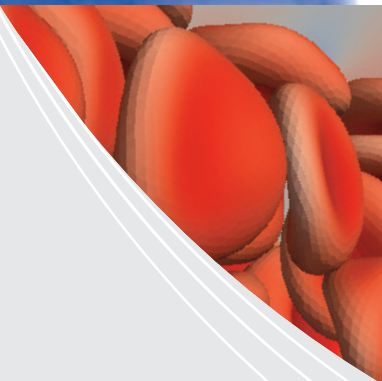
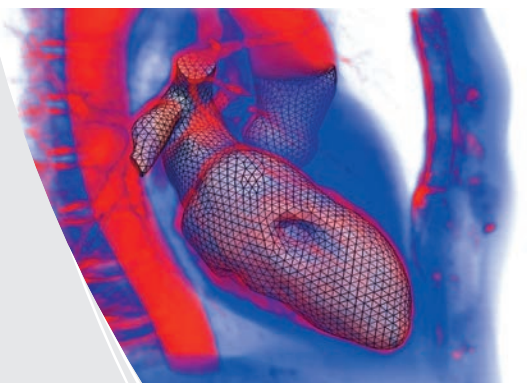
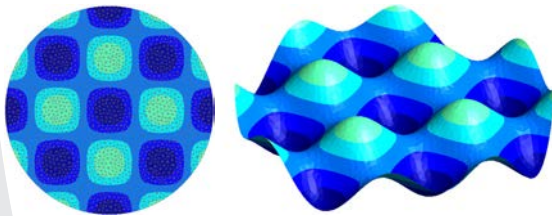
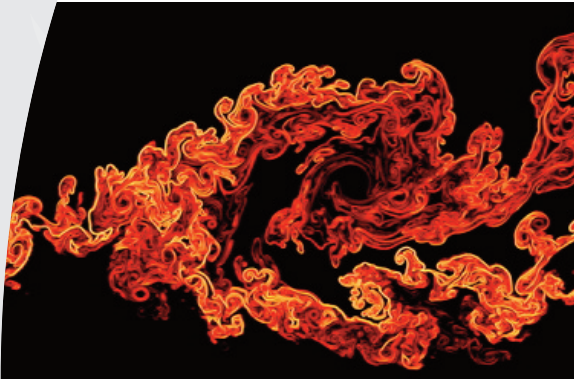




INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences



Les simulations « frontières » en mécanique des solides et des fluides

Mardi 9 mai 2017 de 14h30 à 17h00
Grande salle des séances
de l'Institut de France
23, quai de Conti, 75006 Paris

Les progrès de la simulation numérique en mécanique des solides et des fluides ont eu une influence marquante sur la recherche scientifique dans ce domaine et sur les méthodes de conception utilisables en pratique. La simulation, désormais incontournable, a remplacé pour une bonne part les processus d'essais qui étaient la norme dans les développements techniques. Des essais sont toujours effectués mais ils sont désormais guidés par la simulation. La simulation permet de comprendre, maîtriser, tester, améliorer, comparer et optimiser.

Un objectif fondamental de la recherche dans le domaine du calcul à haute performance en mécanique est d'explorer par des simulations « frontières » ce que seront les méthodes de conception de demain, faire que les moyens développés par la recherche aujourd'hui deviennent des outils utilisables en conception. Les progrès et les défis seront donc illustrés au moyen d'exemples de calculs « frontières ». On se propose de montrer que des progrès substantiels ont été réalisés sur des questions scientifiques majeures mais que les calculs ont aussi une utilité pratique pour la conception et le développement industriel. Ainsi, le calcul à haute performance répond à des objectifs scientifiques mais il permet aussi de concevoir des systèmes plus performants, d'optimiser leur efficacité énergétique, de réduire les émissions polluantes, en un mot d'augmenter la qualité et donc la compétitivité économique.

