

L'équation du millénaire

Mission impossible ?

Mercredi 12 mars 2014



Documents iconographiques ONERA

Coordination scientifique :

- *Thiên-Hiêp Lê (ONERA/DSNA)*
- *Roland Sénéor (École Polytechnique)*
- *Christian Tenaud (CNRS/LIMSI)*



Renseignements, programmes<http://www.association-aristote.fr>



Table des matières

1	Programme de la journée	1
1.1	Introduction	1
1.2	Programme, 12 mars 2014	2
2	Compte-rendu de la journée	3
3	Résumés des interventions	13
3.1	Isabelle Gallagher (Univ. Paris-Diderot)	13
3.2	Thomas Dubos (École Polytechnique)	13
3.3	Paul Manneville (École Polytechnique)	14
3.4	Pierre-Yves Lagrée (CNRS/UPMC-Institut Jean le Rond d'Alembert)	14
3.5	Irène Vignon-Clémentel (Inria)	14
3.6	Michel Visonneau (ECN/CNRS)	15
3.7	Éric Garnier (ONERA/DAAP)	15
3.8	Frédéric Chalot (Dassault-Aviation)	15
3.9	Frédéric Magoulès (École Centrale Paris)	16
3.10	François Dubois (Université Paris-Sud)	16
3.11	Vincent Moureau (CORIA)	16
3.12	Gaël Octavia (FSMP)	17

Chapitre 1

Programme de la journée

1.1 Introduction



Après CAID 2014 *Calcul Intensif Distribué pour l'Industrie*, la saison Aristote 2014 vous propose une conférence sur les équations de Navier-Stokes, la première d'un cycle de trois conférences, qui se termine par *Accréditation des résultats de la Recherche*, en interpolant par ROC & ROM *Reduced Order of Complexity & Reduced Order of Model*.



Les équations de Navier-Stokes constituent un des problèmes du *Clay Mathematics Institute Millennium Prize*, qui n'a pas encore obtenu de réponse satisfaisante et ce malgré le foisonnement des formulations, simulations numériques ou expérimentales et applications, mobilisant ainsi des légions de physiciens, mathématiciens et informaticiens.



Pourquoi nous résistent-elles à ce point ? Alors qu'elles sont omniprésentes et gouvernent notre vie de tous les jours, de la prévision du climat pour nos récoltes ou nos loisirs, à la conception des moyens de transport, avion, voiture, bateau, en passant par l'étude des ouvrages tels que bâtiments, ponts... Lors de ce séminaire, plusieurs regards éclaireront notre connaissance, avec la participation d'acteurs de divers horizons.



1.2 Programme, 12 mars 2014

08:45–09:15	<i>Accueil café</i>
09:15–09:30	<p style="text-align: center;">Ouverture, présentation de la journée</p> <p>Patrick Le Quéré (École Polytechnique) Philippe d’Anfray (Aristote, CEA)</p>
09:30–10:45	<p style="text-align: center;">Animateur de session : Roland Sénéor</p> <p>Isabelle Gallagher (Université Paris Diderot) Enjeux et difficultés mathématiques pour la résolution des équations de Navier-Stokes Thomas Dubos (École Polytechnique) Principes variationnels pour les écoulements atmosphériques</p>
10:45–11:15	<i>Pause café</i>
11:25–12:30	<p style="text-align: center;">Session cont.</p> <p>Paul Manneville (École Polytechnique) Écoulements de paroi : Comment comprendre leur transition vers la turbulence ? Pierre-Yves Lagrée (CNRS/UPMC-Institut Jean le Rond d’Alembert) Écoulements granulaires, du grain à la description Navier-Stokes continue</p>
12:30–13:45	<i>Buffet (salon de marbre)</i>
13:45–15:45	<p style="text-align: center;">Animateur de session : Christian Tenaud</p> <p>Irène Vignon-Clémentel (Inria) Écoulements sang/air : aspects multiéchelles et applicatifs Michel Visonneau (ECN/CNRS) La résolution des équations de Navier-Stokes pour l’hydrodynamique. Développements récents et perspectives Éric Garnier (ONERA/DAAP) La régularisation des équations de Navier-Stokes en pratique, application à l’aérodynamique Frédéric Chalot (Dassault-Aviation) Quelques exemples de résolutions des Équations de Navier-Stokes dans l’industrie aéronautique</p>
15:45–16:00	<i>Pause</i>
16:00–18:00	<p style="text-align: center;">Animateur de session : Thiên-Hiêp Lê</p> <p>Frédéric Magoulès (École Centrale Paris) Écouter Le Passé François Dubois (Université Paris-Sud) Ces curieux schémas de Boltzmann sur réseau Vincent Moureau (CORIA) Le problème du <i>Big Data</i> en mécanique des fluides Gaël Octavia (FSMP) Navier-Stokes pour tous</p>
18:00	<i>Fin du séminaire</i>

Chapitre 2

Compte-rendu de la journée

Ce compte-rendu a été réalisé par Jacques-Olivier Baruch de l'agence Umaps, « Communication de la recherche et de l'innovation », <http://www.umaps.fr>.

L'équation du millénaire Mission impossible ?

Devant près de 100 participants réunis dans l'amphithéâtre Becquerel de l'École Polytechnique, Thiên-Hiêp Lê (Onera, Aristote), coordinateur de la journée, annonce d'emblée que l'histoire des équations de Navier-Stokes a un parfum de miel. Pour les *ninjas* des mathématiques, de la physique et de l'informatique, c'est une équation à un million de dollars. Comme le reconnaît Patrick Le Quéré, directeur adjoint de l'enseignement et de la recherche à l'École Polytechnique, qui remercie l'association Aristote, organisatrice de la journée, « Les équations de Navier-Stokes sont compliquées ». Cela préoccupe 24 heures sur 24 de nombreux mathématiciens et physiciens. Les plus grands noms de la science y sont associés. C'est un des sept problèmes clefs du Clay Institute, qui remettra un million de dollars à celui qui le résoudra. Un mathématicien kazakh (Otelbaiev) a pensé récemment avoir trouvé la solution, mais cela ne paraît pas être le cas. Les équations ne sont donc toujours pas résolues. Et pourtant « des avions volent... ». Avant d'entrer dans le vif du sujet, Philippe d'Anfray (CEA, Aristote) souligne : « La spécificité du programme et de l'association est de croiser les points de vues et de mélanger les genres. Les équations de Navier-Stokes s'appliquent parfaitement au genre... ». Le *casting* a été assuré par Roland Sénéor (École Polytechnique) et Christian Tenaud (CNRS-Limsi).

