



HAL
open science

Etude de l'éclatement tourbillonnaire dans les sillages des avions de transport

Olivier Thomas, Denis Sipp, Laurent Jacquin, Patrick Servel, David Fabre, Pierre Sagaut

► **To cite this version:**

Olivier Thomas, Denis Sipp, Laurent Jacquin, Patrick Servel, David Fabre, et al.. Etude de l'éclatement tourbillonnaire dans les sillages des avions de transport. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. <hal-03362072>

HAL Id: hal-03362072

<https://hal.science/hal-03362072v1>

Submitted on 1 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Etude de l'éclatement tourbillonnaire dans les sillages des avions de transport

Olivier Thomas, Denis Sipp, Laurent Jacquin & Patrick Servel

*Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales
Département d'Aérodynamique Fondamentale et Expérimentale
8, rue des Vertugadins – 92190 MEUDON
Olivier.Thomas@onera.fr*

David Fabre

*Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse
Allée du Professeur Camille Soula – 31400 TOULOUSE*

Pierre Sagaut

*Laboratoire de Modélisation en Mécanique
Université Pierre et Marie Curie
4, place Jussieu case 162 (tour 55-65) – 75252 PARIS CEDEX 05*

Résumé :

L'objet de notre étude est d'évaluer à l'aide d'un code de Simulation Numérique Directe, le potentiel des effets non linéaires dans l'éclatement tourbillonnaire observé expérimentalement dans une soufflerie de type catapulte à l'ONERA. Pour cela, on résout un problème aux valeurs initiales en modélisant les perturbations expérimentales par des perturbations théoriques de type vrilles pincées superposées à un tourbillon de Lamb-Oseen. A terme, notre but est de déterminer si le phénomène observé est réellement imputable à la physique intrinsèque du tourbillon ou bien la manifestation d'un effet d'installation.

Nos calculs DNS 3D instationnaires sur des perturbations infinitésimales ont montré un très bon accord avec les résultats de la théorie de la stabilité linéaire. L'outil numérique étant validé, la DNS permet d'aller plus loin en simulant numériquement des perturbations de grande amplitude. Une comparaison des dynamiques linéaire et non linéaire est présentée sur une perturbation hélicoïdale.

Mots-clefs : tourbillon ; sillage d'avion ; Simulation Numérique Directe.

Abstract :

The object of our study is to assess the potentialities of non-linear effects within a vortex bursting by means of Direct Numerical Simulations. This vortex bursting phenomenon has been experimentally observed in a catapult type wind-tunnel at the ONERA. For so doing, an initial value problem is solved by modelling the experimental perturbations through theoretical pinched kinks superimposed on a Lamb-Oseen vortex. Our aim will be eventually to determine whether the observed phenomenon is really ascribable to the intrinsic physics of the vortex or the occurrence of end effects proper to some experimental facilities.

Our 3D DNS unsteady calculations upon infinitesimal perturbations have proved to be in very good agreement with the results of the linear stability theory. After the numerical tool has been validated, the DNS makes it possible to go further by numerically simulating great amplitude perturbations. A comparison of linear and non-linear dynamics is presented on a helical perturbation.

Keywords : wake vortex ; airplane trailing vortices ; Direct Numerical Simulation.

1 Introduction

Des observations expérimentales ont montré que des tourbillons de sillage peuvent « éclater » dans certaines conditions de vol. Ce phénomène d'instabilité est de nature non-linéaire et reste encore mal compris. Les difficultés rencontrées aujourd'hui dans la catapulte B20 de l'ONERA Lille [1] redonnent de l'actualité à ce sujet car les études menées dans cette installation expérimentale montrent de manière très reproductible que le tourbillon généré par la maquette volante éclate soudainement. Dans ce cadre, notre objectif est la modélisation du mécanisme observé à la catapulte B20 pour une meilleure compréhension physique des « end-effects » (effets de propagation d'ondes dans des installations expérimentales) et de l'éclatement tourbillonnaire.