Les organisateurs de la conférence-débat



Sébastien CANDEL

Sébastien Candé est professeur des universités émérite à CentraleSupélec (université Paris-Saclay), membre honoraire de l'Institut universitaire de France et président de l'Académie des sciences pour 2017 et 2018. Ses recherches concernent la dynamique de la combustion, la structure, la modélisation et la simulation des flammes turbulentes et la combustion cryotechnique avec comme applications la propulsion aéronautique et spatiale et la production d'énergie. Sébastien Candé est membre de l'Académie des technologies, de l'Académie de l'Air et de l'Espace et membre étranger de la *National Academy of Engineering* des États-Unis.



Jean-Baptiste LEBLOND

Jean-Baptiste Leblond est professeur de classe exceptionnelle à Sorbonne universités, à l'université Pierre et Marie Curie. Il est membre senior de l'Institut universitaire de France et membre de l'Académie des sciences. Il a reçu cinq prix scientifiques et est rédacteur en chef des *Comptes-Rendus Mécanique* de l'Académie des sciences. Ses travaux portent essentiellement, quoique non exclusivement, sur la mécanique des solides déformables, particulièrement sur la mécanique de la rupture fragile et ductile, et l'application de la méthode des éléments finis à la mécanique des solides et la science des matériaux.





Programme

- 14:30** Ouverture de la conférence-débat
Sébastien CANDEL, président de l'Académie des sciences
Catherine BRÉCHIGNAC, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences
Jean-Baptiste LEBLOND, membre de l'Académie des sciences
- 14:45** Imagerie par ondes acoustiques : aux frontières du calcul très haute performance et des gros volumes de données
Dimitri KOMATITSCH, directeur de recherche au CNRS, laboratoire de mécanique et acoustique de Marseille
- 15:15** La simulation en combustion, clef de l'énergie au 21^{ème} siècle
Thierry POINSOT, directeur de recherche au CNRS, Institut de mécanique des fluides de Toulouse
- 15:45** Les frontières immatérielles, une belle opportunité pour la mécanique numérique des solides
Nicolas MOËS, professeur à l'École centrale de Nantes, Institut de recherche en génie civil et mécanique (GeM)
- 16:15** Défis et opportunités en hémodynamique numérique
Franck NICOUD, professeur à l'université de Montpellier, Institut montpellierain Alexander Grothendieck
- 16:45** Discussion générale et conclusion

Résumés et biographies



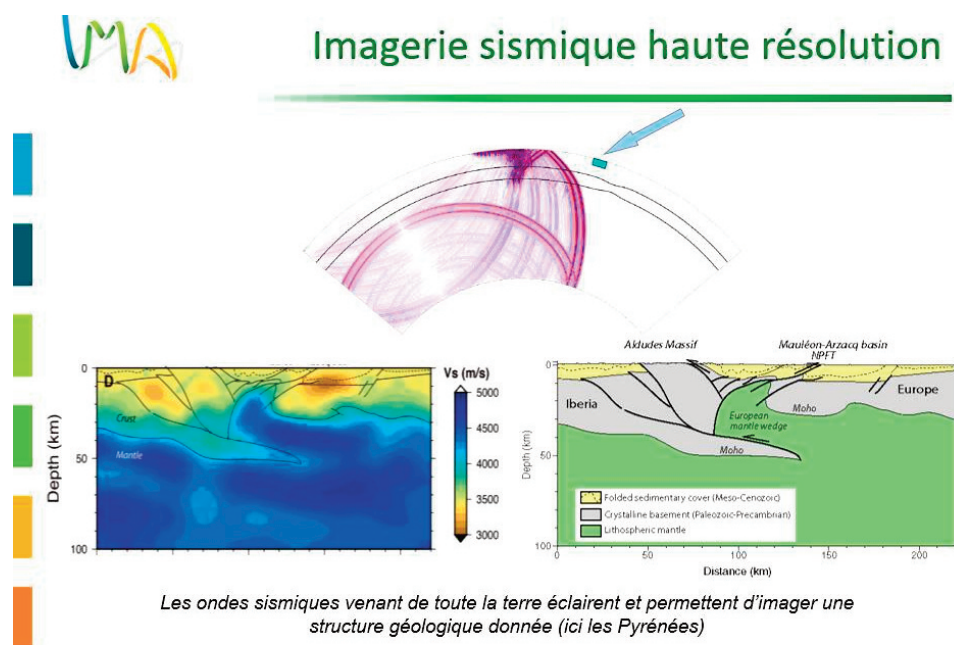
Dimitri KOMATITSCH

Directeur de recherche au CNRS, laboratoire de mécanique et acoustique de Marseille

