



INSTITUT DE FRANCE  
Académie des sciences



ACADÉMIE  
DES  
TECHNOLOGIES  
POUR UN PROGRÈS  
RAISONNÉ  
CHOISI  
PARTAGÉ



## La mécanique, une clé du futur

**Mercredi 1<sup>er</sup> juin 2022 de 9h00 à 18h20**  
**Auditorium André et Liliane Bettencourt**  
**de l'Institut de France**  
**3, rue Mazarine, 75006 Paris**

Dans le cadre de l'année 2021-2022 – Année de la mécanique, l'Académie des sciences, le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) au travers de son Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes - et l'Association française de mécanique et l'Académie des technologies organisent un colloque consacré aux sciences mécaniques sous tous leurs aspects. Il s'agira de mettre en valeur les grandes avancées qu'elles ont permis dans les années récentes, d'éclairer les défis auxquels elles sont déjà confrontées mais aussi de souligner leurs rôles dans les grands enjeux sociétaux que nous connaissons tous.

La mécanique, à l'origine science du mouvement et de l'équilibre, s'intéresse aujourd'hui autant au comportement des nouveaux matériaux qu'aux écoulements turbulents des fluides, aux ondes acoustiques qu'aux robots, à la combustion qu'à la mécanique du vivant, à l'impression 3D qu'à d'autres procédés récents. Elle est en synergie constante avec la physique, les mathématiques appliquées, les sciences de l'information, de l'environnement et avec les sciences de la vie. Elle entretient des relations permanentes avec l'industrie. Les concepts et outils qu'elle met en place, fortement couplés aux avancées numériques, permettent de résoudre des problèmes de l'ingénieur toujours plus complexes, tout en intégrant les méthodes de l'intelligence artificielle et les avancées de la connaissance de l'infiniment petit. Bon nombre d'avancées nouvelles issues des recherches dans ce domaine se cachent derrière des progrès technologiques majeurs qui sont devenus des réalités quotidiennes.

Ainsi, les sciences mécaniques sont-elles aujourd'hui présentes dans pratiquement tous les aspects de la vie moderne. Elles sont donc connectées aux défis sociétaux les plus urgents, ceux de l'énergie, de l'environnement, du climat, de la santé ou de la mobilité.

Le colloque sera l'occasion de dévoiler ces aspects par plusieurs conférences de personnalités éminentes. Il permettra des échanges par le biais de deux tables rondes. Cette manifestation a également pour objectif de souligner l'importance d'une recherche active et soutenue dans des domaines qui sont au cœur de notre société et qui sont des clés pour l'avenir.

## *IN MEMORIAM*



### **Jean-Paul LAUMOND**

Membre de l'Académie des sciences  
Directeur de recherche au CNRS

Jean-Paul Laumond († 2021) avait pris une part active au sein du Comité d'organisation de ce colloque, à la fois comme expert en robotique et comme délégué à l'information scientifique et à la communication depuis mars 2021. Ce colloque lui est dédié.

Jean-Paul Laumond a effectué sa carrière au LAAS-CNRS à Toulouse jusqu'en 2019 où il rejoint le Département d'informatique de l'École normale supérieure (ENS-PSL/CNRS/Inria) à Paris. De formation mathématique, sa recherche a été dominée par l'algorithmique de la planification de mouvement en robotique, un domaine scientifique dont il a contribué à jeter les bases.

De 2001 à 2003, il crée et dirige la société Kineo CAM qui commercialise ces technologies dans le domaine du prototypage virtuel. La société est acquise par Siemens en 2012. En 2006, il crée le groupe de recherche Gepetto dédié à l'étude des fondements calculatoires de l'action anthropomorphe et co-dirige dans ce cadre le laboratoire franco-japonais JRL sur la robotique humanoïde de 2005 à 2008.

Jean-Paul Laumond a publié plus de 150 articles en robotique, informatique, théorie du contrôle et neurosciences.

De 2014 à 2018, il conduit le projet Actanthrope soutenu par l'*European Research Council* (ERC) et enseigne la robotique à l'ENS. Fellow de l'IEEE, il est en 2011-2012 titulaire de la chaire d'Innovation Technologique Liliane Bettencourt du Collège de France.

En 2016, il est le lauréat du prix international IEEE Inaba *Technical Award for Innovation Leading to Production*.

Jean-Paul Laumond était aussi membre de l'Académie des technologies.

# Organisateur



## Sébastien CANDEL

Ancien Président et Membre de l'Académie des sciences  
Professeur des universités émérite à CentraleSupélec  
Membre honoraire de l'Institut universitaire de France

Les recherches de Sébastien Candel 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 Candel 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.

# Comité d'organisation



## Éric ARQUIS

Professeur à l'École nationale supérieure de chimie, biologie et physique (ENSCBP) de Bordeaux

Directeur honoraire de l'Institut de mécanique et d'ingénierie de Bordeaux (I2M)

Éric Arquis s'intéresse à la Mécanique des Fluides et aux Transferts de Chaleur dans les matériaux (verres, métaux, composites) et leurs procédés d'élaboration et de mise en forme, plutôt par des approches numériques. Il traite également les problèmes d'écoulements en présence d'interface entre un fluide et un milieu poreux. Éric Arquis est enseignant-chercheur à l'Institut de mécanique et d'ingénierie (I2M, CNRS/INP Bordeaux/Université de Bordeaux/Ensam), qu'il a dirigé de 2011 à 2016.



## Ahmed BENALLAL

Directeur de recherche au CNRS

Ahmed Benallal est mécanicien des matériaux solides au sein du Laboratoire de mécanique Paris-Saclay (LMPS, CNRS/ENS Paris-Saclay/CentraleSupélec). Ses contributions portent sur la plasticité et la viscoplasticité des métaux sollicités sous des chargements thermomécaniques complexes et sur l'analyse des instabilités matérielles et en particulier la localisation de la déformation et de l'endommagement précurseurs à la rupture dans ces matériaux.



## Anne-Christine HLADKY

Directrice de recherche au CNRS

Directrice adjointe scientifique à l'Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes du CNRS

Les travaux de recherche d'Anne-Christine Hladky concernent les métamatériaux acoustiques, pour des applications en acoustique sous-marine, dans le domaine de l'audible ou pour les composants RF. Anne-Christine Hladky a reçu la médaille d'argent du CNRS en 2018 pour ses travaux dans ce domaine, menés à l'Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie (IEMN, CNRS/Université de Lille/Université polytechnique Hauts-de-France).



## Nicolas MOËS

Membre de l'Académie des sciences  
Professeur des universités à l'École Centrale de Nantes  
Membre de l'Institut universitaire de France

Les travaux de Nicolas Moës portent principalement sur la mécanique de la fissuration, de l'endommagement et du contact. L'approche dite X-FEM qu'il a initiée en 1999 aux États-Unis avec Ted Belytschko et John Dolbow a grandement simplifié la simulation de la propagation de fissures par éléments finis. Plus récemment, avec ses collaborateurs de l'Institut de recherche en génie civil et mécanique (GeM, École Centrale de Nantes/Nantes Université/CNRS) à Nantes, il a créé une théorie unifiant mécanique de l'endommagement et mécanique de la rupture, ainsi qu'une approche originale pour le traitement des inéquations variationnelles, comme celles intervenant dans le contact.



## Yves RÉMOND

Professeur à l'École de chimie, polymères et matériaux (ECPM) de l'Université de Strasbourg  
Chargé de mission à l'Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes du CNRS  
Co-directeur de l'Institut multi-organismes des technologies pour la santé de l'alliance Aviesan

Ses travaux portent sur le comportement mécanique multi-échelles de matériaux et structures comme les polymères, les composites, etc. ainsi que sur la compréhension et la modélisation de phénomènes mécano-biologiques de tissus vivants. Il a par exemple travaillé sur la modélisation en temps réel des déformations du foie avec l'IRCAD de Strasbourg, ou sur la perte osseuse des astronautes en situation d'apesanteur.



## Jean SALENÇON

Ancien Président et Membre de l'Académie des sciences  
Professeur honoraire à l'École polytechnique et à l'École des Ponts ParisTech  
Ingénieur général honoraire des Ponts et chaussées

Les travaux de recherche et les ouvrages pédagogiques de Jean Salençon concernent la mécanique des milieux déformables, essentiellement hors du domaine élastique avec de nombreuses applications dans divers domaines de l'art de l'ingénieur : calcul des structures, mécanique des matériaux, mécanique des sols (sols renforcés, calcul de stabilité des ouvrages notamment sous sollicitations sismiques, etc.). Jean Salençon est membre émérite de l'Académie des technologies, membre étranger de l'Istituto Lombardo (Milan) et de l'Academia das Ciências de Lisboa, membre honoraire de l'Académie hongroise des sciences, membre de *Academia Europaea* et *Senior Fellow* du Hong Kong *Institute for Advanced Study*.