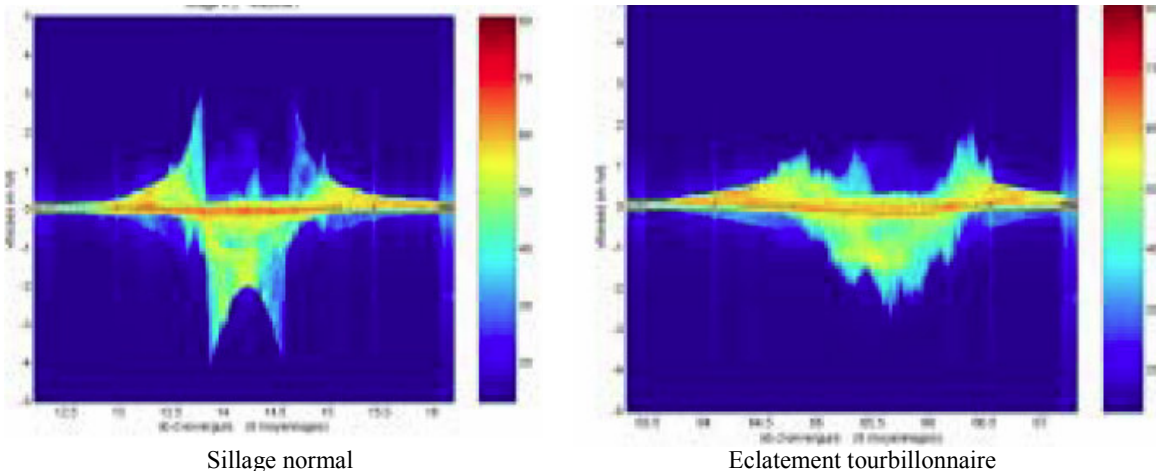


FIG. 1 – sillage tourbillonnaire à la catapulte B20, avant et après éclatement tourbillonnaire (mesures LIDAR, d'après E. Coustols [1]).

Ce phénomène est problématique pour les mesures in situ : plus précisément, il est pathologique pour la caractérisation des sillages tourbillonnaires en champ lointain, qui est le principal objectif des essais réalisés au B20 pour les avions de transport. Il semblerait que cet éclatement soit intimement lié à la propagation le long du tourbillon et la focalisation en un certain point d'ondes d'inertie de forte amplitude. En effet, la propagation de perturbations de faible amplitude le long d'un tourbillon est un phénomène bien documenté que l'on peut appréhender par une approche linéarisée des équations de Navier-Stokes. Sipp [4] et Fabre [6] ont abondamment étudié la dynamique linéaire du tourbillon de Lamb-Oseen. Par la théorie de la stabilité linéaire, ils ont démontré que les modes de vibration (aussi appelés ondes d'inertie ou ondes de Kelvin) du tourbillon de Lamb-Oseen sont stables ou amortis et ne font que se propager le long du tourbillon sans le déstructurer. De plus, Fabre & al. [7] ont proposé une classification de ces ondes de Kelvin de manière exhaustive. En revanche, comme l'a montré Moet [2 & 3], des perturbations de grande amplitude peuvent effectivement se propager le long du tourbillon et la rencontre de deux ondes de pression se propageant en sens opposés peut provoquer un éclatement tourbillonnaire qui déstructure fortement le champ moyen [3]. Ce phénomène a été mis en évidence à l'aide d'un calcul numérique (LES). Une meilleure compréhension des mécanismes physiques est nécessaire pour une expertise approfondie des essais du B20 et une explication de nature plus fondamentale pourrait être établie avec des modèles de bifurcation, notamment la théorie des états conjugués introduite par Benjamin [8] en 1962, poursuivie par les travaux de Rusak & al. [9] et récemment complétés par des études menées au LaHyX [10] et au DAFE [11 & 12].