Isabelle Gallagher (Univ. Paris-Diderot)

Les maths en Une

Honneur à la science la plus fondamentale, les mathématiques. Isabelle Gallagher rappelle l'histoire des équations, ce qu'elles modélisent et comment elles s'écrivent. La genèse vient d'un prix de l'académie des sciences de Berlin qui au XVIII^e se demandait quelle était la force qui s'appliquait à un corps passant dans un fluide.

Jean Le Rond d'Alembert prit le problème en mains en calculant comment s'écoule une rivière. D'Alembert a décrit le fluide par son champ de vitesse, avec des dérivées partielles, un concept introduit par Leibniz et Newton un peu auparavant. Euler continua le travail de d'Alembert en vue d'établir ces équations pour un fluide non visqueux. Mais il s'avère que ce fluide n'a pas de portance, ce qui pose un problème car alors les bateaux ne pourraient pas naviguer. Pour pallier ce manque, Navier et Stokes ont modifié l'équation d'Euler en rajoutant la viscosité. Il s'agit d'un système de quatre équations aux dérivées partielles non linéaires. Les inconnues sont les trois coordonnées de la vitesse et la pression. Quatre équations pour quatre inconnues, cela ne devait pas être insurmontable. Et pourtant...

Au XIX^e siècle, on a cherché des solutions analytiques, mais c'était impossible. On a alors cherché des solutions approchées. Il fallait d'abord montrer que les équations étaient bien posées (existence, unicité, stabilité). Mais aussi donner des propriétés qualitatives sur les solutions, définir un cadre d'étude et simplifier les équations.



Un pas a été franchi en 1934. La conservation de l'énergie a permis à Jean Leray d'obtenir un théorème d'existence de solutions « turbulentes » pour tout temps. Si cette seule conservation semble suffisante pour obtenir des solutions globales, elle est en général insuffisante pour garantir l'unicité de telles solutions. Fujita et Kato (1964), Cannone, Meyer et Planchon (1994) et Koch et Tataru (2001) ont fait aussi avancer le problème. Récemment, le Kazakh Otelbaiev a publié en russe une démonstration de cent pages. Mais un contreexemple a été obtenu par Montgomery-Smith, puis par Tao. Celui-ci a proposé un modèle proche conservant l'énergie. C'est donc une

réelle avancée.

Certaines simulations numériques suggèrent l'apparition de singularités instables, ce qui ne sert pas les physiciens qui ne peuvent pas utiliser ces modèles. À l'inverse, la physique peut aider à trouver des solutions globales. Par exemple, le mouvement de l'océan ou de l'atmosphère doit prendre en compte la rotation de la terre. En ajoutant la force de Coriolis dans les équations de Navier-Stokes, on trouve des solutions globales quelles que soient les données initiales. Il en est de même si on trouve des variations lentes dans une direction donnée.

Thomas Dubos (École Polytechnique)

Atmosphère, atmosphère !



Thomas Dubos renonce au million de dollars, car il ne regarde que les équations d'Euler sans viscosité. Il se demande si l'écoulement atmosphérique obéit aux équations de Navier-Stokes. L'énergie de l'écoulement atmosphérique est celle du Soleil. Il faut ajouter la rotation et la gravité de la Terre. Bjerknes a posé ce problème en 1904 en se référant à Clairaut (1743) et à Laplace (1798).

Dès que la météorologie s'est définie, à la fin du XIX^e siècle, comme une science physique et mécanique, elle a cherché à simplifier pour ses besoins les équations de Navier-Stokes. Par exemple, Richardson a introduit en 1922 l'approximation hydrostatique. Le but était

d'obtenir des solutions qui permettent de comprendre l'écoulement et pas seulement de belles équations. Ainsi, alors que la gravité varie entre 9.78 et 9.83, on la considère constante. De même, la Terre est considérée comme sphérique, alors que sa forme est plutôt « patateïdale ». Ces approximations permettent de s'approcher du problème.

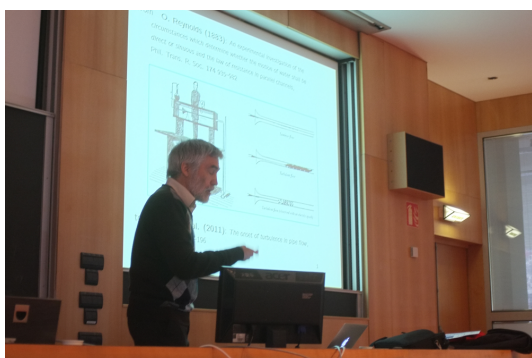
Quand on simplifie, il faut faire attention à ne pas perdre les propriétés fondamentales. Il faut conserver le moment, l'énergie ou la vorticité potentielle. Un outil simple est la formulation variationnelle. La géométrie pousse à donner un rayon constant, une gravité constante et on peut négliger des petits termes

(approximation traditionnelle de Laplace) ce qui simplifie grandement les équations. Il faut néanmoins respecter les symétries pour que se vérifient les lois de conservation.

L'écoulement atmosphérique se situe dans un régime particulier car, bien que le nombre de Mach soit petit, la gravité impose de fortes variations de densité. Cette simplification obéit à deux logiques, l'une opérationnelle visant à produire des solutions à ces équations, l'autre réductionniste visant à réduire ces équations à la plus simple expression permettant d'expliquer des phénomènes. Il s'en est suivi une abondance de systèmes approchés, adaptés à différentes échelles de temps et d'espace, formant une hiérarchie dont les équations de Navier-Stokes sont le sommet.

Paul Manneville (École Polytechnique)

Quand le fluide devient turbulent



Paul Manneville, de l'École Polytechnique, s'intéresse quant à lui à la transition vers la turbulence. En 1883, Reynolds a fait les premières expériences et introduit le nombre qui porte maintenant son nom, caractérisant la nature de l'écoulement. À petit nombre de Reynolds, l'écoulement est laminaire. Il passe en mode turbulent à grand nombre de Reynolds.

En faisant circuler de l'eau dans un tube cylindrique (écoulement de Hagen-Poiseuille), on voit apparaître des bouffées de turbulence dans l'écoulement laminaire. Quand le nombre de Reynolds augmente, ces bouffées — d'abord timides et transitoires — deviennent fran-

chement invasives, ce qui conduit à de la turbulence permanente. Un autre écoulement, dit de Couette, résulte du cisaillement entre deux plaques. Lorsque le nombre de Reynolds augmente, il présente d'abord des spots turbulents transitoires, puis des bandes alternativement laminaires et turbulentes, et enfin un régime de turbulence uniforme.