## Pierre SUQUET

Membre de l'Académie des sciences  
Directeur de recherche émérite au CNRS

Pierre Suquet est mécanicien théoricien, spécialiste des milieux continus et du comportement des matériaux solides au Laboratoire de mécanique et d'acoustique (LMA, CNRS/Aix-Marseille Université/École Centrale de Marseille). Ses principaux travaux concernent les structures élastoplastiques, l'homogénéisation de composites non linéaires et la simulation numérique en mécanique des matériaux.

# P rogramme

- 8:45** Ouverture des portes
- 9:15** **Discours introductifs**  
**Patrick FLANDRIN**, Président de l'Académie des sciences  
**Antoine PETIT**, Président-directeur général du CNRS  
**Philippe CONTET**, Délégué général de la Fédération des industries mécaniques (FIM)  
**Éric ARQUIS**, Président de l'Association française de mécanique (AFM)  
Animateur : **Sébastien CANDEL**, Membre de l'Académie des sciences, Président du Haut Comité Mécanique
- 9:45** **La mécanique dans le style français : un outil puissant pour la découverte**  
**Francesco DELL'ISOLA**, Professeur et directeur du Centre international de mathématique et mécanique des systèmes complexes M&MoCS de l'Université dell'Aquila  
Président de séance : **Yves RÉMOND**
- 10:10** **Biomécanique, la mécanique du vivant**  
**Anne-Virginie SALSAC**, Directrice de recherche au CNRS, laboratoire Biomécanique et bioingénierie - (BMBI, CNRS/Université de technologie de Compiègne)  
Président de séance : **Nicolas MOËS**
- 10:35** Pause-café
- 11:00** **Table ronde - Les grandes avancées de la mécanique et les enjeux futurs**  
**Thierry POINSOT**, Membre de l'Académie des sciences  
**Samuel FOREST**, Directeur de recherche au CNRS - Centre des matériaux (CDM, CNRS/MINES ParisTech)  
**François HILD**, Directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de mécanique Paris-Saclay (LMPS, CNRS/ENS Paris-Saclay/CentraleSupélec),  
**Jocelyne TROCCAZ**, Directrice de recherche au CNRS, Laboratoire TIMC, Grenoble  
**Anke LINDNER**, Professeure des universités à l'Université Paris Cité, laboratoire Physique et mécanique des milieux hétérogènes (PMMH, CNRS/ESPCI/Sorbonne Université/Université Paris Cité)  
Président de séance : **Anne-Christine HLADKY**, Animateur : **Guillaume STERIN**
- 12:10** **Vers une mécanique hybride alliant connaissances et données**  
**Francisco Paco CHINESTA**, Membre de l'Académie royale d'Espagne, Professeur des universités à Arts et Métiers ParisTech, laboratoire Procédés et Ingénierie en mécanique et matériaux (PIMM, CNRS/Cnam/Arts et Métiers ParisTech)  
Président de séance : **Ahmed BENALLAL**
- 12:35** Déjeuner

- 14:15**      **Table ronde - La mécanique au service de la société et de la création de valeur**  
**Éric DALBIES**, Directeur Groupe de la recherche, de la technologie et de l'innovation à Safran  
**Bernard SALHA**, Directeur technique du Groupe EDF  
**Laurence GRAND-CLEMENT**, CEO, Persee  
**Isabelle RONGIER**, Inspectrice générale, Ariane Group  
Président de séance : **Thierry POINSOT**, Animateur : **Guillaume STERIN**
- 15:25**      **Mécanique et robotique - L'ère de la collaboration homme-robot : Deep-Sea l'exploration robotique en haute mer**  
**Oussama KHATIB**, *Professor of Computer Science* à l'Université de Stanford et directeur du Stanford Robotics Lab  
Président de séance : **Sébastien CANDEL**
- 15:50**      Pause-café
- 16:20**      **La mécanique dans la construction des grands ouvrages d'art**  
**Michel VIRLOGEUX**, Membre de l'Académie des technologies  
Président de séance : **Jean SALENÇON**
- 16:45**      **Mécanique et science des matériaux**  
**Yves BRÉCHET**, membre de l'Académie des sciences  
Président de séance : **Sylvie POMMIER**, Professeure, à l'ENS Paris-Saclay
- 17:10**      **Synthèse de la journée et discussion générale**  
**Anne-Christine HLADKY**, **Nicolas MOËS**, **Pierre-Alain BOUCARD**, directeur du Laboratoire de Mécanique, Paris-Saclay (LMPS, CNRS/ENS Paris-Saclay/Centrale Supélec), **Eric CLIMENT**, Directeur de l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse (IMFT, Toulouse INP/CNRS/Université Toulouse Paul Sabatier)
- 17:40**      **Cérémonie de remise des prix MécaPixel, le concours photo sur la mécanique organisé par le CNRS**
- 17:55**      **Discours de clôture**
- 18:20**      **Fin**

# Résumés et biographies



## Francesco DELL'ISOLA

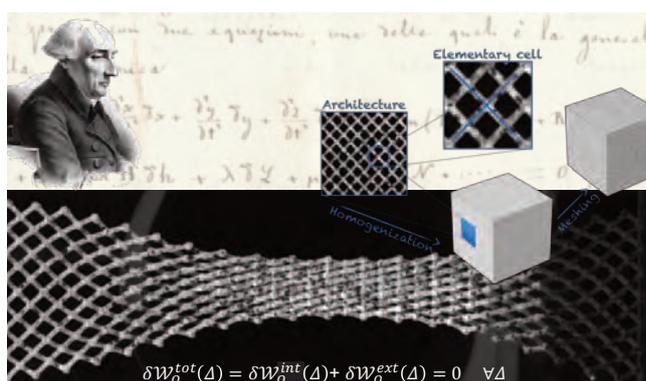
Professeur et directeur du Centre international de mathématique et mécanique des systèmes complexes MEMOCS de l'Università dell'Aquila

Francesco Dell'Isola a obtenu la Laurea en physique théorique et le doctorat en physique mathématique à l'Università di Napoli Federico II. Il a été professeur des Universités de Aix-Marseille III, Roma La Sapienza, Toulon, VirginiaTech, Berkeley, Lobatchevski de Nijni Novgorod. Ses travaux ont porté sur la synthèse et l'étude numérique et expérimentale de nouveaux métamatériaux micro architecturés ou exploitant le couplage piézoélectrique. Il s'est aussi occupé des applications des modèles discrets lagrangiens, de leur homogénéisation et de la formulation des théories de milieux continus de gradient supérieur, en généralisant les résultats de Paul Germain. Dans ce but, il a examiné attentivement les sources originales des auteurs anciens, genèse de la mécanique des milieux continus.

## La mécanique dans le style français : un outil puissant pour la découverte

La « mécanique analytique » (un calque du grec Μηχανικά), a été considérée comme une théorie controversée depuis la parution du célèbre traité de Lagrange en 1788 et cette controverse se poursuit jusqu'à nos jours. Ainsi, Truesdell déclare en 1960 que la « mécanique » lagrangienne était le mauvais fruit de l'influence néfaste exercée par d'Alembert sur Lagrange. Il croyait que la mécanique devait être fondée sur le concept de « force ». Au contraire d'Alembert était persuadé que ce rôle fondamental devait être joué par le « travail ». La force étant un concept dérivé, bien sûr utile dans beaucoup d'applications. Selon d'Alembert, l'idée fondamentale et unificatrice se trouvait dans le Principe des Vitesses Virtuelles (plus tard appelé Principe des Travaux Virtuels, PTV). Archytas de Tarente avait dès, le IV siècle avant JC, fondé la mécanique sur ce principe, comme plus tard Joseph-Louis Lagrange, Gabrio Piola, Lev Landau, Richard Feynman, Paul Germain et bien d'autres. Ce débat épistémologique est-il encore utile aujourd'hui ? De façon plus précise, la mécanique, la plus ancienne des sciences mathématisées, est-elle encore aujourd'hui aussi fertile de problèmes théoriques qu'elle est efficace dans les applications technologiques ? On peut affirmer que la mécanique dans le style français, fondée sur le principe des travaux virtuels, reste un puissant outil favorisant la créativité scientifique et les avancées technologiques, comme nous allons le montrer dans le cas de la théorie moderne des métamatériaux ou des matériaux architecturés. Cette théorie nous aide à inventer des matériaux qui n'existent pas dans la nature et ont des propriétés d'apparence magique, cela en s'appuyant sur la flexibilité et la capacité novatrice intrinsèque à la formulation de d'Alembert et Lagrange. Le PTV permet d'homogénéiser le comportement des systèmes complexes et de formuler des théories macroscopiques prédictives du comportement « global » des microstructures qui forment les métamatériaux exotiques dont la technologie moderne a de plus en plus besoin. Ainsi, le débat épistémologique, focalisé sur la dichotomie force/travail, nous offre un outil puissant pour concevoir et produire des matériaux réels nouveaux. Parmi les possibilités, on peut penser aux matériaux auxétiques pour lesquels l'effet de Poisson est négatif ou nul.