2 Présentation de l'outil numérique et de la démarche scientifique

Pour ces travaux de recherche de nature fondamentale, de multiples approches théoriques et numériques peuvent être mises en œuvre. Dans le cadre de cette étude, l'outil numérique est le code de

calcul FLUIDILES développé par l'ONERA. Utilisé exclusivement en DNS pour avoir la meilleure précision numérique dans nos simulations, ce code résout les équations de Navier-Stokes compressibles par différences finies. La discrétisation spatiale utilise un schéma compact centré qui fournit une approximation précise à l'ordre 6 des termes convectifs et diffusifs. Un schéma de Runge-Kutta précis à l'ordre 3 est utilisé pour l'intégration en temps. Les conditions aux limites sont périodiques le long de l'axe du tourbillon et de non réflexion (dites de Thompson) sur les faces perpendiculaires à l'axe du tourbillon. Les maillages utilisés sont cartésiens 3D réguliers. Des développements spécifiques ont été réalisés dans le code de calcul (notamment une méthode de filtrage spatial et une technique d'anti-diffusion du champ de base), ainsi que plusieurs tests de maillages (extension des domaines de calcul et densité de points).

Les phénomènes de propagation d'ondes et d'éclatement tourbillonnaire restent encore mal compris, bien qu'ils aient été observés dans de nombreuses configurations expérimentales, dont la soufflerie B20 de l'ONERA. La figure 2(a) montre la propagation d'ondes sous forme de solitons dans un bassin de traction au DLR, sans qu'il y ait de reconnexion entre les deux tourbillons principaux, contrairement à l'instabilité de grande longueur d'onde dite de Crow. De plus, des tests en vol réalisés à la NASA ont mis en évidence la structure en forme de crêpes (« pancakes ») de l'éclatement tourbillonnaire. Spalart [13] ajoute que « vortex bursting is rarely simultaneous on the two vortices, indicating that it involves only one vortex ». Cette conclusion est illustrée par les visualisations réalisées au NLR (fig. 2(b)), suggérant que la perturbation à l'origine de l'éclatement tourbillonnaire n'est pas liée à une instabilité coopérative entre deux tourbillons contrarotatifs mais à la dynamique intrinsèque d'un tourbillon isolé.

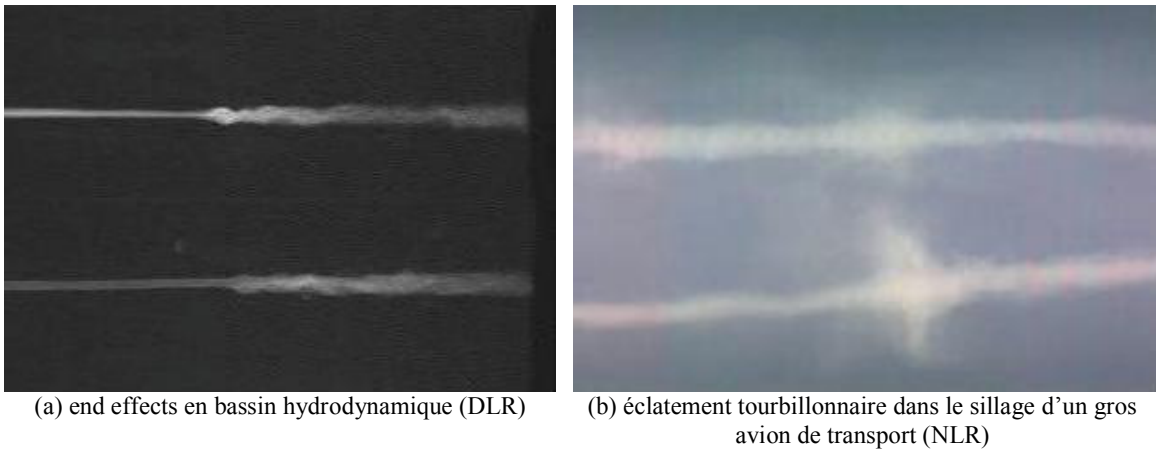


FIG. 2 – end effects et éclatement tourbillonnaire (observations expérimentales).

