

Compte-rendu de la session «Mélange en milieux hétérogènes. Transport de particules»

rédigé par Aurore Naso

M. Bourgoïn : *Concentration préférentielle de particules inertielles*

M. Bourgoïn commence par illustrer la variété de systèmes naturels et industriels dans lesquels des particules sont en suspension dans un fluide. Il présente ensuite ses résultats expérimentaux sur les effets de concentration préférentielle de particules inertielles en écoulement turbulent (gouttes d'eau dans l'air). Les paramètres de contrôle de l'étude sont le nombre de Reynolds de l'écoulement R_λ , le nombre de Stokes des particules St et la concentration de ces dernières. La distribution des particules est caractérisée en utilisant la méthode de tessellation de Voronoï dans des plans, cette méthode permettant d'identifier et de caractériser les amas sans introduire d'échelle a priori.

L'orateur présente ensuite les principaux résultats de cette étude. Il montre en particulier que : (i) la distribution des aires de Voronoï est bien décrite par une loi log-normale; (ii) l'écart-type de ces aires est toujours supérieur à celui correspondant à une distribution aléatoire des objets (ce qui signifie que le phénomène de concentration préférentielle se produit dans tous les cas), et est maximal pour $St \sim 1 - 2$; (iii) la concentration à l'intérieur des clusters diminue avec la concentration globale, et est plus forte pour $St \sim 1 - 2$. M. Bourgoïn remarque que cette dernière observation pourrait être interprétée par le mécanisme de « sweep-stick ».

E. Olmos : *Mélange dans des réacteurs agités gaz-liquide pour la culture de biocatalyseurs vivants*

E. Olmos étudie l'effet du mélange macroscopique sur la culture de cellules animales pour la production industrielle de molécules thérapeutiques. Il explique que le problème vient du fait que l'augmentation de l'agitation, intéressante car elle permet d'améliorer les transferts de matière et d'améliorer le mélange macroscopique, pose de graves problèmes car elle peut conduire à la destruction des membranes cellulaires, et donc à la mort des cellules. L'objectif de l'étude est donc d'optimiser le taux d'agitation.

L'orateur a effectué dans ce but une simulation numérique de l'écoulement dans un bioréacteur, les cellules étant considérées comme des traceurs passifs, et satisfaisant un modèle cinétique. Dans le cas d'un réacteur continu, E. Olmos montre que beaucoup de cellules se suicident, par manque de nourriture et à cause des trop fortes contraintes qu'elles subissent. Ce phénomène disparaît si l'on rajoute du substrat azoté. Dans le cas d'une série inversée, la croissance de la population est maintenue, même sans ajout de substrat.

C. Nouar : *Transition vers la turbulence en conduite cylindrique pour des fluides non newtoniens : Mise en évidence d'un écoulement chaotique induit par la stratification de la viscosité*

Dans la première partie de son exposé C. Nouar présente le modèle d'un fluide non linéaire rhéofluidifiant, selon lequel la viscosité effective dépend non linéairement du deuxième invariant du tenseur des contraintes. Pour de tels fluides, l'équation du moment moyennée au sens de Reynolds contient donc un terme supplémentaire par rapport à celle d'un fluide newtonien. Ce terme est toujours positif, et est donc un terme source à petite échelle, qui pourrait cascader vers les grandes échelles.

L'orateur présente ensuite les résultats d'une étude expérimentale de la transition à la turbulence en conduite cylindrique, pour une solution de Carbopol. Il s'agit d'un fluide à seuil rhéofluidifiant dont le comportement rhéologique est décrit par le modèle de Herschel-Bulkley. Le nombre de Reynolds auquel la transition se produit est très inférieur à celui associé à un fluide newtonien. Cette transition se déroule en deux étapes. C. Nouar s'intéresse dans son exposé plus particulièrement à la première, dans laquelle une structure cohérente robuste est mise en évidence. Elle est caractérisée par deux rouleaux longitudinaux contra-rotatifs. Par le mécanisme de « lift-up », l'écoulement instantané est respectivement accéléré ou ralenti par rapport à la moyenne azimuthale. L'analyse statistique des fluctuations révèle des spectres temporels en f^{-3} , également observés en turbulence 2D dans la zone de cascade inverse lorsque celle-ci est bloquée.

B. Duret : *Mélange turbulent en écoulement liquide-gaz dense*

B. Duret présente plusieurs résultats de simulation numérique directe en turbulence homogène isotrope dans un milieu diphasique dense. L'approche est continue (résolution de l'équation de Navier-Stokes pour le liquide et le gaz, et suivi d'interface). La fraction volumique de liquide est constante. Les cas de bulles dans un milieu liquide et de gouttes dans un milieu gazeux sont traités. Le but de cette étude est d'améliorer la précision numérique en RANS ou en LES de jets. L'orateur montre que les gouttes se comportent comme des boules de billard, au sens où il semble y avoir plus d'interactions goutte/goutte que d'interactions goutte/gaz. À l'opposé, les bulles sont très perturbées par l'écoulement : il y a vraisemblablement plus d'interactions bulle/liquide que d'interactions bulle/bulle.