On peut imaginer des matériaux qui restent dans le régime élastique même en grandes déformations. On peut également concevoir des matériaux qui se comportent comme des fluides en petites déformations, et comme des solides en grandes déformations, (« *pentamode materials* »), et de nouveaux matériaux qui sont capables de former des zones d'inaccessibilité acoustique, ou encore à des matériaux multi-physiques qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique.





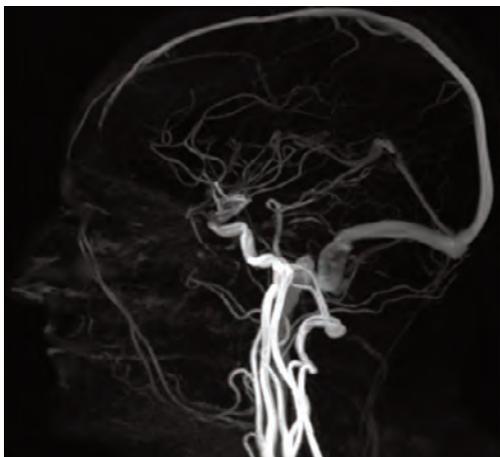
## Anne-Virginie SALSAC

Directrice de recherches au CNRS, Laboratoire biomécanique et bioingénierie, CNRS - Université de technologie de Compiègne

Anne-Virginie Salsac est spécialisée en biomécanique des fluides et dans la modélisation des écoulements sanguins. Elle développe des recherches originales sur la modélisation des écoulements physiologiques allant de la microcirculation à l'hémodynamique dans les grands vaisseaux. Elle s'intéresse notamment au comportement de capsules bioartificielles ou naturelles dans les micro-canaux et à la mise au point de techniques thérapeutiques vasculaires innovantes. Les résultats de ses travaux pluridisciplinaires ont été récompensés par plusieurs prix et récompenses. Anne-Virginie Salsac a notamment été lauréate de la médaille de bronze du CNRS 2015, trophées des Femmes en Or 2015, ordre national du mérite en 2016 et d'une bourse européenne ERC Consolidator en 2018.

## Biomécanique : la mécanique du vivant

Analyser les principes d'ingénierie pilotant les systèmes biologiques : tel est l'enjeu de la biomécanique, qui résulte de la rencontre entre ingénierie, physiologie du corps humain et pratique clinique. Elle répond au défi de mobiliser les communautés scientifiques pour apporter une approche transdisciplinaire et holistique de la santé de l'homme. Avec la mécanobiologie, elle est devenue un des thèmes phares d'applications des sciences de l'ingénierie et des systèmes. Ses objets d'études partagent plusieurs points communs, tels la variabilité inter-individus, la structure multi-échelles des tissus, les nombreux couplages entre différents phénomènes et systèmes, les phénomènes d'adaptation, de régulation ou dérèglement pouvant intervenir sur des temps longs, etc. Son plus grand défi est donc la complexité des systèmes et phénomènes étudiés. Elle apporte des réponses à de nombreuses problématiques de la mécanique, qu'elles touchent à la modélisation multi-modalité (numérique ou expérimentale) de phénomènes couplés, ou à la caractérisation mécanique (*in situ*). Si la biomécanique a su multiplier les collaborations pour développer des approches interdisciplinaires, multi-physiques et multi-échelles, la relation entre mécanique et médecine continue sans cesse de devoir se réinventer. Ceci s'explique par l'arrivée de nouvelles technologies, comme par exemple en imagerie fonctionnelle et multi-échelles, procédés de fabrication de biomatériaux et bioréacteurs, ou encore en algorithmique en assimilation de données, optimisation, et intelligence artificielle. La biomécanique a donc de beaux jours devant elle.





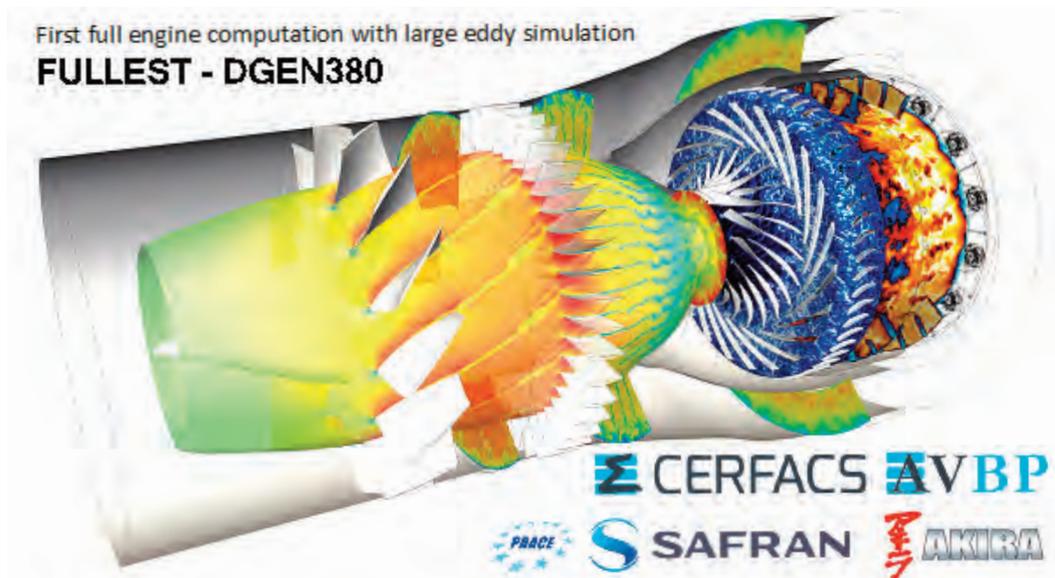
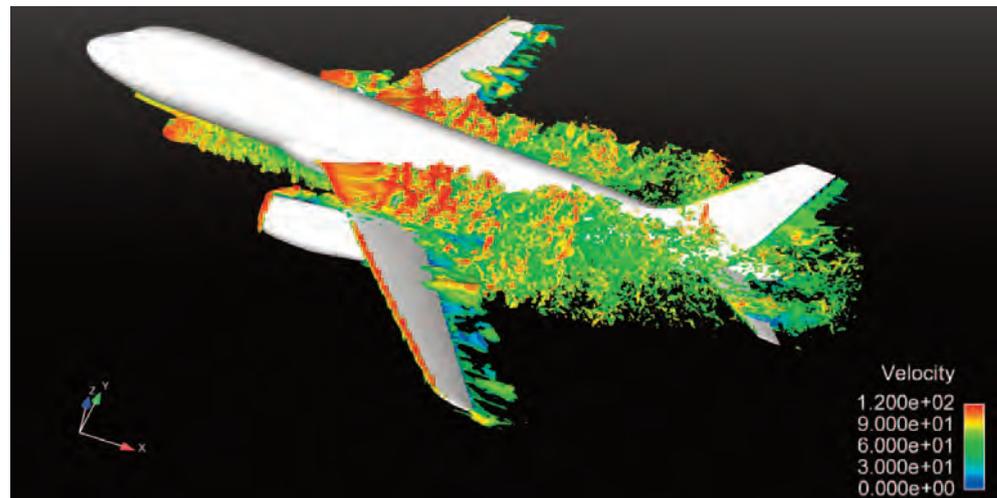
## Thierry POINSOT

Membre de l'Académie des sciences

Thierry Poinsot est directeur de recherche CNRS à l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse IMFT (CNRS/Université Toulouse III-Paul Sabatier/Toulouse INP). Thierry Poinsot étudie la combustion et ses nombreuses applications. Celle-ci, à l'origine de 90% de l'énergie du monde, mais également première source de pollution et de gaz à effet de serre, constitue un domaine à enjeu sociétal fort. Thierry Poinsot s'intéresse particulièrement aux politiques de l'énergie. Il mène cette recherche de façon théorique, numérique et expérimentale, avec de nombreux partenaires académiques et industriels. Éditeur de la revue *Combustion and Flame*, consultant dans de nombreuses compagnies, il enseigne dans le monde entier.

## La mécanique crée des « jumeaux numériques » des avions, des fusées, des turbines...

La mécanique est au centre de la conception de tous les moteurs et des systèmes qui les utilisent. En particulier, la simulation numérique de ces systèmes, grâce à des super ordinateurs, a révolutionné notre approche dans toutes les phases de conception. La grande majorité de nos systèmes (avions, voitures, fusées) fonctionne d'abord à l'intérieur d'un ordinateur ayant des centaines de milliers de processeurs travaillant en parallèle, avant de naître. Ces jumeaux numériques sont devenus des éléments indispensables de la recherche mais aussi de la conception industrielle où le monde virtuel prend une place toujours plus grande. Cette présentation donnera quelques exemples de jumeaux numériques et expliquera comment ils fonctionnent.