A partir de ces observations expérimentales, notre étude s'est concentrée sur la modélisation d'un seul tourbillon. Poursuivant l'approche de Fabre [6], on superpose ses diverses perturbations en forme de pincements vrillés en « paquets d'ondes » (représentant des dynamiques physiques complexes) à un tourbillon de Lamb-Oseen, solution de base des équations de Navier-Stokes. Ce profil gaussien de vitesse est exprimé en coordonnées cylindriques dans l'équation 1 : il est paramétré par la circulation Γ et le rayon initial a du cœur du tourbillon. L'initialisation des calculs DNS est réalisée sans vitesse axiale. Nos perturbations sont caractérisées par le nombre d'onde azimutal m , la taille caractéristique du pincement σ et l'amplitude ε de perturbation relativement au champ de base. L'équation 2 illustre la perturbation $m=0$. De plus, nous nous limitons aux perturbations axisymétrique ($m=0$), hélicoïdale ($m=1$) et en double hélice ($m=2$) car la littérature montre que les modes de nombres d'onde azimutaux supérieurs ($|m|>2$) sont très fortement amortis et sont donc a priori de mauvais candidats pour expliquer un phénomène d'instabilité tel que l'éclatement tourbillonnaire observé à la catapulte B20.

$$\text{Eq. 1} \quad V(r) = \frac{\Gamma}{2\pi r} \left(1 - e^{-\frac{r^2}{a^2}} \right) \quad 0 < r < \infty$$

$$\text{Eq. 2} \quad \begin{cases} U_r = 0 \\ U_\theta = V(r) + 2\varepsilon r e^{-r^2} e^{-\frac{z^2}{\sigma^2}} \\ U_z = 0 \end{cases}$$

L'objet de notre étude est d'examiner les mécanismes physiques sous-jacents à la dynamique non linéaire d'un tourbillon, à la lumière des précédentes études réalisées sur les dynamiques linéaire [7] et faiblement non linéaire [5], ainsi que sur l'éclatement tourbillonnaire [8, 9, 10, 11 & 12]. En effet, une bifurcation entre les deux régimes physiques (linéaire et non linéaire), pilotée par une interaction au second ordre entre champ de base et perturbation, pourrait expliquer l'éclatement tourbillonnaire observé au B20. Ce mécanisme physique échapperait de facto aux théories linéarisées qui se limitent au premier ordre et ne pourrait être détectable que par une résolution complète des équations de Navier-Stokes (la DNS). Pour caractériser ces perturbations lors de nos DNS, on examine l'évolution de l'énergie cinétique de la perturbation intégrée sur le domaine 3D de calcul ainsi que le champ de perturbation de vorticité axiale.

3 Validation du code DNS sur la théorie de stabilité linéaire

La figure 3 illustre la validation du code DNS sur les résultats de la théorie linéaire, à différents nombres de Reynolds ($Re = \Gamma / (2\pi\nu)$) avec un niveau de perturbation de 1% par rapport au champ de base, ce qui peut être considéré comme infinitésimal d'un point de vue CFD. Nos trois types de perturbations ($m=0$, $m=1$ et $m=2$) montrent un très bon accord à bas nombre de Reynolds ($Re=100$ & 1000) et un amortissement de la méthode numérique pour $Re=100000$, difficulté technique qui peut être résolue au prix d'un fort raffinement de maillage. Par exemple, nos calculs DNS du mode $m=0$ utilisent un maillage de 16 millions de points. La validation a été complétée par des visualisations 3D du champ de vorticité.