Dimitri Komatitsch est directeur de recherche au CNRS, au sein du laboratoire de mécanique et d'acoustique de Marseille. Ses spécialités sont le calcul scientifique ainsi que l'imagerie et la résolution de problèmes inverses pour l'acoustique, tant dans le domaine des ultrasons qu'à des échelles plus grandes en sismique pétrolière ou en sismologie. Il utilise pour cela le calcul haute performance sur des ordinateurs parallèles, en particulier sur les plus gros ordinateurs du monde, qui sont appelés « pétaflopiques » et bientôt « exaflopiques ». Avant d'entrer au CNRS en 2011, il a été professeur de géophysique à l'université de Pau et membre de l'Institut universitaire de France. Avec le Professeur Jeroen Tromp de l'université de Princeton aux États-Unis, il est l'auteur principal du logiciel de propagation d'ondes et d'imagerie SPECFEM fondé sur une approche d'éléments finis spectraux, qui est une technique de Galerkin continue. Il a été lauréat du Prix Gordon Bell de calcul scientifique de l'Association for Computing Machinery (ACM, États-Unis) en 2003 et le Prix Bull Joseph Fourier de calcul haute performance en 2010.

Imagerie par ondes acoustiques : aux frontières du calcul très haute performance et des gros volumes de données

L'augmentation spectaculaire des performances des ordinateurs au cours de la dernière décennie a pleinement bénéficié à la géophysique, en particulier à l'étude de la propagation des ondes sismiques résultant de tremblements de terre et plus encore à leur utilisation en imagerie à très haute résolution du sous-sol, tant dans le domaine de la sismique pétrolière que celui de la sismologie. Le même type d'innovations commence à apparaître dans le domaine des ultrasons, en contrôle non destructif des matériaux industriels ainsi qu'en imagerie médicale. En raison des progrès spectaculaires apparus indépendamment en instrumentation, de nos jours ce type de méthodes fait appel à de très gros volumes de données (« big data »). Dans notre exposé nous essaierons d'expliquer comment, dans la décennie qui vient, ceci aura des conséquences très positives et probablement spectaculaires sur la qualité des images tomographiques obtenues, ainsi que sur l'interprétation physique que l'on pourra faire de ce type d'images. Nous montrerons que cela nécessitera d'aller aux frontières du calcul très haute performance et de l'analyse de données massives.



Les ondes sismiques venant de toute la terre éclairent et permettent d'imager une structure géologique donnée (ici les Pyrénées)

Plus haute résolution jamais atteinte, grâce au calcul haute performance



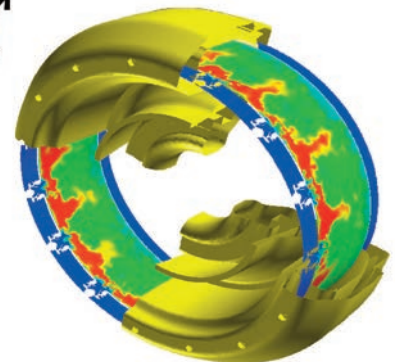
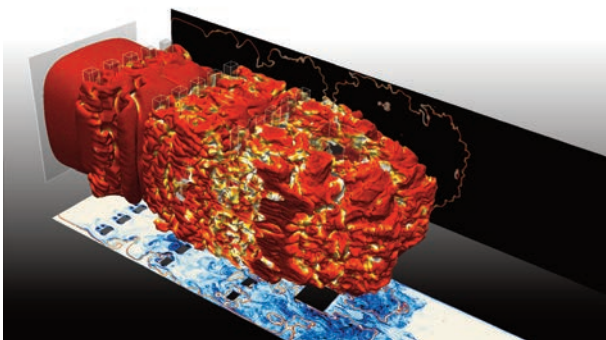
Thierry POINSOT