## Samuel FOREST

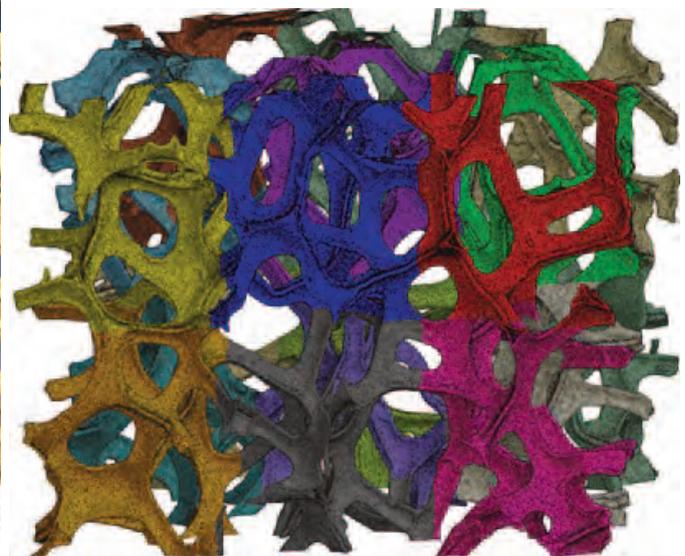
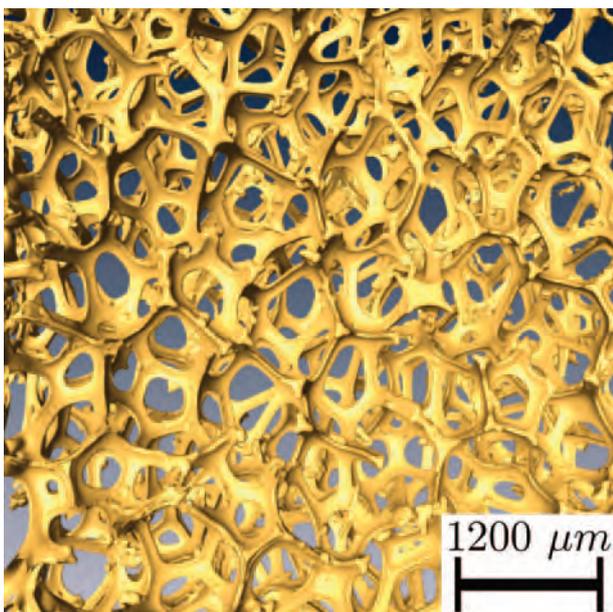
Directeur de recherches au CNRS (Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes), Centre des matériaux de MINES ParisTech

Samuel Forest est directeur de recherches au CNRS et professeur de mécanique des milieux continus à l'École des Mines de Paris. Ses travaux visent à introduire les aspects physiques de la déformation et de la rupture des matériaux dans la modélisation mécanique continue. Ils concernent en particulier la plasticité des alliages métalliques, notamment pour les applications industrielles aéronautiques. Samuel Forest a participé activement aux développements récents de la mécanique des milieux continus généralisés qui intègrent des longueurs internes dans le modèle continu classique. Il a reçu les médailles de bronze et d'argent du CNRS. Il a dirigé de 2009 à 2018 la Fédération francilienne de mécanique, matériaux, structures et procédés, une structure CNRS qui favorise la coopération scientifique entre 14 laboratoires de mécanique de la région francilienne.

## Mécanique pour la transition énergétique : les mousses de métal pour batteries

La mécanique joue un rôle central dans le domaine de l'énergie. Elle est naturellement impliquée dans la transition énergétique. Son apport est illustré dans cet exposé par le cas des mousses de métal (oui, c'est possible de faire mousser les alliages métalliques !). Ces mousses combinent des propriétés contradictoires de légèreté et de ductilité. Les mousses de nickel à porosité ouverte, utilisées dans les batteries de téléphone portable et d'ordinateur, y jouent le rôle de conteneur de la pâte électrolytique et de collecteur de courant. Elles battent des records de porosité en offrant 95% de vide en leur sein tout en pouvant se déformer plastiquement de 15% avant de rompre. Cette résistance mécanique est essentielle car, produites sous forme de plaques de quelques millimètres d'épaisseur, elles sont enroulées pour se loger dans la pile. Cette opération mécanique ne doit pas conduire à la rupture des brins de mousse sous peine de dégrader sa conductivité électrique.

La mécanique numérique permet aujourd'hui de prévoir la résistance de ces produits en combinant la microtomographie aux rayons X, notamment au synchrotron, et le calcul haute performance par éléments finis. Elle réconcilie les échelles de la matière à la structure, du micromètre au centimètre et réalise le tour de force d'une modélisation continue d'un milieu si hétérogène et discret.



Tomographie aux rayons X d'une mousse de nickel pour batterie (à gauche) et maillage par éléments finis pour le calcul intensif des propriétés mécaniques des mousses de nickel (à droite)



## François HILD

Directeur de recherche CNRS, Laboratoire de mécanique Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette

Docteur de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris 6) et titulaire d'un PhD de l'Université de Californie à Santa-Barbara, François Hild a effectué la plus grande part de sa recherche au Laboratoire de mécanique et technologie (LMPS) de l'ENS Paris-Saclay. Il y mène des travaux de mécanique expérimentale appliquée à la résistance des matériaux et des structures. Depuis une quinzaine d'années, il développe en collaboration avec Stéphane Roux, également chercheur au LMT, une approche originale basée sur l'utilisation d'outils de modélisation numérique pour l'analyse par imagerie des essais mécaniques. Il a vu son travail récompensé par les médailles de bronze (1995) et d'argent (2017) du CNRS.

## Avancées et perspectives de la mécanique expérimentale

Jusqu'au XVI<sup>e</sup> siècle, il n'existait pas de méthodologie pour l'expérimentation mécanique. Depuis les Egyptiens, les constructions obéissaient à des règles empiriques issues de succès et d'échecs passés. Les données mécaniques ne venaient pas d'expériences dédiées mais de la pratique. A partir de la Renaissance, on assiste à une prise de conscience de l'intérêt de l'expérimentation conçue pour la compréhension des phénomènes. Au XX<sup>e</sup> siècle, les outils de conception mécanique sont suffisamment performants pour que l'expérimentation puisse devenir l'ultime vérification (souvent imposée par les règlements de certification). La fin du XX<sup>e</sup> siècle et le début du XXI<sup>e</sup> siècle ont vu le développement de méthodes de prévision par la modélisation pour assurer, à long terme, la sécurité humaine et environnementale. Des essais de validation sont alors nécessaires pour prouver la crédibilité des outils numériques et des modèles de comportement. Dans ce dernier cas notamment, un dialogue essais / calculs se doit d'être mis en place. Pour le rendre le plus exhaustif possible, le nombre de données extraites par essai a explosé au cours de ces dernières années grâce à l'utilisation de l'imagerie sous différentes modalités qui donne accès à des champs, par exemple, cinématiques et/ou thermiques. Le panorama actuel montre que la mécanique expérimentale n'est plus une sous-discipline autonome des sciences mécaniques. Des interactions les plus intégrées possible avec la mécanique numérique et théorique sont une des voies actuelles de progrès et de défis à relever.