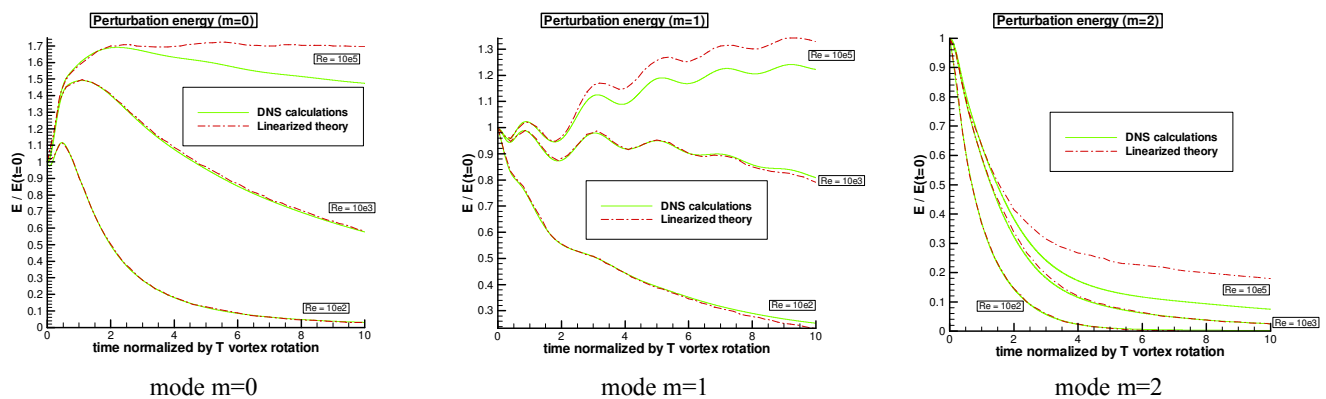


FIG. 3 – validations des calculs DNS avec la théorie de stabilité linéaire (D. Fabre, [6]).

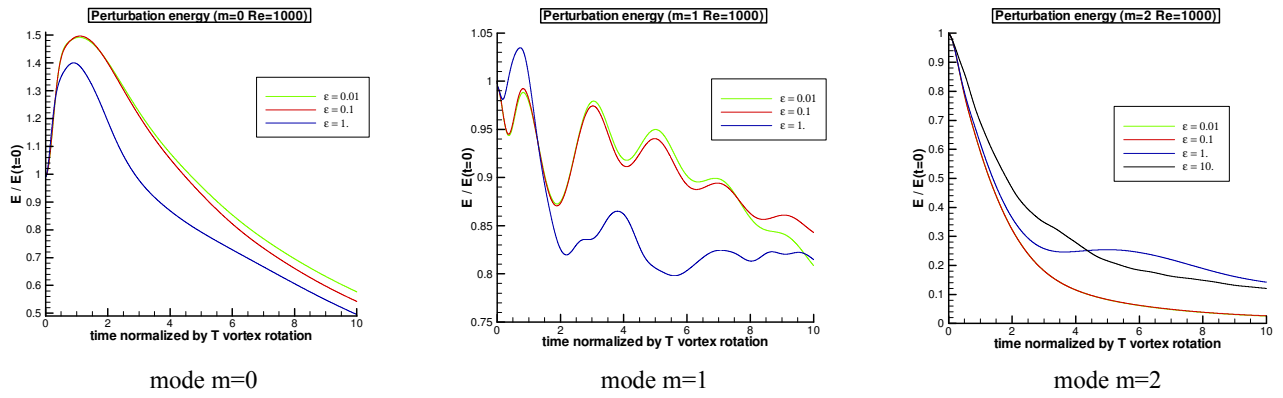
En résumé, les phénoménologies en régime linéaire des trois perturbations sont très différentes : les modes $m=0$ et $m=1$ se propagent le long du tourbillon (avec de légères croissances transitoires à Re suffisant), tandis que la perturbation $m=2$ reste localisée au niveau du pincement et s'amortit très vite (existence de « couches critiques » [7]).

4 Etude de la dynamique non linéaire du tourbillon de Lamb-Oseen

Dans cette partie, nous présentons une étude paramétrique réalisée sur l'amplitude ε de perturbation puis une comparaison physique des dynamiques linéaire et non linéaire sur une perturbation hélicoïdale. Nous nous sommes fixés $Re=1000$ dans ces simulations, le code DNS étant validé pour cette valeur.

4.1 Etude paramétrique sur l'amplitude initiale de perturbation

Un premier examen du régime non linéaire a été mené en augmentant progressivement l'amplitude des perturbations dans nos calculs DNS. Cette étude paramétrique réalisée sur les courbes d'énergie est représentée sur la figure 4 et suggère dans les trois configurations un changement de comportement entre 10% et 100% de perturbation. Ceci nous a conduits à étudier une perturbation de grande amplitude (50% du champ de base) sur le mode $m=1$ et à comparer le régime linéaire avec la dynamique non linéaire.