De manière générale, la viscosité ne vient que tempérer la tendance du système à devenir instable. Mais dans un écoulement de paroi, la viscosité peut être responsable d'une instabilité à grand nombre de Reynolds. En fait, à des nombres de Reynolds moins élevés, l'écoulement peut s'écarter du régime laminaire. Comment arrive-t-on à cette situation ? Il s'avère que des vortex longitudinaux font monter du fluide lent vers le centre du canal et amènent du fluide rapide vers la paroi. Ces perturbations sont instables et dégènèrent localement en turbulence.

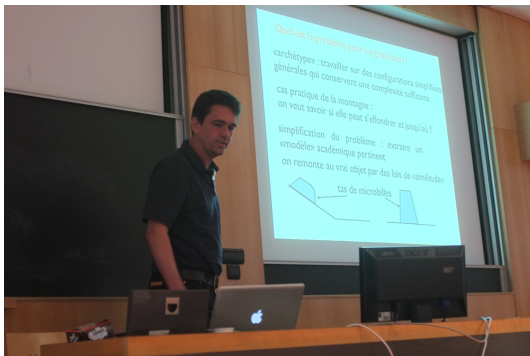
Mathématiquement, ces situations perturbées sont approchées selon une technique qu'on appelle l'homotopie, interpolation progressive d'un profil d'écoulement vers un autre. Les solutions obtenues, qui sont toutes instables, décrivent des diagrammes de bifurcations. Une autre façon d'obtenir des solutions exactes consiste à rechercher des solutions périodiques au sein d'un écoulement turbulent. L'idée d'utiliser ces orbites instables revient à Poincaré dans son étude du problème des trois corps. Cela conduit à une vision chaotique du système qui permet d'expliquer le fait que les bouffées ou spots turbulents ne sont que transitoires. À mesure que le nombre de Reynolds augmente, la turbulence se développe. Dans l'écoulement de Hagen-Poiseuille, vers un nombre de Reynolds de 2040, la probabilité que les bouffées turbulentes « meurent » spontanément est inférieure à la probabilité qu'elles en « engendrent » de nouvelles, ce qui assure la pérennité de la turbulence. En régime invasif, la turbulence se développe par instabilité de l'arrière des bouffées (front laminaire- turbulent) qui recule en moyenne, tandis que leur tête (front turbulent- laminaire) accélère. Ces processus n'ont été quantitativement bien décrits que tout récemment, en 2011, par B. Hof, D. Barkley, et coll.

À l'échelle globale, l'écoulement peut être conçu comme un réseau de petites boîtes, les Minimum Flow Units, qui peuvent être individuellement, donc à l'échelle locale, dans des états turbulents (actifs) ou laminaires (morts). Les poches turbulentes qui se développent sont limitées par des fronts stochastiques dont l'étude fait appel à la théorie de la percolation dirigée. Bien que la dynamique reste déterministe, tout se passe comme si les sites avaient la possibilité de « mourir » ou de propager la turbulence en « contaminant » leurs voisins, avec des probabilités bien définies. Cela ouvre le champ à la mécanique statistique. La coexistence laminaire-turbulent est régie par des processus de nucléation. Les germes turbulents ou laminaires de grande taille apparaissent comme résultats d'événements extrêmes tels que les climatologues peuvent en voir dans l'atmosphère.

Ce type d'approche est valable pour les couches limites mais beaucoup de travail reste à faire pour arriver à contrôler la transition dans un contexte industriel tel l'avionique.

Pierre-Yves Lagrée (CNRS/UPMC-Institut Jean le Rond d'Alembert)

Sabliers, dunes et avalanches



Un milieu granulaire est un ensemble constitué de grains de plus de $100 \mu\text{m}$. C'est le sable, les graviers, les rochers, les céréales, les granulés, le sucre, le riz, des billes de verres... Cela représente 50% des matériaux transportés. C'est aussi les dunes de sables, les terrils, les tas de betteraves, les avalanches, les écoulements maritimes.

Plusieurs grands noms sont associés à ce milieu. Jean Le Rond d'Alembert est à l'origine de l'étude des milieux continus. Coulomb a travaillé sur la notion de frottement. Adhémar Barré de Saint-Venant s'est intéressé à l'agriculture. Bagnold (décédé en 1990) a observé les

déserts et a formalisé les écoulements granulaires. À noter aussi feu Pierre-Gilles de Gennes et le groupe GRD Midi qui ont posé les idées fondamentales sur le milieu granulaire.

Pour étudier ce système, Pierre-Yves Lagrée évoque deux solutions. Dans la première, on prend un cas simplifié et on remonte au cas réel (seau de billes à la place d'une montagne qui s'écroule). On voit que le comportement du milieu est à la fois solide et liquide. La simulation de la dynamique de contact des grains est très réaliste. Le sol est un milieu continu qui devient discontinu à petite échelle. Il se déforme à la limite de la loi de Mohr-Coulomb.

Un autre point de vue est celui de la mécanique des fluides — gaz ou liquides — (chocs et dissipation d'énergie, car les collisions sont inélastiques). Le sol s'écoule si la contrainte dépasse un certain seuil. À partir des expériences de laboratoire et des simulations, le groupe GDR Midi a vu qu'il y avait une relation entre la contrainte tangentielle et la contrainte normale. Cette relation dépend d'un nombre dit d'inertie qui est le rapport sans unité entre un temps de chute et un temps de déplacement. Le fluide se comporte comme si la viscosité était le rapport entre un seuil et un cisaillement. Cette relation peut être introduite dans les équations de Navier-Stokes. Un code de simulation (Gerris) a été formulé. Il utilise la méthode *Volume of Fluid*. Quand le milieu granulaire s'arrête, on peut le considérer comme un fluide très visqueux, donc avec un mouvement très lent. Cela fonctionne partout sauf en avant de l'effondrement où les grains agissent comme dans un gaz. Dans un sablier, Hagen (1852) a montré que le débit est constant et dépend de l'ouverture et non de la hauteur de sable.

Les équations de Navier-Stokes correspondent bien à la simulation de tous les grains (simulation discrète). Cette approche est intéressante, car des grains discrets peuvent être modélisés comme un fluide

continu. Mais certains effets ne sont pas encore pris en compte comme la fonction du cisaillement et de la pression, la ségrégation entre gros grains et petits grains ou les grains de formes différentes. Ces approches ont beaucoup d'applications dans l'industrie et en géophysique (boues, avalanches, érosion des côtes). Lors de la discussion, il est justement fait mention des événements récents d'érosion des côtes. On peut voir en réel l'impact de la mise en place des dunes de rochers en avant des dunes de sable. Les données recueillies permettront d'affiner la problématique.