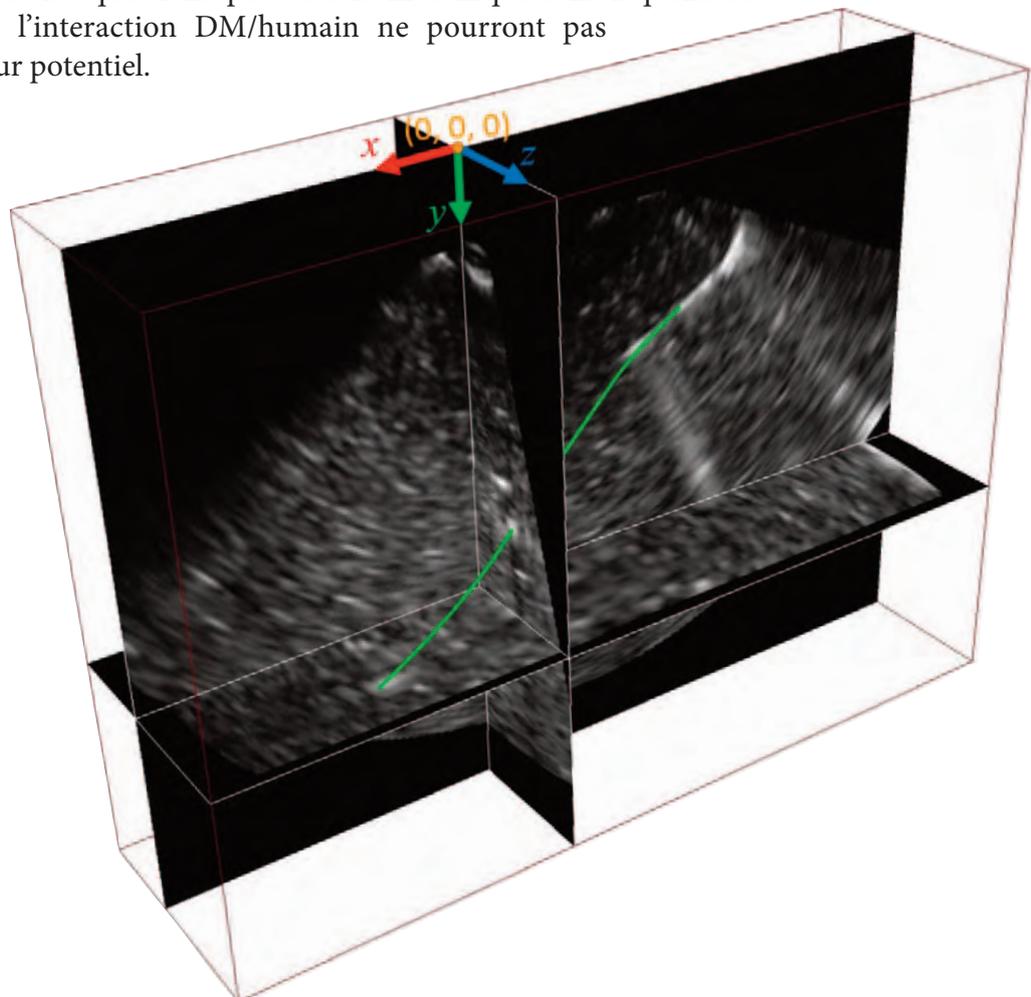
## Jocelyne TROCCAZ

Directrice de recherche, CNRS, Laboratoire TIMC, Grenoble

De formation universitaire en informatique puis robotique, Jocelyne Troccaz s'est spécialisée dans la robotique et le traitement d'image pour les applications médicales dès les années 90. Directrice de recherche au CNRS, elle coordonne le labex national CAMI, dédié aux gestes médico-chirurgicaux assistés par ordinateur et est co-responsable d'une chaire d'intelligence artificielle sur ce thème au sein de l'Institut MIAI Grenoblois. Elle travaille en étroite collaboration avec des équipes cliniques et avec des partenaires industriels pour le transfert de ses travaux. Des centaines de milliers de patients ont bénéficié des résultats de ses recherches. Son activité scientifique ainsi que ses contributions au domaine médical ont été reconnues par plusieurs distinctions (IEEE Fellow, MICCAI Fellow, Prix de l'Académie nationale de chirurgie et nommée membre libre de cette Académie, Médaille d'argent du CNRS et Légion d'honneur notamment).

### La mécanique au service des gestes médico-chirurgicaux assistés par ordinateur

Depuis quatre décennies, l'informatique sert à traiter les images médicales, à planifier les interventions chirurgicales, à les monitorer et à contrôler des robots ou autres dispositifs médicaux (DM) aidant la réalisation de ces gestes. Le domaine des gestes médico-chirurgicaux assistés par ordinateur a beaucoup évolué tant en termes des technologies utilisables et des applications visées que du fait des mutations de la médecine. Le geste est aujourd'hui ultra-minimalement invasif et doit être personnalisé pour chaque patient ; les tissus humains sont mous et déformables ; le robot devient lui-même continument déformable. Ce domaine est donc confronté à la nécessité de pouvoir modéliser chaque patient, chaque partie d'organe ainsi que chaque dispositif médical et chacune de ses interactions avec le tissu biologique de façon à pouvoir planifier, monitorer, corriger en temps réel un geste diagnostique ou thérapeutique. Le contexte médical impose par ailleurs prédictibilité, robustesse et sécurité. Nous décrirons ce contexte exigeant ainsi que les questions posées à la mécanique sans laquelle ces technologies de l'interaction DM/humain ne pourront pas exprimer tout leur potentiel.





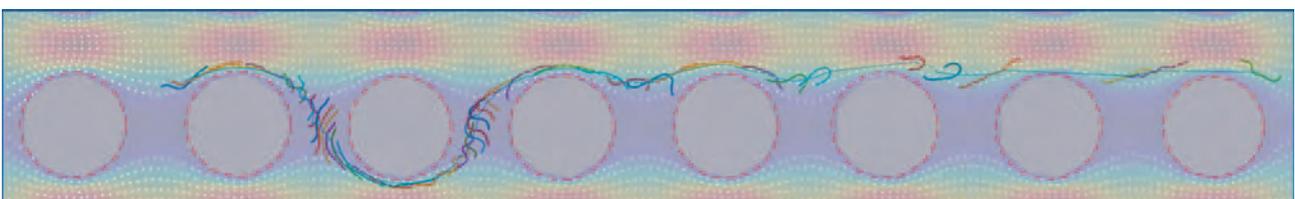
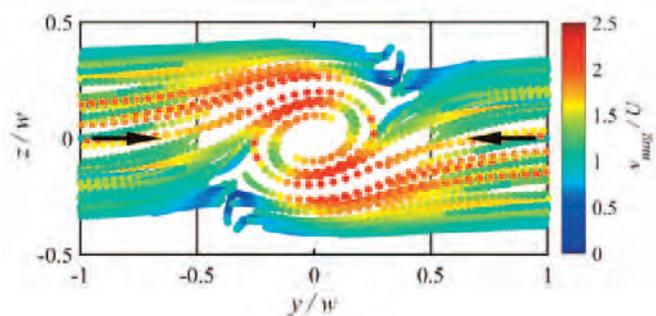
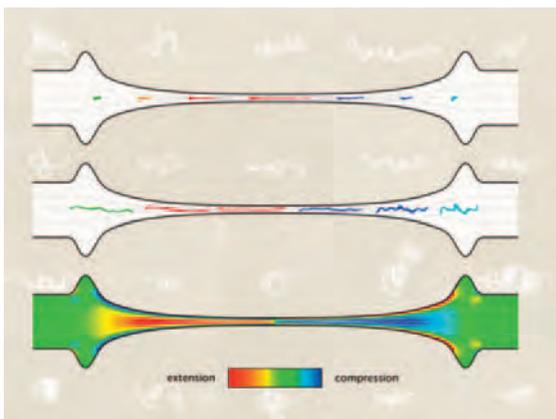
## Anke LINDNER

Professeure classe exceptionnelle Université de Paris, recherche au PMMH-ESPCI Paris - PSL

Anke Lindner est professeure de physique classe exceptionnelle à l'université de Paris. Elle anime le groupe « Suspensions complexes » au laboratoire PMMH de l'ESPCI Paris, PSL dont un des thèmes majeurs de recherche est l'interaction fluide-structure de particules complexes avec des écoulements microfluidiques. Elle a récemment obtenu une bourse Consolidator de l'ERC et a été nommé « fellow » de l'APS-DFD en novembre 2019. Elle est lauréate du prix Maurice Couette de la Société française de rhéologie en 2019 et a reçu la médaille d'argent du CNRS en 2021.

## Transport d'objets de forme et d'élasticité variées dans des canaux microfluidiques

Comprendre et contrôler le transport de particules microscopiques dans des écoulements visqueux est une question fondamentale de l'interaction fluide-structure mais a également des implications importantes pour les processus de séparation ou pour la contamination bactérienne. Par l'utilisation de techniques récentes de microfabrication, nous produisons une variété de particules microscopiques et contrôlons précisément leur forme et leurs propriétés. En étudiant la dynamique de transport de ces particules dans des canaux microfluidiques bien choisis, nous démontrons comment la forme, les propriétés mécaniques ou même l'activité gouvernent les trajectoires des particules. En combinant nos résultats expérimentaux avec des modélisations numériques et théoriques réalisées par nos collaborateurs, nous sommes à même de comprendre en détail le rôle de la symétrie, de la chiralité, de la déformabilité ou de l'activité des particules.





## Francisco Paco CHINESTA

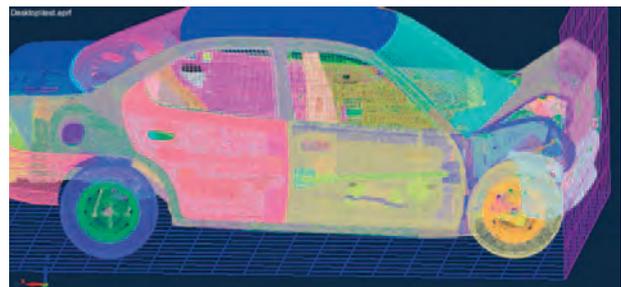
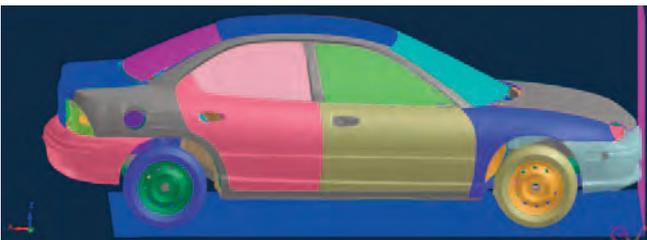
Membre de l'Académie royale d'Espagne

Professeur des universités et chercheur au PIMM, UMR CNRS – Arts et Métiers

Francisco Chinesta est docteur en génie mécanique. Il a été titulaire de la chaire AIRBUS à Centrale Nantes, et plus récemment de deux chaires avec ESI Group (groupe dont il assure actuellement la direction scientifique) au sein du PIMM aux arts et métiers sciences et technologies, autour de la modélisation et de la simulation avancées, combinant dans la notion de jumeau numérique la réduction de modèles et l'intelligence artificielle. Auteur de plus de 350 articles, il a reçu de nombreux prix internationaux. Il est membre honoraire de l'Institut Universitaire de France – IUF, membre de l'Académie royale d'Espagne, docteur Honoris Causa de l'Université de Saragosse et médaille d'argent du CNRS en 2019. Il dirige le projet phare DESCARTES du CNRS au sein du campus d'excellence CREATE à Singapour, sur l'intelligence artificielle hybride, doté d'un budget de 35 M€ et impliquant 160 chercheurs.