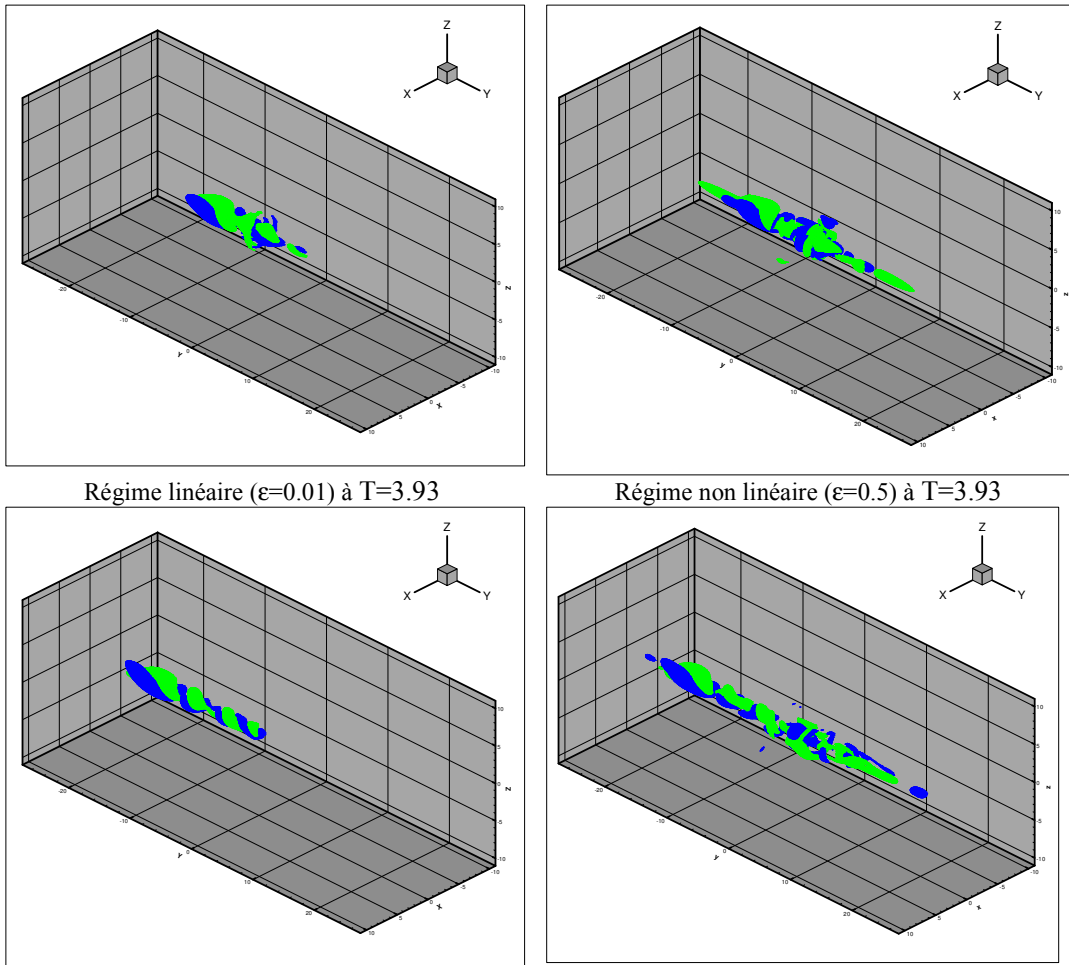
mode m=0

mode m=1

mode m=2

FIG. 4 – Energie cinétique de perturbation en fonction de l’amplitude initiale de perturbation (calculs DNS à Re=1000).

4.2 Comparaison des dynamiques linéaire et non linéaire de la perturbation m=1



Régime linéaire ($\epsilon=0.01$) à $T=3.93$

Régime non linéaire ($\epsilon=0.5$) à $T=3.93$

Régime linéaire ($\epsilon=0.01$) à $T=9.85$

Régime non linéaire ($\epsilon=0.5$) à $T=9.85$

FIG. 5 – champs 3D de perturbation de vorticité axiale (calculs DNS du mode m=1 à Re=1000).

