Module « fluides numériques : initiation à l'astrophysique »
M1 de Mécanique Orsay

Roland Grappin (CNRS Luth), Filippo Pantellini (CNRS Lesia)
Observatoire de Paris

Les comportement des fluides astrophysiques ou géophysiques (atmosphères, océans, milieu interplanétatire) peuvent être décrits par la mécanique des fluides. Le module propose une initiation aux expériences numériques intégrant les équations de Navier-Stokes compressibles, et à leur interprétation.

Le fil conducteur du cours: a) comment, dans les résultats d'une expérience, reconnaître ce qui est numérique (donc artefact) de ce qui est physique (donc pertinent) ? b) comment expliquer l'un et l'autre?

On ira du simple au compliqué : ondes sonores, chocs, explosion, tourbillons, oscillations en milieu stratifié. On donne ci-dessous quelques figures pour illustrer le plan du cours et la méthode utilisée.

1. Formation d'un choc à partir d'une onde monochromatique

La figure 1 ci-dessous montre dans l'espace-temps (espace en abscisse, temps en ordonnée) la formation d'un choc à partir d'une onde progressive de longueur d'onde initiale 2π se propageant vers la droite. Noter qu'on a donné au fluide une vitesse d'ensemble négative égale à la vitesse du son, si bien que l'onde reste sur place.

a) $t<1.8$: l'onde se déforme, les lignes de niveau convergent (l'onde se raidit) en un point particulier, mais le front d'onde central (celui qui va former le choc) reste à peu près immobile, ce qui démontre que l'onde va à la vitesse du son dans le repère du fluide.

b) $t>1.8$: démarrage du front de choc, on voit que toutes les lignes de niveau réunies partent vers la droite. Ceci démontre que la vitesse du choc une fois formé est supérieure à la vitesse du son.

La vitesse du front de choc est facilement mesurable par la pente des lignes de niveau du choc dans l'espace-temps.

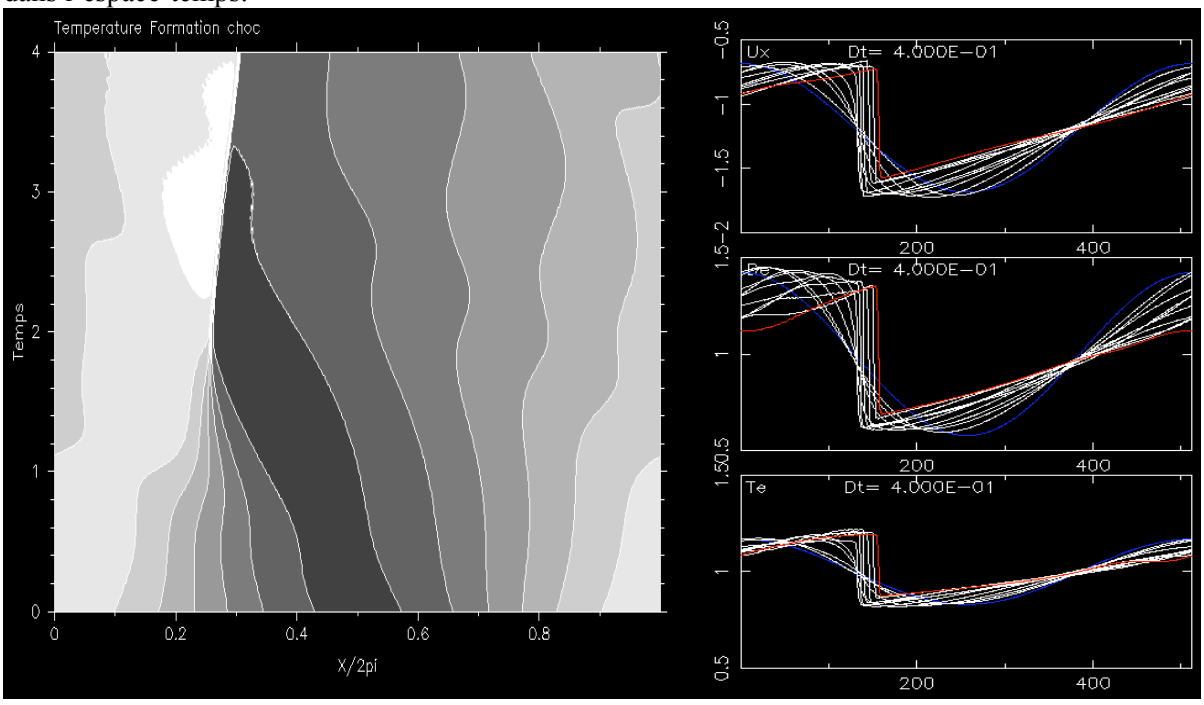

Fig.1 Formation de choc plan à partir d'une onde sinusoidale (onde progressive, vitesse u=-c+Acosx, où c = vitesse du son). A gauche, niveaux de température dans l'espace-temps (x,t). A droite, profils successifs de vitesse, densité, température. Deux étapes : formation du choc sur place en $x \approx 0.25\ \pi$, puis propagation du choc vers la droite.

2. Explosion de supernova (simplifiée)

La figure 2 ci-dessous montre dans l'espace-temps (espace en abscisse, temps en ordonnée) l'évolution d'un choc plan à partir d'un pic de température central. Par rapport au problème précédent

(qui faisait intervenir uniquement le mode sonore, compressif), un autre mode intervient : le mode à équilibre de pression, matérisalisé par la structure centrale sous dense (colonne chaude en jaune) qui reste sur place, tandis que les deux ondes de choc partent en V de chaque côté du pic de température initial.