### Vers une mécanique hybride alliant connaissances et données

L'homme a depuis toujours été entouré de données, qu'il a su collecter, mesurer, contextualiser, grouper, extraire de corrélations, ... qui lui ont permis de diagnostiquer, pronostiquer, prendre des décisions, pour mieux comprendre et maîtriser l'environnement naturel, et pour développer les arts les sciences, les technologies et les fondements de l'ingénierie. L'analyse des données a ainsi permis la construction de modèles, grâce aux capacités de conceptualisation, contextualisation, raisonnement et abstraction, et à une intelligence naturelle exceptionnellement prolifique. Cela a conduit aux révolutions successives de la machine à vapeur, de l'électricité, de l'électronique, de l'informatique, de l'automatisation associée. Et nous voici maintenant témoins et acteurs d'une nouvelle révolution, dans laquelle la donnée tient un rôle central. Cette fois, la donnée est devenue massive, la capacité à la traiter s'est accélérée avec la puissance de calcul. Sa manipulation est devenue plus efficace grâce à de nouvelles méthodes mathématiques, aux algorithmes de l'intelligence artificielle et à l'apprentissage machine. Mais en fin de compte, qu'est-ce qu'une donnée ? Quelle est sa complexité (sa dimensionnalité) ? Comment peut-on la représenter, la visualiser et la mesurer ? Comment en extraire de la connaissance ? Quelle est sa valeur ajoutée par rapport à la connaissance accumulée pendant des siècles ? Comment en profiter sans devoir réapprendre tout ce qui a été bien appris, et comment apprendre dans un cadre en accord avec les premiers principes de la physique et de la mécanique ? Comment en profiter pour « booster » l'ingénierie pour l'étendre de la conception à l'opération ? Tout cela pour faire vite et bien cette nouvelle révolution technologique dont la mécanique des matériaux, des procédés, des structures et des systèmes est un des principaux protagonistes... Des questions qui parfois vont au-delà de la science pour faire intervenir des dimensions philosophiques et sociologiques, des questions pour trouver réponse dans un nouveau paradigme hybride alliant connaissance et ignorance, analogique et digital, prédiction et mesure.





## Éric DALBIES

Directeur Groupe de la recherche, de la technologie et de l'innovation à Safran depuis juillet 2021

Entré dans le Groupe en 1992 à la Société européenne de propulsion à Vernon, Éric Dalbies occupe divers postes dans les métiers de l'ingénierie et des programmes, d'ingénieur études systèmes aux avant-projets moteurs jusqu'aux fonctions de chef de marque moteur (HM7 et Vinci) puis directeur des programmes moteurs-fusées de Snecma. Il rejoint Turbomeca en 2005 où il est directeur des systèmes d'information jusqu'en avril 2008. Également en charge des démarches de progrès Safran+ de l'entreprise, il occupe pendant 5 ans la fonction d'adjoint au président de Turbomeca. Le 1<sup>er</sup> juillet 2013, il devient directeur de la stratégie du Groupe Safran. Il est nommé directeur du Groupe stratégie et fusions/acquisitions le 28 mai 2015. Depuis novembre 2018, il est directeur général adjoint de Safran Helicopter Engines et directeur général de Safran Power Units. Il est également président du Conseil d'administration d'ArianeGroup depuis le 1<sup>er</sup> novembre 2017.

## La mécanique, un élément clé de la performance

Équipementier leader du secteur aéronautique, le groupe Safran conçoit, fabrique et entretient des produits de haute technologie aux fonctions critiques, comme des moteurs d'avions ou des trains d'atterrissage. Les développements technologiques du groupe cherchent à assurer un niveau de performance toujours plus élevé pour ses clients, associé à un niveau de sécurité sans compromis, le tout dans un contexte sociétal de décarbonation de l'aviation. Répondre à ces enjeux nous impose d'appréhender très finement le fonctionnement intime de nos produits à toutes les étapes de leur vie, ce qui nécessite une excellente maîtrise des différentes disciplines de la mécanique : ainsi, comprendre la thermodynamique et la mécanique des fluides internes de nos turbomachines, nous permet d'atteindre certains objectifs de performance ; de même, la maîtrise de la mécanique des matériaux et des structures est indispensable pour en assurer la sécurité, tout en participant à la maîtrise de la masse embarquée. Au travers de quelques applications, on illustrera l'état de l'art actuel dans la pratique de la mécanique au sein du groupe Safran et ses perspectives, en insistant notamment sur le domaine de la multi-simulation (multi-physique et multi-échelles en temps et en espace), et son couplage toujours plus direct avec celui des essais, qui bénéficie des technologies d'acquisition et de traitement de données avancées.





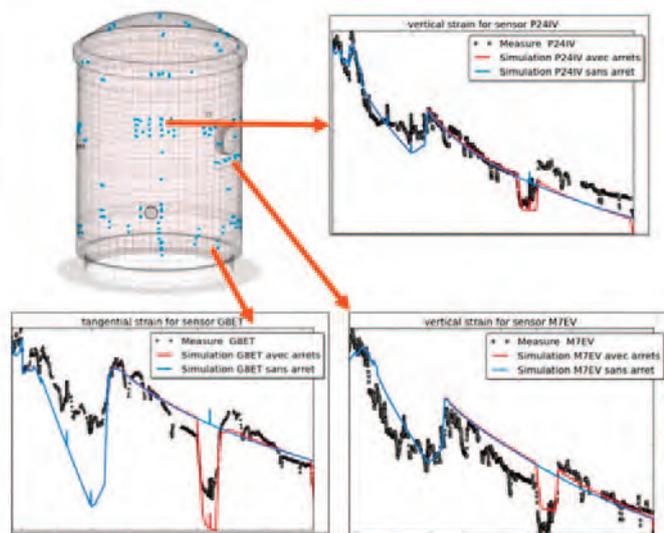
## Bernard SALHA

Directeur technique du Groupe EDF (*Chief Technical Officer*) depuis juin 2018 et directeur de la recherche et développement du Groupe depuis le printemps 2010

Avec un effectif de 2000 personnes, EDF R&D couvre l'ensemble des activités du Groupe, de la production (nucléaire, thermique, hydraulique et renouvelable), à l'aval auprès des clients et des réseaux. Elle est présente dans 3 centres de recherche en France, dont le nouveau centre de Saclay, et dans 6 centres à l'international (USA, Chine, Singapour, Allemagne, Royaume-Uni, Italie). Bernard Salha était précédemment directeur de la division en charge de l'Ingénierie nucléaire d'EDF depuis début 2005, après avoir occupé différents postes à responsabilité dans les unités d'ingénierie et d'études d'EDF. Il a notamment participé au démarrage du programme nucléaire civil chinois pendant 3 ans en Chine. Diplômé de l'École polytechnique et des ponts et chaussées, Bernard Salha a reçu les insignes de chevalier de la Légion d'honneur.

## La mécanique au cœur des enjeux de la production d'électricité décarbonée

En tant que science de l'ingénieur, la mécanique est cœur du fonctionnement des installations de production d'électricité. Les enjeux de la transition énergétique et de l'atteinte d'une cible de neutralité carbone conduisent EDF à concentrer ses efforts sur le développement d'un mix électrique combinant nucléaire et énergies renouvelables (hydraulique, éolien et solaire photovoltaïque). Pour assurer en permanence la sécurité, la performance et la maîtrise de la durée de vie de ces installations, il est nécessaire de maîtriser des phénomènes physiques complexes relevant soit de la mécanique des fluides soit de la mécanique des structures. Les travaux de recherche associés combinent les approches expérimentales et numériques. Depuis plus de 40 ans, EDF capitalise les avancées scientifiques dans le domaine de la mécanique au sein de grands systèmes logiciels (comme Salomé\_Méca pour la mécanique des structures ou Salomé\_CFD pour la mécanique des fluides), diffusés en open source et donc utilisable par la communauté scientifique de ces domaines. La présentation portera sur quelques avancées récentes et sur les différents verrous associés. Dans le domaine de la mécanique des structures, il s'agira de la modélisation du séisme de la faille à la structure, la maîtrise de la durée de vie des composants au travers de jumeaux numériques ou encore des nouvelles méthodes de construction et de fabrication (impression 3D, soudage, etc.). Pour la mécanique des fluides, on présentera les enjeux de la modélisation des incendies, la problématique des écoulements diphasiques tous régimes d'écoulements avec changement de phase ou encore l'évaluation des effets de sillage pour les parcs éoliens *offshore*.