Irène Vignon-Clémentel (Inria)

Une meilleure circulation du sang et de l'air

Irène Vignon-Clémentel utilise quant à elle les équations de Navier-Stokes dans le domaine de la biologie-médecine. En effet, le sang et l'air sont deux fluides. Leur circulation dans le corps humain pose les mêmes questions. Dans les deux cas, elle peut être modélisée par les équations de Navier-Stokes pour comprendre ce qui se passe lors de pathologies ou pour améliorer les opérations chirurgicales.

Pendant la grossesse, de nouveaux vaisseaux sanguins se forment avec parfois apparition de pathologies qu'on opère à la naissance. Mais les risques sont importants. Lorsqu'un nouveau-né a un cœur dont une pompe ne marche pas bien, il a 50% de risque de mortalité après la première opération ou une morbidité importante. Lorsqu'un patient est atteint d'emphysème ou d'asthme, il est intéressant de savoir où va se déposer le médicament en aérosol. En chirurgie vasculaire, lors des opérations d'enfants qui ont des problèmes cardiovasculaires, il faut savoir prévoir la pression post-opératoire. De même, lors de la conception de cœurs artificiels, on peut prévoir des formes d'artères artificielles mieux adaptées que d'autres.



Quelques défis pour les simulations quand on veut les appliquer spécifiquement à un patient : comment passer de la simulation de quelques vaisseaux à l'ensemble de la circulation ? Les données cliniques auxquelles on a accès ne sont pas forcément prises là où on veut voir ce qui passe. Enfin, le passage de modèles 3D aux modèles réduits ou inversement n'est pas aisé. De plus, dans les simulations, les conditions aux limites sont importantes. On peut imposer une pression, mais les simulations considèrent un système ouvert, alors que la circulation sanguine est fermée. Des algorithmes prennent en compte les données disponibles prises à certains endroits.

Mais se pose alors un problème : la perte de pression observée est du même ordre que la précision des données. La forme des vaisseaux est aussi importante. Les simulations montrent que la forme en Y barré semble mieux adaptée que la forme habituelle en T. En Y barré, la distribution de pression entre les deux poumons est de 47-53 alors qu'elle est répartie 69-31 avec la forme habituelle choisie par le chirurgien.

En pratiquant des chirurgies virtuelles, il apparaît que les difficultés sont les mêmes. Lors des simulations, on ne peut pas couper les vaisseaux n'importe où. Il faut souvent rajouter des vaisseaux virtuels, contraindre les vitesses en ajoutant un terme aux équations qui stabilise ce qui se passe à la frontière.

Irène Vignon-Clémentel conclut par la spécificité de ce travail transdisciplinaire ; il demande de parler le même langage que les médecins, ce qui n'est pas évident mais très enrichissant.

Michel Visonneau (ECN/CNRS)

Améliorer la propulsion des bateaux

Après quelques problèmes de connections informatiques, Michel Visonneau nous immerge dans le domaine maritime. Les équations de Navier-Stokes servent en effet aux constructeurs de bateaux qui s'intéressent à la propulsion des navires dans un milieu non déformé. La modélisation est chère et lourde, mais est favorisée par l'utilisation de la CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Il faut prendre en compte l'écoulement autour du navire et autour des hélices, ainsi que le couplage entre la houle et le mouvement. Il faut éviter les trainées, positionner les entrées, redessiner les gouvernails. Sans oublier de traiter les surfaces libres, celles qui sont en dehors de l'eau.

La taille des bateaux fait que le nombre de Reynolds est très grand (10^9), alors que les simulations se font avec des nombres de Reynolds mille fois plus petits (10^6). Elles doivent prendre en compte les géométries des propulseurs (libres pour des navires fluviaux ou carénés) avec des maillages de quelques millions de points. Pour la Coupe de l'America, avec des vitesses atteintes de 42 nœuds, seules les simulations sont efficaces : aucun bassin d'essai ne permet d'aller à ces vitesses.



Pour réaliser ces simulations, il faut d'abord des modèles physiques pour représenter la turbulence et la cavitation. En hydrodynamique, il est important de prendre en compte l'inégalité des contraintes normales, les géométries complexes. La méthode est basée sur les volumes finis non structurés. Les résultats sont bons grâce au développement d'une discrétisation compressive. La propulsion est compliquée, car l'écoulement se fait alors sur une partie mobile en rotation. L'utilisation du biomimétisme est également intéressante. Par exemple, le groupe a testé une propulsion mimant le mouvement de quatre queues de baleine mis sur un cercle. Cela semble

bien fonctionner pour les bateaux de rivière.

Pour l'avenir, il faut améliorer la discrétisation, utiliser de nouveaux algorithmes car les simulations prennent peu de mémoires, coupler les stratégies vitesse et pression. On est dans un domaine où les simulations sont plus efficaces que les expériences. Mais on manque de données pour valider ces simulations.

Éric Garnier (ONERA/DAAP)

La turbulence à grande échelle



L'étude de la turbulence est un sujet complexe car elle tourne dans l'espace, est imprévisible et dissipe de l'énergie. En aérodynamique, la disparité d'échelle est le point clef. Ce sont les grandes échelles qui contiennent l'énergie et l'anisotropie, alors que les petites échelles pompent de l'énergie. On peut faire des moyennes statistiques et régulariser l'écoulement en enlevant ces petites échelles. Cela fonctionne si l'énergie est produite à grande échelle et transférée vers les petites échelles. C'est ce qui se passe en aérodynamique.

Les simulations doivent prendre en compte un petit maillage aux bords de la paroi et des grandes mailles plus

loin. On prend alors les équations de Navier-Stokes régularisées. Plus on a de points dans la simulation, plus c'est turbulent. Pour ce faire, la simulation à grandes échelles offre un cadre théorique assez abouti, basé sur la notion de filtre en espace. Néanmoins, en pratique, la notion de filtrage explicite est rapidement abandonnée, car elle coûte très cher en temps de simulation et la prise en compte des petites échelles se fait *via* un modèle de viscosité dit de sous-maille. Par ailleurs, le schéma pour la discrétisation des dérivés en espace introduit une autre forme de filtrage qui entre en compétition avec le premier.

Une fois ce cadre établi, Eric Garnier discute de la pertinence des méthodes réellement utilisées pour la simulation des grandes échelles en aérodynamique. À noter que l'Onera met en œuvre des manip numériques qui testent l'enveloppe de vol des avions afin de limiter l'onde de choc qui apparaît.

Frédéric Chalot (Dassault-Aviation)

Navier-Stokes dans l'industrie aéronautique

Chez Dassault, on s'intéresse aux avions d'affaires comme le Falcon, aux avions de combats et aux véhicules spatiaux.