Directeur de recherche au CNRS, Institut de mécanique des fluides de Toulouse

Thierry Poinsot est directeur de recherche au CNRS à l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse. Il est aussi responsable de l'équipe CFD (*Computational Fluid Dynamics*) au CERFACS et *senior research fellow* à *Stanford University*. Il a mené le développement de la simulation numérique à haute performance en combustion, en particulier pour les moteurs aéronautiques. Il a reçu le prix Edmond Brun de l'Académie des sciences, le premier prix Cray pour le calcul scientifique et la médaille Zeldovich du *Combustion Institute*. Il a donné la conférence plénière Hottel au dernier Symposium sur la combustion à Seoul et est éditeur en chef de *Combustion and Flame*. Il a publié près de 200 articles et encadré 70 thèses. Il enseigne la combustion en Europe, à Princeton, à Tsinghua, à Stanford et à Kanpur.

La simulation en combustion, clef de l'énergie au 21^{ème} siècle

La combustion est au coeur de notre civilisation puisqu'elle fournit aujourd'hui près de 90 % de l'énergie totale du monde. Malheureusement elle génère aussi une grande partie des polluants et des gaz à effet de serre. Optimiser les systèmes de combustion est donc probablement le premier défi actuel en matière d'énergie pour faire face aux besoins du 21^{ème} siècle. Ceci passe par la simulation numérique qui doit permettre de calculer et d'optimiser les foyers de combustion avant de les construire. En effet, les technologies actuelles et futures employées en combustion sont de plus en plus radicales et l'optimisation des systèmes de combustion, caractérisés par de fortes non linéarités, débouche souvent sur des réponses inattendues : instabilités, extinction, allumage impossible. Seules les simulations, en donnant accès à la combustion « virtuelle », permettent d'analyser ce qui se passe dans une chambre. Ces simulations nécessitent les plus gros ordinateurs du monde car elles doivent capturer l'interaction entre deux phénomènes qui sont aujourd'hui parmi les plus complexes : la cinétique chimique (qui décrit la façon dont les espèces chimiques évoluent) et la turbulence (présente dans la plupart des cas). Les écoulements réactifs (sur terre mais aussi en astrophysique) sont les premiers consommateurs de temps CPU sur les ordinateurs les plus gros du monde. On décrira comment le calcul exaflopique permet de calculer des chambres de combustion et on montrera plusieurs exemples d'applications dans les turbines à gaz, les explosions, ou les moteurs fusée, où la simulation massivement parallèle a permis d'élucider les mécanismes fondamentaux contrôlant les flammes et d'optimiser les moteurs correspondants.





Nicolas MOËS

Professeur à l'École centrale de Nantes, Institut de recherche en génie civil et mécanique (GeM)