Évolution de la déformation : comparaison essais - jumeau numérique de 3 capteurs virtuels pour 2 simulations (condition aux limites simplifiées / conditions aux limites réalistes)



## Laurence GRAND-CLÉMENT

Persee

Diplômée de l'École polytechnique (X97), et d'un MBA de l'alliance INSEAD-WHARTON (J2006), Laurence Grand-Clément a inscrit ses 10 premières années de carrière dans le développement d'un large portefeuille de compétences clés, à travers des postes de chef de projet, en marketing et commercial, en ressources humaines, de responsable d'unité, de la stratégie et du développement et ce essentiellement au sein de multinationales. Depuis 2011 elle s'est investie pleinement dans la transition énergétique tout d'abord à travers l'Observatoire de l'innovation de l'énergie (OIE) en tant qu'associée, mais aussi dans l'association de promotion des *cleantechs* *Cleantuesday*, en tant qu'administrateur. Ce sont les réflexions autour de la mobilité portée par l'OIE qui la mènent à fonder plusieurs *start-ups* dont Persee, un éditeur de logiciel spécialisé dans la planification et le pilotage d'infrastructures hydrogène et TinHy, concepteur et développeur de stations hydrogène autonomes et compactes pour les territoires urbains.

## La France saura-t-elle relever les ambitions pour la filière hydrogène ?

1,9 milliard d'euros seront consacrés au développement de la filière hydrogène dans le cadre du plan d'investissements France 2030 pour permettre "de réconcilier l'aventure industrielle, la croissance, avec la décarbonation de nos économies". Pour satisfaire cette ambition, un défi technologique et économique de taille se présente : améliorer d'un facteur deux, voire trois l'ensemble des indicateurs technico-économiques de la filière, tels que recensés par le FCH JU (voir illustrations) ou le DOE. La mécanique aura un rôle clé à jouer : matériaux, étanchéité, thermique, etc. Pour autant elle n'a pas chômé jusqu'ici... Saura-t-elle changer d'échelle pour répondre à ces attentes ?

### - Hydrogen production from renewable electricity for energy storage and grid balancing using alkaline electrolysers

No.	Parameter	Unit	State of the art		FCH 2 JU target		
			2012	2017	2020	2024	2030
<b>Generic system*</b>							
1	Electricity consumption @ nominal capacity	kWh/kg	57	51	50	40	46
2	Capital cost	EUR/kg/a	6.000	1.600	1.250	1.000	600
		(EUR/kW)	(~3.000)	(750)	(600)	(400)	(400)
3	O&M cost	EUR/(kg/a)/yr	160	32	26	20	16
<b>Stack</b>							
4	Degradation	%/1000hrs	-	0.12	0.12	0.11	0.10
5	Current density	A/cm <sup>2</sup>	0.3	0.5	0.7	0.7	0.8
6	Use of critical raw materials as catalyst	mg/V	6.9	7.2	9.4	2.1	0.7

Notes:

- \*Standard boundary conditions that apply to all system KPIs: input of 6-11V AC power and tap water; output of hydrogen meeting ISO 14687-2 at a pressure of 30 bar. Correction factors may be applied if actual boundary conditions are different.
- Capital cost are based on 100 MW production volume for a single company and on a 10-year system lifetime running in steady state operation; whereby end of life is defined as 10% increase in energy required for production of hydrogen. Stack replacements are not included in capital cost. Cost are for installation on a pre-prepared site (foundation/building and necessary connections are available). Transformers and rectifiers are to be included in the capital cost.
- Operation and maintenance cost averaged over the first 10 years of the system. Potential stack replacements are included in O&M cost. Electricity cost are not included in O&M cost.
- Stack degradation defined as percentage efficiency loss when run at nominal capacity. For example, 0.12%/1000 h results in 10% increase in energy consumption over a 10 year lifespan with 8000 operating hours per year.
- The critical raw material considered here is Cobalt. Other materials can be used as the anode or cathode catalysts for alkaline electrolysers.
- 3 mg/V derives from a cell potential of 1.7 V and a current density of 0.5 A/cm<sup>2</sup>, equivalent to 6.2 mg/cm<sup>2</sup>.

### - Hydrogen Refuelling Stations (HRS)

No.	Parameter	Unit	State of the art		FCH 2 JU target		
			2012	International SoA 2017*	2020	2024	2030
1	Lifetime	years	na	10	12	15	20
2	Durability	years	na	-	5	10	15
3	Energy consumption	kWh/kg	na	10	5	4	3
4	Availability	%	na	95	96	96	99
5	Mean time between failures (MTBF)	days	na	20	40	72	108
6	Annual maintenance cost	EUR/kg	na	-	1.0	0.5	0.3
7	Labour	Person h/h	na	-	70	28	16
8	CAPEX for the HRS	Thousand EUR/(kg/day)	7.5	7	4.2	3.16	2.4-1.9
9	Cost of renewable hydrogen	EUR/kg	13	12*	11	9	6

Notes:

- Total number of hours of station operation.
- Time that the HRS without its major components/parts (storage, compressor, pump) being replaced, is able to operate (storage that be changed when the number of cycle reaches the regulatory limit. Replacement of hydraulic compressor is forecasted between 10 to 15 years).
- Station energy consumption per kg of hydrogen dispensed when station is loaded at 60% of its daily capacity - For HRS which stores H<sub>2</sub> in gaseous form, at ambient temperature, and dispense H<sub>2</sub> at 700 bar in GHD from a source of >30 bar hydrogen.
- Percent amount of hours that the hydrogen refuelling station is able to operate versus the total number of hours that it is intended to be able to operate (consider any amount of time for maintenance or upgrades as time at which the station should have been operational).
- Parts and labour based on a 200 kg/day throughput of the HRS. Includes also local maintenance infrastructure. Does not include the costs of the remote and central operating and maintenance centre.
- Person-hours of labour for the system maintenance per 1,000 h of operations over the station complete lifetime.
- Total costs incurred for the construction or acquisition of the hydrogen refuelling station, including on-site storage. Exclude land cost & excluding the hydrogen production unit. Target ranges refer to a 200 kg/day station and a 1000kg/day station.
- Cost for the hydrogen dispensed (at the pump), considering OPEX and CAPEX, according to the operator's business model.
- \*For cost aspects, when relevant, the European SoA is indicated and labelled with an asterisk.



## Isabelle RONGIER

Ariane Group

Isabelle Rongier (ingénieur, chevalier de la Légion d'honneur) est inspectrice générale d'ArianeGroup, en charge de sécuriser les décisions techniques majeures dans la Société pour l'ensemble de ses programmes civils et militaires. Cela recouvre une expertise forte tant pendant les phases de développement (Ariane 6, Missile balistique M51.3) que pendant les phases de production (vols Ariane et tirs de dissuasion), afin de valider les choix techniques par une évaluation des risques et opportunités appropriés. Elle est également responsable de la filière Expert, de la gestion des connaissances et normalisation technique associés à l'ensemble des métiers d'ingénierie de la compagnie. Depuis le début de sa carrière au CNES (Centre national d'études spatiales), elle a 108 vols Ariane 4 et 111 vols Ariane 5 à son actif, ainsi que plusieurs vols VEGA et SOYOUZ.

## Ariane 6, un concentré de mécaniques

Depuis la nuit des temps, la conquête spatiale est indéniablement l'un des plus grands défis que l'homme s'est mis en tête de relever ! Pour cela, il a su créer des lanceurs capables de s'arracher à la gravité pour quitter notre atmosphère, apprendre à naviguer dans un univers de microgravité et d'attractions et même à se poser sur des planètes lointaines. L'Europe prend part à tous ces challenges depuis des décennies avec ses lanceurs Ariane, dont le dernier né Ariane 6 va très bientôt prendre son envol. Ce nouveau lanceur fédère un concentré de toutes les mécaniques de pointe, maîtrisées par un réseau des meilleurs ingénieurs et experts des grandes entreprises européennes, dont le « prime » ArianeGroup. Depuis les infrastructures (mécanique du bâtiment), en passant par le dimensionnement structural et l'étude microscopique des alliages (mécanique des matériaux), la gestion d'ergols hautement énergétiques (mécanique des fluides), jusqu'à la trajectoire vers sur l'orbite requise (mécanique spatiale), tout doit être étudié dans les moindres détails pour garantir le succès de la mise à poste de satellites et bientôt de missions habitées. « La Mécanique » est et restera au cœur des métiers d'excellence du spatial.