Frédéric Chalot centre son propos sur les Falcon et ses spécificités. En effet, le volume de pétrole doit être ajusté au volume à vide, à sa force de propulsion et à la forme de l'avion. Les clients des Falcon veulent aussi monter très vite au dessus du trafic et pouvoir aussi bien se poser en ville comme à Londres sur des pistes courtes ou en Afrique sur des pistes en terre. Autant de défis à relever. Lors de la conception des avions, les simulations jouent un rôle très important. Frédéric Chalot souligne que la particularité de ces simulations d'écoulement de l'air autour d'un avion est qu'il faut absolument structurer l'espace, car l'effet d'un avion se fait sentir sur des kilomètres à la ronde.



Les équations de Navier-Stokes permettent de dessiner les avions depuis longtemps avec précision car « on connaît très bien les matériaux utilisés ». Les ingénieurs de Dassault utilisent des variables entropiques à la place des variables conservatives. Comme les opérateurs sont symétriques, ils n'en calculent que la moitié. Malgré cet avantage, le temps de calcul est énorme. Comme le nombre de points à utiliser est environ égal au nombre de Reynolds au carré, avec $R = 10^6$, il faut 500 000 milliards de points. C'est trop. On peut faire varier la maille, mais ce n'est pas ce qui est fait. On utilise des modèles de turbulence RANS et DRSM, des modèles à deux couches. On

stabilise les équations et on obtient une équation que l'on peut intégrer par parties.

Comme la puissance de calcul augmente, on peut prévoir ce que sera le futur. Aujourd'hui, on utilise des multiprocesseurs sans perdre beaucoup de puissance de calcul. Une simulation de 10 millions de points ne prend aujourd'hui qu'une heure. Ce n'est rien. Il reste encore beaucoup de travail à effectuer. Frédéric Chalot souligne la nécessaire rapide amélioration des simulations sur les détails de la voilure ou sur les trains d'atterrissage.

Frédéric Magoulès (École Centrale Paris)

Simuler l'acoustique de Royaumont

Suite à l'explosion de l'usine AZF à Toulouse en 2001, l'École Centrale de Paris a été impliquée dans un projet de simulation destiné à prévoir les effets des fuites dans les conduites de gaz de Shinjuku

à Tokyo lors d'une attaque terroriste ou d'un séisme au Japon. La question était de savoir comment le gaz se répand et progresse vers la gare puis explose avec une onde de choc et comment les vitres des buildings volent en éclats, en particulier ceux qui ne sont pas en face de l'onde.

Pour répondre à la question, l'équipe de Frédéric Magoulès a utilisé de grands systèmes linéaires comme ceux qu'il détaille sur un autre projet : l'acoustique de l'abbaye de Royaumont. Comme les moines chantaient dans ces anciens édifices, le but de l'étude a été de simuler le rendu sonore à l'intérieur de l'église dont il ne reste aujourd'hui que deux piliers. Pour tenter de se représenter ce qu'était l'abbaye du temps de sa splendeur, Frédéric Magoulès a obtenu l'aide d'historiens et d'archéologues afin de récupérer les peintures de l'époque et les récits administratifs qui décrivaient les lieux.



En fait une église, c'est comme une voiture. L'orgue est le pot d'échappement, les murs sont en pierre plutôt qu'en métal, les interactions des pneus avec la route sont les gens qui marchent sur le sol. Pour simuler cet environnement, l'équipe a utilisé les méthodes d'éléments finis stabilisés. En acoustique, un écoulement fluide doit être maillé de la même façon dans toute l'église. On cherche à découper le domaine initial en plusieurs sous-domaines et chacun va être mis sur des processeurs différents. Cela permet un calcul plus facile, de tenir en mémoire et d'aller plus vite. C'est « diviser pour régner et combiner ».

Le premier à utiliser cette méthode fut Schwartz (1870) qui a résolu l'équation de Laplace sur une combinaison de géométries simples avec des conditions aux limites précises. En allant progressivement sur les différentes géométries, il est arrivé à montrer la convergence vers une solution unique. En 1988, Pierre-Louis Lions a revisité la méthode pour l'implanter sur des machines parallèles. Il a transformé les géométries en diminuant la dimension. Et a choisi de commencer les itérations $n+1$ quand toutes les itérations n étaient finies. En 1990, Pierre-Louis Lions a choisi des opérateurs spécifiques qui permettent de converger, mais sur des géométries très simples et des interfaces droites. Avec cette méthode, le nombre d'itérations à effectuer lors d'une simulation de voiture et même sur un appartement simple a été diminué. Mais pour une église, c'est plus compliqué. Les itérations synchrones comme celle de Schwartz et de Lions donnent trop de temps d'attente. Pour aller plus vite, la bonne méthode est de faire des calculs asynchrones, mêmes s'ils sont faux. Avec 1024 processeurs en synchrone, on met 2 fois plus de temps qu'en asynchrone. L'idée est que le processeur en retard va bénéficier du travail des autres et rattraper son retard. « C'est immoral mais ça marche bien », sourit Frédéric Magoulès.

Un film retrace le travail des 25 personnes qui ont permis de redessiner l'abbaye de Royaumont. On voit comment les ondes sonores se propagent dans l'église. Cela a été calculé en 1D puis le résultat a été utilisé pour être appliqué dans l'église refaite fidèlement jusqu'à la texture des vitraux. Cette méthode de découpage de l'espace peut être faite aussi en temps. Ce qui permet de résoudre des problèmes instationnaires avec des phénomènes transitoires. Cela demande plus de calculs, mais guère plus de temps de calcul car la synchronisation des différents processeurs est évitée.

François Dubois (Université Paris-Sud)

Ces curieux schémas de Boltzmann sur réseau

François Dubois commence par une histoire en deux parties. La première est celle des automates cellulaires. Elle commence par une supercherie. Au XVIII^e siècle, « le turc » mécanique contenait en fait un homme de petite taille. Elle continue par les travaux de von Neumann sur les machines auto-

reproductives. L'histoire se poursuit avec « le jeu de la vie » (1970) dont le principe est de regarder sur un damier le nombre des voisins d'une case : si une case n'a pas de voisins, elle meurt, de même si elle en a trop. Au bout de 4 ou 5 pas d'itération, on peut retrouver les mêmes formes.

Les physiciens ont essayé de faire le jeu de la vie avec des molécules qui bougent. Quand il y a collision, on attend un peu, puis on repart dans l'autre direction. Ceci a permis de simuler des allées de Karman, ce motif périodique de tourbillons causés par la séparation instable d'un écoulement autour d'un corps. En 1974, K. Wilson a regardé ce qui se passait à la limite avec des blocs de plus en plus grands, une densité de sites occupés plus grande, une échelle de temps plus longue... Avec un réseau hexagonal et un départ au hasard, cela commence à ressembler à la dynamique des fluides.