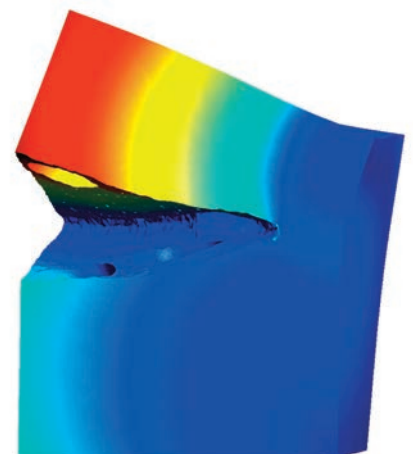
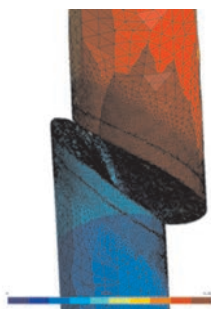
Docteur de l'École normale supérieure de Cachan, Nicolas Moës est depuis 15 ans professeur à l'École centrale de Nantes. Avant cette position en France, il a travaillé 5 années comme chercheur aux États-Unis, d'abord à l'université du Texas à Austin, sous la direction de Tinsley Oden, puis à la *Northwestern University* sous la direction de Ted Belytschko. C'est dans cette seconde université qu'il a co-inventé l'approche des éléments finis étendus (X-FEM). Il a reçu le prix Jean Mandel en 2003, le *Young Investigator Award* de l'Association internationale de mécanique numérique (IACM) en 2006, et est devenu *Fellow* de cette même association en 2008. De 2007 à 2012, il a été membre junior de l'IUF et plus récemment, en 2014, il a reçu la Médaille d'argent du CNRS. Actuellement, avec son équipe à Nantes, ses travaux portent sur la transition entre localisation et rupture ainsi que sur de nouvelles formulations pour les inéquations variationnelles (contact, plasticité, fluide à seuil, ...). Ces travaux sont financés par le Conseil européen de la recherche (ERC).

Les frontières immatérielles, une belle opportunité pour la mécanique numérique des solides

A travers trois exemples : contact/frottement, solide rigide-viscoplastique et localisation des déformations/fissuration, nous discutons l'apport d'une nouvelle modélisation basée sur le suivi de frontière par fonction de niveau (« *level set* »).

Cette nouvelle modélisation prend comme inconnue principale la frontière (immatérielle) qui sépare les deux régimes de solution. La signification mécanique de ces régimes dépend de l'exemple traité : zone contactante et non contactante, zone rigide et zone d'écoulement, et, enfin, zone de localisation et zone saine. Pour les deux premiers exemples, on montre que le changement de point de vue proposé permet de transformer la formulation standard par inéquation variationnelle en une formulation par équation variationnelle couplée au problème d'évolution de la frontière. Cette transformation théorique permet d'atteindre une précision et une robustesse particulièrement intéressante dans la simulation numérique. Pour le troisième exemple (localisation des déformations et fissuration), le nouveau point de vue proposé permet de concilier la mécanique de la rupture (basée sur le suivi d'une frontière) et la mécanique de l'endommagement (basé sur une démarche matériau mais sans contexte géométrique).

L'exposé traitera en parallèle les aspects théoriques et numériques de la nouvelle modélisation proposée : baptisée ILS (« *Inequality Level Set* ») pour le traitement des inéquations variationnelles et TLS (« *Thick Level Set* ») pour le traitement de la localisation.





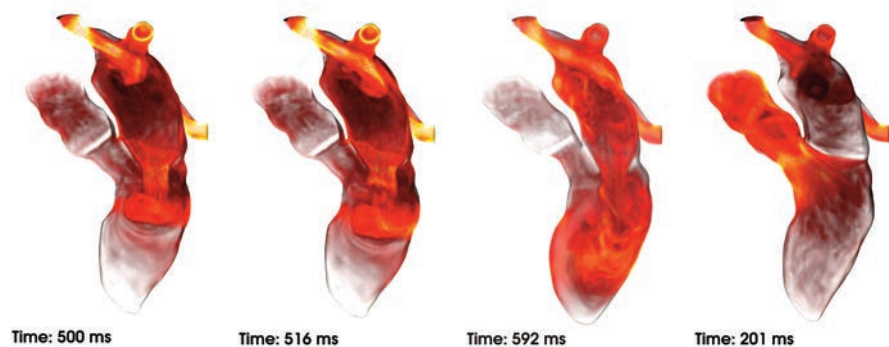
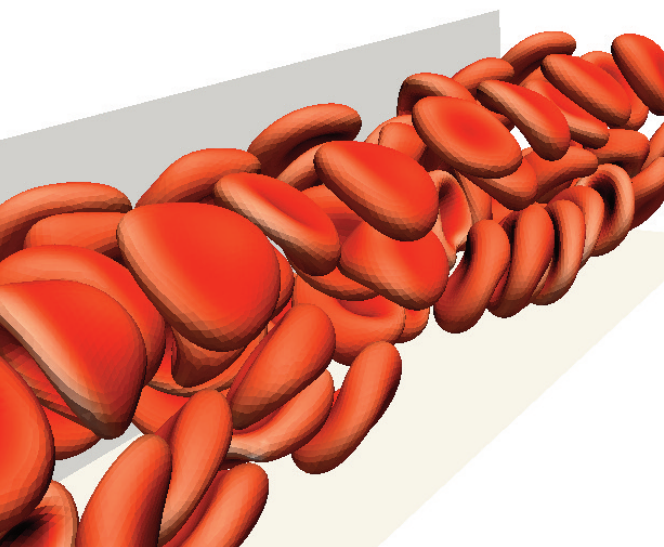
Franck NICOUD