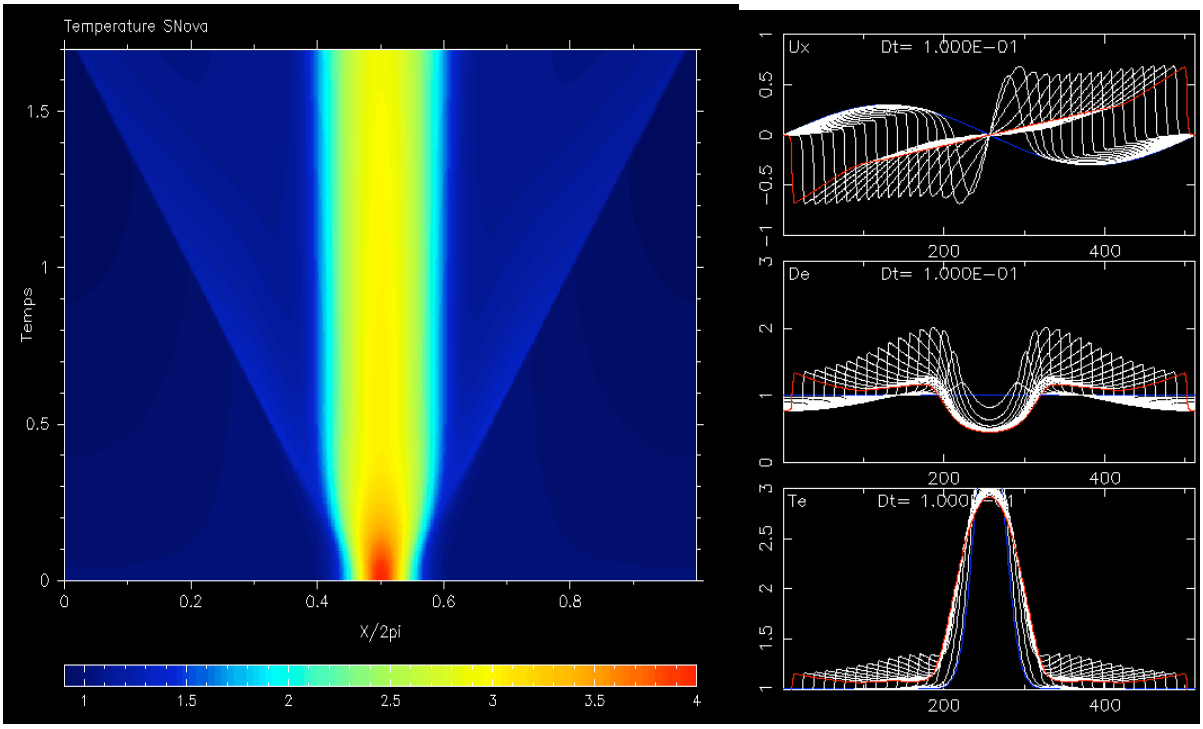

Fig. 2 Explosion de supernova, à partir d'un pic de température central initial (densité homogène, vitesse nulle partout). **A gauche, niveaux de température dans l'espace-temps. A droite, profils successifs de vitesse, densité, température.** L'évacuation de la surpression centrale initiale (chocs, qui suivent les trajectoires en V) laisse sur place une structure sous-dense et chaude, à équilibre de pression statique.

3. Mélange tourbillonnaire

La question du mélange peut se formuler ainsi: comment transporter efficacement une partie d'un fluide dans l'autre (aérer une pièce par exemple, mélanger l'eau d'une baignoire). La question se pose lorsque des événements impulsions (explosions volcaniques, solaires) donnent de l'énergie cinétique à une zone localisée : le fluide continue-t-il sur sa lancée ou bien fait-il autre chose (ondes sonores, tourbillons). La réponse est que le seul moyen qu'à le fluide d'avancer est de former des tourbillons… La figure 3 ci-dessous montre le champ de vitesse (flèches) et le champ de densité (couleurs) résultant d'une impulsion initiale vers la droite donnée au fluide dans la zone verte située entre les deux tourbillons.

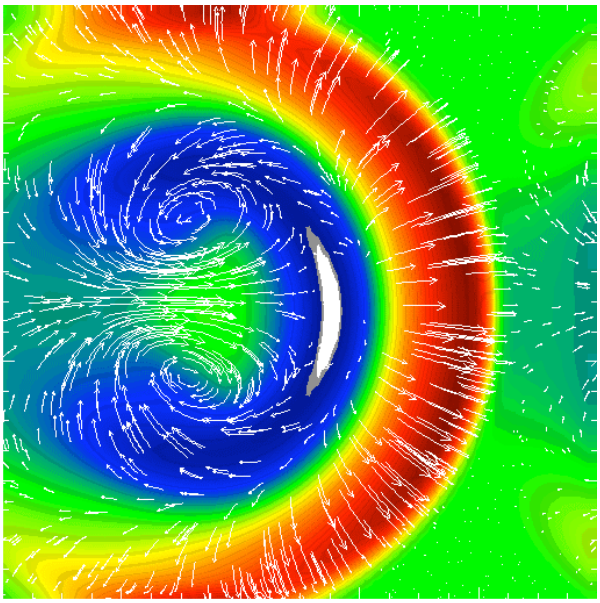

Fig.3 Formation de tourbillons et onde de pression à partir d'une impulsion horizontale localisée donnée au fluide. Le nombre de Mach initial donnée à la zone verte entre les deux tourbillons est 0.73, la densité initiale est le double du fluide extérieur. Couleur: densité. Une grande partie de l'énergie cinétique initiale est donnée à l'onde de pression (en arc), qui se propage vite mais ne transporte pas de matière; le gros du transport est assuré par les deux tourbillons dont l'énergie cinétique de translation n'est qu'une faible fraction de l'énergie initiale : il faut dépenser beaucoup d'énergie pour bien mélanger un fluide.