[9] Poinsot, T., and Lele, S. Boundary conditions for direct simulations of compressible viscous flows. *Journal of Computational Physics Vol. 207* (1992).

[10] Pope, S. B. *Turbulent flows.* Cambridge University press, 2002.

[11] Sagaut, P. Large eddy simulations for incompressible flows, an introduction.

[12] Sagaut, P., Comte, P., and Ducros, F. Filtered subgrid-scale models.

[13] Sieverding, C. H., Ottolia, D., Bagnera, C., Comadoro, A., Brouckaert, J., and Desse, J. Unsteady turbine blade wake characteristics. *Journal of turbomachinery* (2004), 551–558.

[14] Sieverding, C. H., Richard, H., and Desse, J. Turbine blade trailing edge flow characteristics at high subsonic outlet mach number. *Journal of turbomachinery* (2003), 298–309.

[15] Smagorinsky, J. *General circulation experiments with the primitive equations : I. the basic experiment.* Monthly Weather Review, 1963.