

# Explorer et modéliser la dynamique et la structure des écoulements stratifiés instables turbulents

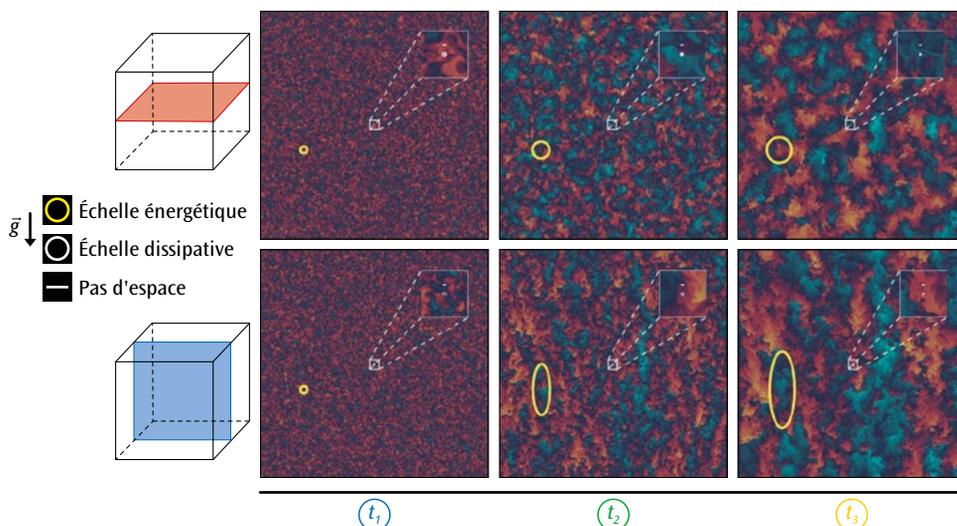
■ B.-J. GRÉA - A. BURLLOT / CEA – DAM Île-de-France

Grâce à un nouveau modèle, il devient possible de reproduire à moindre coût la dynamique des mélanges turbulents accélérés à densité variable, habituellement obtenus par les simulations numériques résolvant de manière directe les équations de Navier-Stokes [1,2]. Cet outil permet de mieux comprendre la structure et la dépendance aux conditions initiales des zones de mélanges turbulentes [3,4], ainsi que d'améliorer les capacités de prédiction des modèles aux tensions de Reynolds lors des phases transitoires fortement instationnaires [5].

## La simulation numérique directe : un outil puissant mais limité

Les mélanges turbulents naissent communément dans la nature du fait d'instabilités, comme celle de Rayleigh-Taylor lorsqu'un fluide léger est poussé dans un fluide plus lourd. Pour prédire l'évolution de ces mélanges, la méthode numérique de prédilection consiste à résoudre à partir des équations de Navier-Stokes toutes les échelles de l'écoulement jusqu'aux plus petites influencées par la viscosité ; c'est la simulation numérique directe (SND). Cette stratégie est par essence longue et coûteuse du fait du nombre élevé d'échelles à calculer. Or, les propriétés particulières de la turbulence à densité variable, comme son anisotropie et son instationnarité, exacerbent cette difficulté.

Pour mieux illustrer ces propos, considérons une configuration simplifiée de type homogène stratifié instable [3]. Les résultats de SND (**figure 1**) mettent en évidence les profonds bouleversements qui apparaissent dans l'écoulement, provoqués par l'injection permanente d'énergie potentielle due à la stratification. La croissance de l'énergie cinétique turbulente peut être reliée à l'intensité du mélange et à son anisotropie, correspondant à un étirement vertical des structures de densité [4]. Ainsi, les limitations des SND peuvent s'expliquer par l'évolution des différentes échelles turbulentes : les grandes structures turbulentes énergétiques atteignent progressivement la taille du domaine de calcul, d'où des effets de confinement ; la diminution des petites échelles dissipatives engendre une perte de résolu-



**Figure 1.** Visualisation de l'évolution temporelle du champ de densité dans une simulation de turbulence homogène stratifiée instable. (Haut) Coupe horizontale ; (bas) coupe verticale. (Bleu) fluide léger, (jaune) fluide lourd. Les diverses échelles turbulentes sont indiquées en légende. Les structures turbulentes croissent et s'étirent dans la direction verticale dans cet écoulement très instationnaire.

tion quand elles passent sous la taille du maillage. Le produit de la vitesse par la longueur des grands tourbillons, rapporté à la viscosité, définit le nombre de Reynolds turbulent ( $Re$ ). Il mesure la séparation entre grandes et petites échelles, et dépasse ainsi rarement  $10^3$  en SND, malgré des coûts de calcul importants (ici  $Re = 1\,200$  pour  $10^6$  heures CPU sur TERA 100 avec  $2048^3$  points).

Ces valeurs sont néanmoins en deçà de celles représentatives des régimes qui doivent être étudiés, qui atteignent fréquemment  $10^6$ . Comment alors mettre en place les données fiables et précises nécessaires pour mieux comprendre la turbulence dans les régimes rencontrés et améliorer ainsi les modèles pratiques qui servent à les prédire ?