Deuxième partie de l'histoire, la théorie cinétique des gaz de Boltzmann et Maxwell, la loi de Gauss et l'équation de l'évolution dynamique de Boltzmann en 1872, qui donne du transport libre et des collisions au sein du gaz. On démontre ainsi formellement les équations de Navier-Stokes. Les automates cellulaires et la cinétique des gaz donnent le cadre des schémas de Boltzmann. Mais l'équation de Boltzmann demande un espace de dimension 6, ce qui est très dur à gérer au niveau informatique. L'espace des vitesses R^3 peut être réduit à un espace discret. Aujourd'hui on est sur une méthode particulière en réseau à 3 dimensions. L'itération se fait

en deux étapes : relaxation et équilibre. Les équations de Navier-Stokes émergent de ce système.

Il y a de nombreuses applications industrielles : le logiciel Powerflow de la société EXA, à Boston, permet de suivre l'écoulement le long d'une voiture ou dans les systèmes de refroidissement. Autres applications : le démarrage des voitures ; la façon dont une catastrophe aquatique démolit un pont ; comment le pétrole se répand dans un milieu poreux ou la forme optimale d'un radiateur polonais. Chez Renault avec le code LaBS, on calcule le champ de vitesse moyenne autour d'une Mégane, les ondes acoustiques autour des rétroviseurs, etc.

Vincent Moureau (CORIA)

La question du *Big Data*



Que fait-on des données des simulations de mécanique des fluides ? Selon Vincent Moureau, l'enjeu du *Big Data* est de savoir traiter les sujets qui intègrent ou génèrent beaucoup de données comme la génomique, la finance, internet, la prévision météo, ... ou les simulations de dynamique des fluides. En 2020, les ordinateurs vont dépasser l'exaflops. Le Gordon Bell prize 2013 a été remis à une équipe qui a fait une simulation de 11 pétaflops avec 13 000 milliards de cellules.

L'objectif est de résoudre les équations de Navier-Stokes avec une haute résolution et un grand nombre de processeurs. La simulation à grande échelle (LES) et de

la simulation directe (*Direct Numerical Simulation*) sont des approches de modélisation instationnaire de plus en plus attractives pour la modélisation des écoulements turbulents en raison du développement constant des super-ordinateurs massivement parallèles. Cette augmentation de la puissance de calcul

permet d'améliorer la fidélité des simulations soit en augmentant la résolution de maillage ou le temps physique de la simulation, soit en complexifiant les modèles physiques.

Ainsi, de plus en plus de simulations instationnaires traitent plusieurs milliards de degrés de liberté en utilisant plusieurs milliers de processeurs. Un exemple est la prévision d'émission d'oxydes d'azote dans des flammes. Autre exemple, que se passe-t-il quand on mélange deux phases d'un carburant (liquide et gazeux) ? Tout cela demande beaucoup de données. Et ces données peuvent cacher la dynamique du mélange ou de la flamme. Dans l'identification d'un vortex au milieu d'un flux turbulent, certains critères comme le critère Q peuvent résoudre le problème. Cela a été fait sur la simulation d'un flux constitué de 18 milliards de tétraèdres et les 16384 cœurs de la machine CURIE. Dans les chambres de combustion, il semble que le *Precessing Vortex Core* (PVC) joue un rôle important dans la dynamique des écoulements en rotation. Pour le faire apparaître sur des gros maillages, il faut jouer sur des filtres. En combinant différents filtres, on peut voir les interactions entre le flux et le PVC.

Gaël Octavia (FSMP)

Navier-Stokes pour tous

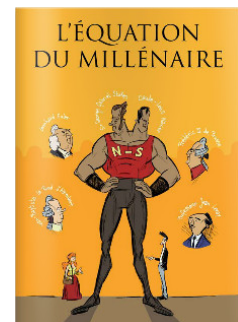


L'histoire de Gaël Octavia et de la bande dessinée « L'équation du millénaire » peut donner envie aux participants de vulgariser leur science. L'idée vient de la Fondation des Sciences Mathématiques de Paris (FSMP) qui regroupent la plupart des laboratoires de mathématiques de Paris. En plus de la formation en mathématiques, la FSMP se donne pour mission de diffuser la culture mathématique. Avec un reliquat d'argent, elle a eu l'idée d'impliquer les chercheurs sur un travail de vulgarisation. Pour la culture générale, mais aussi pour faire découvrir des objets, des concepts ou des méthodes, montrer une recherche vivante, sans oublier de tordre le cou

aux idées reçues en maths et même de faire aimer les maths.

Avec Nicolas Rougerie, Gaël s'est prise au jeu d'écrire le scénario, laissant les dessins à de vrais illustrateurs. Deux ans et demi après le choix du projet, la bande dessinée a été éditée début 2013. Ce n'est surtout pas un cours de maths, mais une vraie histoire des équations de Navier-Stokes avec des personnages attachants et de l'émotion afin de faire passer les buts de la vulgarisation avec subtilité. Plusieurs références : Logicomix, sur l'histoire de la logique, les bandes dessinées de Marc-Antoine Mathieu, la pièce *A disappearing number*.

Comme l'écrit Robert McKee dans « Story », les auteurs ont appliqué les clefs de la dramaturgie : un personnage a un but et trouve les moyens d'y parvenir. Le personnage est double : il y a un candide et un matheux (pour éviter les stéréotypes, le garçon est le candide...).



L'intrigue principale est le récit de l'histoire des équations de Navier-Stokes. Elle intègre une intrigue secondaire, l'histoire d'amour entre les deux personnages. L'histoire des équations de Navier-Stokes s'arrête à Leray pour ne pas avoir à dessiner des personnes encore vivantes. Il a fallu surmonter quelques difficultés : comment montrer une science vivante, ce qu'est un modèle, l'évolution de l'équation d'Euler à Navier-Stokes, ce que sont des solutions fortes ou faibles. Le budget fut de 8000 euros. Il a permis d'imprimer 2000 exemplaires distribués gratuitement ou accessibles par internet. Aujourd'hui, il va être temps de lancer la réimpression et de commencer une réelle collection avec d'autres titres.

Chapitre 3

Résumés des interventions

3.1 Isabelle Gallagher (Univ. Paris-Diderot)

Enjeux et difficultés mathématiques pour la résolution des équations de Navier-Stokes

Nous expliquerons la formulation des équations de Navier-Stokes ainsi que leurs principales caractéristiques et nous essaierons de mettre en évidence les difficultés mathématiques liées à leur résolution. En particulier, nous expliquerons en quoi la conservation de l'énergie a permis à Jean Leray d'obtenir en 1934 un théorème d'existence de solutions « turbulentes » pour tout temps, mais que cette seule conservation semble insuffisante pour garantir l'unicité de telles solutions en général. Nous décrirons également quelques progrès très récents dans la résolution de cette question.