Professeur à l'université de Montpellier, Institut montpelliérain Alexander Grothendieck

Franck Nicoud est professeur à l'université de Montpellier, rattaché à l'Institut montpelliérain Alexander Grothendieck. Son activité de recherche vise à comprendre et modéliser certains phénomènes relevant de la mécanique des fluides dans des situations diverses; il utilise ou développe pour cela des approches à haut niveau de détail (simulation numérique directe ou aux grandes échelles) ou de complexité réduite (lois de paroi, approche réseau). Depuis 2010, il s'intéresse plus particulièrement aux écoulements sanguins dont une des caractéristiques est d'être pilotés par des interactions fluide-structure, que ce soit à l'échelle macroscopique des organes ou microscopique des cellules. Les activités de son groupe sont tournées vers le développement, la validation et le déploiement d'un logiciel permettant de représenter les écoulements sanguins *in silico*.

Défis et opportunités en hémodynamique numérique

Assurer à l'ensemble des tissus un apport suffisant en sang constitue la fonction principale du système cardiovasculaire. Comprendre et prévoir comment le sang coule, aussi bien *in vivo* que *in vitro*, ouvrirait de ce fait de nouvelles perspectives en matière de diagnostic et de prise en charge thérapeutique. Les techniques d'imagerie médicale restent cependant limitées en terme de résolution spatio-temporelle quand il s'agit de renseigner sur l'hémodynamique et les contraintes associées (pression, frottement pariétal). La simulation numérique apparaît alors comme un complément naturel, même si simuler les écoulements sanguins reste un exercice complexe à bien des égards. *In vivo*, le sang interagit le plus souvent avec des corps solides déformables dont les propriétés sont mal connues, dans un domaine évolutif en temps aux conditions aux limites incertaines. Lorsqu'il coule au sein de systèmes biomédicaux, le sang est le siège de multiples réactions biochimiques activées par la présence de surfaces artificielles et conduisant à la formation de thrombus. Concevoir et optimiser de tels systèmes nécessite donc de modéliser les interactions entre biochimie et hémodynamique afin de garder le risque d'embolie à un niveau acceptable. Le sang, comme suspension dense de particules déformables, est enfin un fluide extrêmement complexe dont le comportement rhéologique reste très mal compris. Générer du sang *in silico* en simulant explicitement la dynamique d'un grand nombre de globules rouges est un objectif partagé par les groupes de recherche les plus avancés ; atteindre cette capacité ouvrirait de nouvelles perspectives en matière de compréhension de la microcirculation et de développement de systèmes micro-fluidiques de diagnostic. Certains des travaux réalisés à l'université de Montpellier pour surmonter les difficultés décrites précédemment seront discutés dans cette présentation. On montrera notamment comment l'écoulement intracardiaque peut être reconstruit en combinant imagerie médicale et mécanique des fluides numérique.



Coeur1-4 montrent une vue 3D du champ de vorticité à différents instants. Le domaine correspond au coeur gauche d'un patient toulousain; on y voit le ventricule, l'aorte ascendante, l'oreillette et 3 des 4 veines pulmonaires



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