### Un modèle spectral anisotrope pour les mélanges turbulents

Parallèlement à l'essor de la simulation numérique, la communauté scientifique poursuit le développement de modèles statistiques afin d'analyser les interactions et le transfert d'énergie entre les différentes échelles de la turbulence. Fruit de cet effort, le modèle EDQNM (pour Eddy Damped-Quasi Normal Markovian) prédit avec une excellente précision l'évolution des spectres d'énergie cinétique pour le cas simple de la turbulence homogène isotrope. Cette méthode, qui exprime les corrélations séparées en deux points, décrit plus finement les quantités turbulentes que les modèles classiques qui s'intéressent uniquement aux corrélations en un point. Historiquement, le champ d'application du modèle EDQNM a été étendu à des configurations anisotropes de turbulence d'onde. Cependant, sa complexité et son coût le rendaient difficile à mettre en œuvre. Or, les moyens de calcul dont dispose le CEA permettent aujourd'hui d'exploiter pleinement les potentialités d'un modèle EDQNM anisotrope. L'idée a donc été retenue de l'appliquer aux mélanges turbulents. Pour assurer des prédictions précises quant à la dynamique et la structure de la turbulence, des SND ont été réalisées pour permettre des validations dans les gammes permises par la simulation. Les premières comparaisons ont obligé à reconsidérer certaines fermetures du modèle pour prendre en compte l'effet de stratification dans les transferts d'énergie entre les échelles turbulentes. Un excellent accord avec les SND a pu être ainsi obtenu (figure 2). Le modèle, qui souffre de peu de limitations, est donc très performant puisqu'il permet d'obtenir, en quelques heures seulement, le fruit de semaines d'efforts en SND.

### Une stratégie prometteuse

Le modèle EDQNM anisotrope permet ainsi d'explorer les phases transitoires des écoulements stratifiés instables jusqu'à des valeurs représenta-

tives du nombre de Reynolds. Son coût de calcul raisonnable autorise des études paramétriques sur l'état initial du mélange. Les prédictions théoriques quant à la distribution initiale d'énergie aux grandes échelles sur le taux de croissance des écoulements stratifiés instables ont pu être confirmées [2,3]. Enfin, les comparaisons effectuées avec les modèles de mélange utilisés dans les codes industriels améliorent les techniques de modélisation en permettant la prise en compte des dynamiques transitoires particulières de ces écoulements [5].

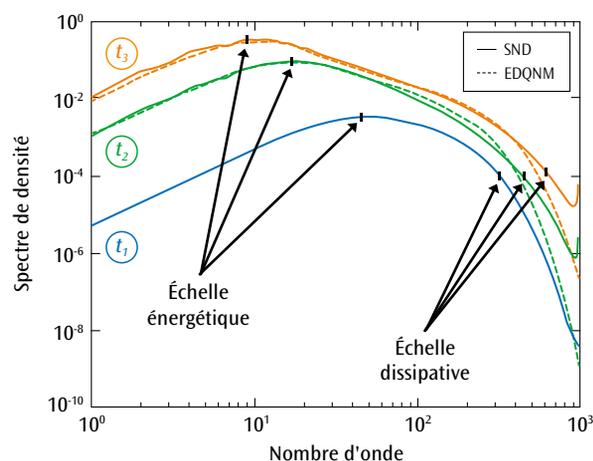


Figure 2.

Comparaison entre simulation numérique directe (SND) et modèle EDQNM pour des spectres caractérisant les fluctuations spatiales de densité. Ils dépendent d'un nombre d'onde défini comme l'inverse de la taille des tourbillons et sont représentés à différents instants  $t_1$ ,  $t_2$  et  $t_3$  correspondant au cas de la figure 1. Le modèle EDQNM donne des résultats très proches de la simulation (N.B. : à  $t_1$ , les spectres EDQNM et SND sont superposés).

## Références

- [1] A. BURLLOT, B.-J. GRÉA, F. S. GODEFERD, C. CAMBON, J. GRIFFOND, "Spectral modelling of high Reynolds number unstably stratified homogeneous turbulence", *J. Fluid Mech.*, **765**, p. 17-44 (2015).
- [2] A. BURLLOT, B.-J. GRÉA, F. S. GODEFERD, C. CAMBON, O. SOULARD, "Large Reynolds number self-similar states of unstably stratified homogeneous turbulence", *Phys. Fluids*, **27**, 065114 (2015).
- [3] O. SOULARD, J. GRIFFOND, B.-J. GRÉA, "Large-scale analysis of self-similar unstably stratified homogeneous turbulence", *Phys. Fluids*, **26**, 015110 (2014).
- [4] B.-J. GRÉA, "The rapid acceleration model and the growth rate of a turbulent mixing zone induced by Rayleigh-Taylor instability", *Phys. Fluids*, **25**, 015118 (2013).
- [5] B.-J. GRÉA, A. BURLLOT, J. GRIFFOND, A. LLOR, "Challenging mix models on transients to self-similarity of unstably stratified homogeneous turbulence", *J. Fluids Eng.*, **138**, 070904 (2016).