La figure 5 présente l'évolution de la perturbation de vorticité axiale du mode $m=1$ pour une perturbation infinitésimale et une perturbation de grande amplitude. De manière globale, on constate que la physique non linéaire (création de nombreuses petites structures enchevêtrées) est beaucoup plus complexe que la dynamique linéaire (principalement deux structures persistantes et régulières). De plus, on constate que la physique non linéaire est d'évolution nettement plus rapide. Cela s'explique par le fait que le terme de couplage non linéaire génère tous les nombres d'ondes azimutaux (en particulier $m=0$) par recombinaison entre modes. La perturbation axisymétrique exhibant les vitesses de propagation les plus élevées (cf. la théorie de stabilité linéaire [6]), la dynamique non linéaire du mode $m=1$ met en évidence un étirement du paquet d'ondes beaucoup plus rapide que dans le cas linéaire.

5 Conclusions

A ce stade, nous avons obtenu une validation fine du code DNS en régime linéaire sur nos trois types de perturbations ($m=0$, $m=1$ et $m=2$) à différents nombres de Reynolds avec un niveau de perturbation de 1% par rapport au champ de base. Le code DNS nous a permis d'aller plus loin dans cette étude, en simulant une perturbation hélicoïdale de grande amplitude (50% du champ de base). Une comparaison du régime linéaire avec la dynamique non linéaire a mis en évidence la richesse de la physique non linéaire. Elle a notamment pour effet de complexifier les petites structures tourbillonnaires et d'accélérer la propagation de perturbation.

De plus, nous analysons à l'heure actuelle les bases de données de la catapulte B20 dans le but de mieux caractériser la physique de la perturbation expérimentale. A terme, ceci nous permettra d'initialiser des calculs DNS par des données mesurées afin de comprendre l'apparition de l'éclatement tourbillonnaire observé dans l'expérience.

Références :

- [1] E. Coustols, *AWIATOR B20 catapult tests*, VMT Meeting, Brussels, 2/12/2003.
- [2] H. Moet, *Simulation numérique du comportement des tourbillons de sillage dans l'atmosphère*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2003.
- [3] H. Moet, F. Laporte, G. Chevalier & T. Poinsot, *Wave propagation in vortices and vortex bursting*, Physics of Fluids, vol. 17, 2005.
- [4] D. Sipp, *Instabilités dans les écoulements tourbillonnaires*, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, Palaiseau, 1999.
- [5] D. Sipp, *Weakly non linear saturation of short wave instabilities in a strained Lamb-Oseen vortex*, Physics of Fluids, vol. 12, 2000.
- [6] D. Fabre, *Instabilités et instationnarités dans les tourbillons : application aux sillages d'avions*, Thèse de doctorat, Université Paris VI, 2002.
- [7] D. Fabre, D. Sipp & L. Jacquin, *Kelvin waves and the singular modes of the Lamb-Oseen vortex*, Journal of Fluid Mechanics, vol. 551, 2006.
- [8] T.B. Benjamin, *Theory of the vortex breakdown*, Journal of Fluid Mechanics, vol. 14, 1962.
- [9] S. Wang & Z. Rusak, *The dynamics of a swirling flow in a pipe and transition to axisymmetric vortex breakdown*, Journal of Fluid Mechanics, vol. 340, 1997.
- [10] F. Gallaire, *Instabilités dans les jets tournants et contrôle de l'éclatement tourbillonnaire*, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, Palaiseau, 2002.
- [11] F. Renac, *Contrôle expérimental de l'écoulement tourbillonnaire sur une aile delta*, Thèse de doctorat, Université Paris VI, 2004.
- [12] B. Leclaire, *Etude théorique et expérimentale d'un écoulement tournant dans une conduite*, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, Palaiseau, 2006.
- [13] Philippe R. Spalart, *Airplane trailing vortices*, Annual Review in Fluid Mechanics, 1998.