3.2 Thomas Dubos (École Polytechnique)

Principes variationnels pour les écoulements atmosphériques

L'écoulement atmosphérique obéit-il aux équations de Navier-Stokes ? Dès que la météorologie s'est définie, à la fin du XIX^e siècle, comme une science physique et mécanique elle a cherché à simplifier pour ses besoins les équations de Navier-Stokes. En effet l'écoulement atmosphérique se situe dans un régime particulier car, bien que le nombre de Mach soit petit, la gravité impose de fortes variations de densité. Cette simplification obéit à deux logiques, l'une opérationnelle visant à produire des solutions à ces équations, l'autre réductionniste visant à réduire ces équations à la plus simple expression permettant d'expliquer des phénomènes. Il s'en est ensuivi une abondance de systèmes approchés, adaptés à différentes échelles de temps et d'espace, formant une hiérarchie dont les équations de Navier-Stokes sont le sommet.

Tous ces systèmes approchés ont en commun des lois de conservation analogues à celles des équations de Navier-Stokes, qui sont autant de contraintes qui limitent les états physiquement accessibles à l'écoulement et qui structurent ce dernier. Dans mon exposé, je montrerai comment les principes variationnels de la mécanique classique (principe de moindre action) permettent de formuler de façon concise et unifiée la plupart de ces systèmes approchés, ou du moins leur partie non-visqueuse. Les lois de conservation résultent alors de symétries de l'action. Ces formulations font souvent apparaître des contraintes (multiplicateurs de Lagrange) ayant pour effet d'éliminer la partie acoustique de l'écoulement, au prix de l'introduction de problèmes elliptiques. Je montrerai également comment cette approche permet de réintroduire de façon économe des effets souvent négligés comme les effets de Coriolis dits non-traditionnels, ou d'étendre le domaine de validité d'approximations classiques comme l'approximation hydrostatique. Paradoxalement, il en ressort que les degrés de liberté de l'écoulement atmosphérique sont, pour l'essentiel, ceux d'un écoulement incompressible.

3.3 Paul Manneville (École Polytechnique)

Écoulements de paroi : Comment comprendre leur transition vers la turbulence ?

La transition vers la turbulence est généralement interprétée comme le résultat d'une cascade d'instabilités qui font progressivement passer d'une dynamique régulière (laminaire) à une dynamique irrégulière (turbulente) dont le caractère aléatoire est de nature chaotique, analysé d'un point de vue abstrait dans l'espace des états du système considéré (divergence de trajectoires issues de conditions voisines). Les écoulements de paroi subissent au contraire le plus souvent une transition directe, sans intermédiaire, marquée par la coexistence dans l'espace physique de domaines laminaires et turbulents. J'évoquerai les résultats obtenus récemment sur deux systèmes emblématiques, l'écoulement de Hagen-Poiseuille dans un tube cylindrique déjà considéré par Reynolds (1883) et l'écoulement de cisaillement simple entre deux plaques parallèles, montrant les progrès réalisés en combinant la théorie des systèmes dynamiques et la physique statistique pour rendre compte de ce régime intermédiaire de coexistence.

3.4 Pierre-Yves Lagrée (CNRS/UPMC-Institut Jean le Rond d'Alembert)

Écoulements granulaires, du grain à la description Navier-Stokes continue

Le sable, le gravier, les roches, mais aussi les céréales, le sucre... sont des exemples de matériaux granulaires. Constitués de millions de petits grains de forme quasi-identique, ils se comportent macroscopiquement comme un objet « solide », mais peuvent « couler » comme un « fluide liquide » et même un « fluide gazeux ». Le nombre de grains étant grand mais bien inférieur au nombre d'Avogadro, comme pour l'eau ou l'air, on peut calculer par simulation numérique (dynamique de contact) le mouvement de chacun de ces milliers de grains s'entrechoquant. Récemment (GDR Midi 2004), dans le cadre d'une approche de type milieu continu une rhéologie (frictionnelle de type Coulomb) appelée $\mu(I)$ a été proposée, elle a permis de mieux interpréter de nombreux phénomènes granulaires. Nous présenterons cette approche et des simulations numériques de l'équation de Navier-Stokes avec cette rhéologie comparées aux expériences et aux simulations directes d'ensembles de grains. Nous examinerons et analyserons des cas d'avalanches, d'effondrements de tas, d'écoulements de sablier...



3.5 Irène Vignon-Clémentel (Inria)

Écoulements sang/air : aspects multiéchelles et applicatifs

Le sang et l'air circulent à travers une architecture des plus grands aux plus petits conduits, faite pour assurer les fonctions vitales de notre corps. Simuler numériquement ces écoulements permet de mieux comprendre certains dérèglements, dans le but de mieux y pallier...

Au cours de cette exposé, on évoquera quelques *challenges* engendrés par de telles simulations (complexité des écoulements et donc des calculs, paramétrage des modèles à partir de données patients, etc.). Plusieurs applications multi-échelle et multi-physique seront présentées en lien avec des maladies cardiovasculaires, respiratoires, cancers et *design* de dispositifs médicaux.

3.6 Michel Visonneau (ECN/CNRS)

La résolution des équations de Navier-Stokes pour l'hydrodynamique. Développements récents et perspectives

Cette conférence est consacrée à la présentation des principaux défis posés par la résolution des équations de Navier-Stokes dans le domaine de l'hydrodynamique navale en termes de modélisation physique et de discrétisation numérique. De nombreuses illustrations et comparaisons à des bases de données expérimentales permettront d'illustrer les apports fondamentaux de la modélisation numérique conduisant à une meilleure compréhension des écoulements turbulents à surface libre. Enfin, on évoquera les perspectives de recherche les plus prometteuses permettant d'étendre le champ d'application de la modélisation numérique des équations de Navier-Stokes à de nouvelles problématiques physiques caractéristiques du domaine marin.

3.7 Éric Garnier (ONERA/DAAP)

La régularisation des équations de Navier-Stokes en pratique, application à l'aérodynamique

La turbulence joue un rôle fondamental dans les applications à l'aérodynamique. Dans de nombreux cas où une description statistique de celle-ci n'est pas possible, il est nécessaire de réaliser des simulations instationnaires et de régulariser l'écoulement en supprimant les plus petites échelles dont la description n'a pas d'intérêt pratique. Pour ce faire, la simulation des grandes échelles offre un cadre théorique assez abouti basé sur la notion de filtre en espace. Néanmoins, en pratique, la notion de filtrage explicite est rapidement abandonnée et la prise en compte des petites échelles se fait via un modèle de viscosité dit de sous-maille. Par ailleurs, le schéma pour la discrétisation des dérivés en espace introduit une autre forme de filtrage qui entre en compétition avec le premier. Une fois ce cadre établi, il sera discuté de la pertinence des méthodes réellement utilisées pour la simulation des grandes échelles en aérodynamique.