B. Duret présente ensuite des résultats sur le mélange scalaire dans une boîte périodique. La mesure de la moyenne du scalaire donne la vitesse à laquelle l'état de saturation est atteint, alors que celle de la variance du scalaire indique l'homogénéité du mélange. Les PDF instantanées sont auto-similaires.

M. Martins : *Direct numerical simulations and particle tracking to investigate the effect of mixing on the assimilation by microorganisms*

M. Martins Afonso commence par présenter les motivations de son étude. Il s'intéresse aux micro-organismes cultivés dans les bio-réacteurs, par exemple pour la production de levures, et plus particulièrement à la manière dont ils assimilent les nutriments présents dans la solution. Quand on passe de l'échelle du laboratoire aux bio-réacteurs industriels, on observe une diminution du taux de production, ce qui est lié au problème du mélange turbulent du sucre. Les micro-organismes sont typiquement beaucoup plus petits que l'échelle de Kolmogorov, et le transfert de masse du liquide vers eux est donc essentiellement dominé par la diffusion. Le taux d'assimilation du substrat par la phase biologique est normalement décrit comme dépendant seulement, soit de la concentration locale et instantanée vue par la particule, soit de sa moyenne dans le bio-réacteur ; toutefois ce genre d'approche conduit à des résultats peu satisfaisants, à cause de l'importance de l'histoire d'assimilation de la particule, et du couplage entre la non-linéarité de ces lois d'absorption et les grandes fluctuations de concentration.

L'orateur présente ensuite les deux types d'approches qu'il a utilisées pour tenter d'améliorer les modèles existants. La première est basée sur la simulation numérique directe d'un écoulement de turbulence stationnaire, homogène, isotrope, incompressible avec un scalaire passif (modélisant la concentration en nutriment) forcé par un gradient de concentration moyen imposé, et des traceurs (modélisant les micro-organismes) : les statistiques de la concentration en nutriment vue par les micro-organismes et du flux d'assimilation sont présentées. La deuxième approche utilise un code résolvant l'équation de diffusion en coordonnées sphériques, avec un signal imposé loin de la cellule et une condition aux limites mixte Dirichlet/Neumann à sa surface. Cela permet de retrouver des

résultats déjà connus et assez intuitifs liés au phénomène de diffusion, ainsi que d'autres conclusions innovantes et spécifiques pour une condition à l'interface particulière.

R. Zimmermann : *Mesure de la rotation et translation d'une sphère dans un écoulement turbulent*

R. Zimmermann s'intéresse à la dynamique d'une particule solide sphérique de diamètre proche de l'échelle intégrale dans un écoulement turbulent. Il insiste sur le fait que l'équation de la dynamique de ce type d'objet n'est pas connue, et est présumée beaucoup plus compliquée que celle de particules plus petites que l'échelle de Kolmogorov. Dans la première partie de son exposé, l'orateur présente les techniques utilisées pour détecter la position et la rotation de l'objet. Il explique en particulier que la mesure de la rotation est très difficile, aussi bien mathématiquement que d'un point de vue technique.

R. Zimmermann présente ensuite les résultats qu'il a obtenus en mesurant la translation et la rotation d'une « grosse » particule dans un écoulement de von Kármán. Il montre en particulier que : (i) les distributions des composantes de la vitesse de l'objet semblent gaussiennes ; (ii) les PDF des composantes de l'accélération sont non gaussiennes et, une fois normalisées par leurs écarts-types, se superposent raisonnablement avec celles mesurées pour des particules beaucoup plus petites ; (iii) la distribution de courbure des trajectoires est aussi similaire à celle mesurée pour des petits objets ; (iv) la distribution des composantes de la vitesse angulaire n'est pas gaussienne.

R. Zamansky : *Statistiques de l'accélération des particules fluides dans un canal*

R. Zamansky s'intéresse aux statistiques d'accélération de traceurs lagrangiens dans un écoulement turbulent en canal. Il présente différents types de résultats, obtenus par simulation numérique directe. Il est d'abord montré que la distribution de la norme de l'accélération est toujours log-normale, même dans la sous-couche visqueuse (sauf pour les nombres de Reynolds les plus bas, ce qui avait déjà été observé en turbulence homogène et isotrope). L'orateur propose ensuite un scaling original permettant de relier l'accélération moyenne à la distance au mur.

Il s'intéresse ensuite aux autocorrélations spatiales des composantes de l'accélération : dans un écoulement en canal il y a 9 autocorrélations indépendantes. En particulier, R. Zamansky montre que les longueurs intégrales reliées aux 3 composantes tendent vers la même valeur lorsqu'on s'éloigne de la paroi. La dernière partie de l'exposé traite des statistiques d'orientation de l'accélération.