3.8 Frédéric Chalot (Dassault-Aviation)

Quelques exemples de résolutions des Équations de Navier-Stokes dans l'industrie aéronautique

La simulation numérique des équations de Navier-Stokes, pour les applications aérodynamiques, est au cœur des processus de *design* de Dassault Aviation, notamment pour les avions d'affaires Falcon. La combinaison d'une modélisation fine de la physique des écoulements et d'une puissance informatique

élevée a permis ces dernières années de révolutionner le design aérodynamique. Nous présenterons le code *Aether* utilisé pour résoudre les équations de Navier-Stokes compressible. Il s'appuie sur des maillages non-structurés et une formulation originale aux éléments finis stabilisés qui assure une grande cohérence entre la modélisation physique et les ingrédients numériques. De nombreux exemples seront présentés couvrant une large gamme de vitesses, des écoulements stationnaires et instationnaires, ainsi que des applications en aéroacoustique et en optimisation de forme.

3.9 Frédéric Magoulès (École Centrale Paris)

Écouter Le Passé

Les petits déplacements d'un fluide sur une paroi ou les turbulences d'un écoulement d'un fluide sont à l'origine d'un changement de pression, ce dernier engendrant un niveau sonore. L'étude de ces phénomènes acoustiques, dont les propriétés impliquent plusieurs contraintes numériques, nécessite le développement de nouvelles méthodes mathématiques et des algorithmes associés. Les méthodes de discrétisation par éléments finis stabilisés permettent par exemple de réduire le nombre d'inconnues du problème à traiter. Les méthodes numériques de résolution par décomposition de domaines (en temps ou en espace) sont bien adaptées au calcul parallèle. En effet, la division d'un problème en plusieurs petits sous-problèmes, est un moyen naturel d'introduire le parallélisme. Toutefois ces méthodes ne peuvent être utilisées de manière optimale sur les machines actuelles possédant plusieurs centaines de milliers de processeurs. Cet exposé présente quelques avancées dans le domaine du calcul à haute performance pour l'étude des phénomènes acoustiques, et montre notamment, comment les méthodes de décomposition de domaines ont évolué au cours des années, conjointement avec les méthodes numériques. Dans cette conférence, des exemples d'acoustique musicale dans une église médiévale, seront présentés pour illustrer l'efficacité de ces méthodes.

3.10 François Dubois (Université Paris-Sud)

Ces curieux schémas de Boltzmann sur réseau

Les schémas de Boltzmann sur réseau sont issus d'une part des modèles classiques de la cinétique des gaz (équation de Boltzmann) et d'autre part des approches informatiques pour les systèmes dynamiques discrets (automates cellulaires). Ils ont émergé dans les laboratoires de physique au cours des années 1980. Leur mise en œuvre est *a priori* très élémentaire grâce à l'emploi d'un schéma explicite en temps sur une grille cartésienne. Mais toute une série de paramètres doivent être réglés avec soin afin de garantir le succès d'une simulation numérique. Ainsi, les schémas de Boltzmann sur réseau peuvent aujourd'hui simuler toutes sortes d'équations aux dérivées partielles classiques de la physique mathématique : advection-diffusion, acoustique, mécanique des fluides, *etc.* et l'emploi du calcul formel est parfois indispensable pour améliorer les performances de l'approche numérique !

3.11 Vincent Moureau (CORIA)

Le problème du *Big Data* en mécanique des fluides

La *simulation aux grandes échelles* et la *simulation numérique directe* sont des approches de modélisation instationnaires de plus en plus attractives pour la modélisation des écoulements turbulents en raison du développement constant des super-ordinateurs massivement parallèles. Cette augmentation de la puissance de calcul permet d'améliorer la fidélité des simulations soit en augmentant la résolution de maillage ou le temps physique de la simulation, soit en complexifiant les modèles physiques. Ainsi, de

plus en plus de simulations instationnaires traitent plusieurs milliards de degrés de liberté en utilisant plusieurs milliers de processeurs.

L'analyse des simulations dont le maillage atteint le milliard de cellules est difficile car elle nécessite de traiter une grande quantité de données afin d'en extraire les informations pertinentes. Les outils traditionnels de traitement de données ont généralement besoin d'être repensés pour faire face à une telle quantité de données. Ce défi, qui est partagé avec de nombreux autres domaines scientifiques, est souvent désigné comme le défi du *Big Data*. Les solutions techniques qui sont utilisées pour remédier à ce problème sont bien connues : partitionnement, tri, filtrage, traitement parallèle, ... On assiste donc à une forte convergence des techniques mises en œuvre dans la simulation des écoulements turbulents et les outils de traitement liés au *Big Data*.

Dans cette conférence, des outils d'analyse basés sur l'échantillonnage sélectif et le filtrage d'ordre élevé, et adaptés au post-traitement des simulations aux grandes échelles massivement parallèles, seront présentés. Ces techniques seront appliquées à l'extraction de structures cohérentes dans des géométries complexes telles que le *precessing vortex core*, qui joue un rôle important dans la dynamique des écoulements en rotation.

3.12 Gaël Octavia (FSMP)

Navier-Stokes pour tous

Comment rendre accessible au grand public un thème de recherche mathématique actuel ? Dans la bande dessinée *l'Équation du millénaire*, le lecteur est invité à découvrir les équations de Navier-Stokes, mais aussi les personnages historiques qui s'y sont intéressés, les problèmes concrets qui leur sont associés, les questions mathématiques qu'elles suscitent... L'exposé retracera la genèse de cette bande dessinée, en présentant les objectifs de ses auteurs, leurs choix d'écriture (angle historique, choix des personnages, ...), les problèmes posés lors de l'élaboration du scénario (comment raconter l'abstraction mathématique ?), l'utilisation du support image, ... À travers cet exemple, on abordera plus généralement la question de la vulgarisation des mathématiques, de ses possibilités et de ses limites, de l'ambition poursuivie par le vulgarisateur.



<http://www.association-aristote.fr>

info@association-aristote.fr

ARISTOTE Association Loi de 1901. Siège social : CEA-DSI CEN Saclay Bât. 474, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex.

Secrétariat : Aristote, École Polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex.

Tél. : +33(0)1 69 33 99 66 Fax : +33(0)1 69 33 99 67 Courriel : Marie.Tetard@polytechnique.edu

Site internet <http://www.association-aristote.fr>