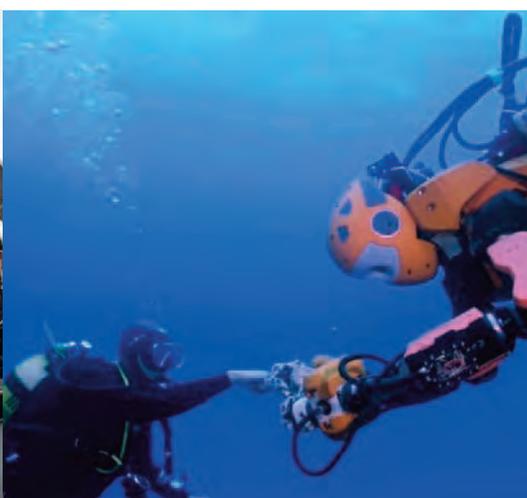
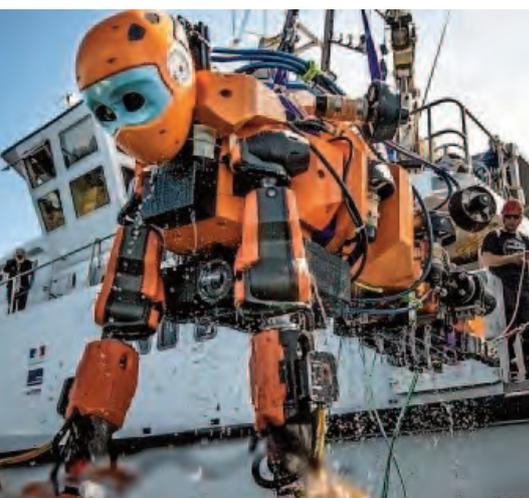
## Oussama KHATIB

*Professor of Computer Science à l'Université de Stanford et directeur du Stanford Robotics Lab.*

Il a obtenu son doctorat en génie électrique de Sup'Aero, Toulouse, France, en 1980. Ses travaux sur la robotique avancée traitent des méthodologies et des technologies de la robotique centrée sur l'humain, notamment les architectures de contrôle humanoïde, la synthèse du mouvement humain, la simulation dynamique interactive, l'haptique et la conception de robots adaptés à l'humain. Il a coédité le *Springer Handbook of Robotics*, qui a reçu le prix PROSE. Il est le Président de la Fondation internationale de recherche en robotique (IFRR). Le professeur Khatib est lauréat du prix de la *Japan Robot Association (JARA)* en recherche et développement et le "*Rudolf Kalman Award*". Fellow de l'IEEE, il a reçu de nombreuses distinctions de l'*IEEE Robotics and Automation Society* le "*Distinguished Service Award*", le "*George Saridis Leadership Award*", le "*Pioneer Award*", et le "*IEEE Technical Field Award*" pour ses contributions pionnières et pour son *leadership* visionnaire, le professeur Khatib est membre du NAE, l'*American National Academy of Engineering* et du Conseil stratégique de la recherche.

## L'ère de la collaboration homme-robot : Deep-Sea l'exploration robotique en haute mer

La promesse d'une découverte océanique a intrigué les scientifiques et les explorateurs, que ce soit pour étudier l'écologie sous-marine et le changement climatique, ou pour découvrir les ressources naturelles et les secrets historiques enfouis dans les sites archéologiques. Cette quête de l'exploration des océans nécessite un accès humain spécialisé, mais une grande partie des océans est inaccessible aux humains. Il est impératif d'atteindre ces profondeurs pour comprendre l'écologie, entretenir et réparer les structures sous-marines et travailler sur des sites archéologiques, cette partie immensément inconnue de notre planète. Ce défi exige des capacités de niveau humain à des profondeurs où l'homme ne peut ou ne doit pas se trouver. Ocean One a été conçu pour créer un plongeur robotisé doté d'un haut degré d'autonomie pour l'interaction physique avec l'environnement, par le biais d'un système de communication muni d'une interface intuitive. Le robot a été déployé lors d'une expédition en Méditerranée sur le navire amiral du roi Louis XIV, la Lune, situé au large de Toulon à 91 mètres de profondeur. La discussion se concentre sur le développement d'un nouveau prototype, OceanOneK, capable d'atteindre 1000 mètres. Distancer physiquement les humains des espaces dangereux et inaccessibles tout en associant leurs compétences, leur intuition et leur expérience, promet de modifier fondamentalement le travail à distance. Ces développements montrent comment la collaboration entre l'homme et le robot, induite par leur synergie, peut accroître nos capacités à atteindre des endroits dangereux, à construire et à entretenir des infrastructures et mener des opérations de prévention des catastrophes et de rétablissement des océans.





## Michel VIRLOGEUX

Membre de l'Académie des technologies

Après 25 ans dans le service public Michel Virlogeux s'est établi ingénieur consultant indépendant en 1995. Il a consacré toute sa carrière à la construction des ponts. Il a notamment conçu le Pont de Normandie, la Viaduc de Millau avec l'architecte Lord Foster, et le troisième pont sur le Bosphore avec Jean-François Klein. Il recherche l'élégance de l'ouvrage, et sa bonne inscription dans le site, par une approche scientifique et technique qui touche les différents aspects de la mécanique, notamment les matériaux, le calcul des structures, l'aérodynamique et la résistance aux séismes.

### La mécanique dans la construction des grands ouvrages d'art

La construction des grands ouvrages n'a cessé de progresser depuis la fin du 18ème siècle, et tout particulièrement depuis une cinquantaine d'années. L'évolution récente a été permise par de profondes évolutions politiques et économiques, mais aussi par les progrès de la science – et en son sein des sciences de la mécanique – qu'il ne faut pas séparer des techniques ni de la technologie qui progressent avec elle. Maîtrise des actions naturelles, le vent, la houle, la pression des glaces, les séismes ; mais aussi la puissance des moyens de construction et la possibilité de mobiliser des moyens financiers considérables ont permis de construire des ouvrages de plus en plus grands, par exemple pour franchir des détroits, qu'on ne pouvait même pas imaginer auparavant. Mais il faudra lutter contre un certain développement de la réglementation technique qui tend à figer la conception, et dont un strict respect devient trop souvent le seul objectif. Plutôt qu'une application de règles plus ou moins forfaitaires, qui réduisent le rôle des ingénieurs à celui de techniciens, la priorité doit être donnée à des approches scientifiques qui sont seules capables de permettre le progrès et l'innovation.





## **Yves BRÉCHET**

Membre de l'Académie des sciences

Professeur à l'institut polytechnique de Grenoble (1988-2012), titulaire de la chaire annuelle « Innovation technologique » au Collège de France (2012-2013), il a été Haut Commissaire à l'énergie atomique (2012-2018) et il est actuellement Directeur Scientifique de Saint-Gobain et « research professor » à l'Université de Monash ( Australie). Il s'est intéressé aussi bien à la genèse des microstructures qu'aux conséquences sur la plasticité et l'endommagement, essentiellement pour les métaux et alliages, en particulier en lien avec le domaine des transports et celui de l'énergie. Intéressé aux aspects fondamentaux aussi bien qu'aux questions d'ingénierie, il a travaillé au développement de méthodes de choix des matériaux, ainsi qu'au développement de matériaux architecturés « sur mesure ».

### **Mécanique et science des matériaux**

Classiquement la science des matériaux de structure vise à expliquer les comportements de la matière à partir des microstructures, généralement submicroniques. La mécanique des solides vise à comprendre le comportement des composants de structures à partir de celui des matériaux considérés comme un continuum, et des conditions géométriques, généralement au-dessus du centimètre. L'interaction entre les deux disciplines s'est naturellement faite quand elles se sont rencontrées dans des échelles comparables, comme par exemple dans les polycristaux ou les matériaux composites.

Les domaines applicatifs ont poussé la mécanique des solides vers des échelles plus réduites, ou la structure devenait commensurable avec la microstructure, et le développement de nouvelles classes de matériaux et de procédés (notamment les procédés de fabrication additive) ont conduit la science des matériaux vers des échelles plus élevées ou les mécanismes élémentaires permettaient d'oublier la nature discontinue de la matière. Cette double évolution a conduit à un rapprochement des questionnements qui n'a pas encore donné toute sa mesure et qui constitue un champ de recherche très actif, aussi bien du point de vue expérimental que du point de vue théorique. Parallèlement, la maîtrise des procédés, les exigences de mise en œuvre des matériaux, la compréhension des mécanismes contrôlant leur durabilité, nécessitent des approches conjointes qui mêlent intimement mécanique des solides et science des matériaux. Ces développements sont essentiels pour répondre aux nouvelles exigences d'un usage parcimonieux et efficace de la matière. Cette « convergence des approches » ne peut se réduire à une transmission d'information entre les disciplines mais nécessite une véritable interaction dès la conception du matériau ou la réalisation des pièces.

Inscriptions ouvertes au public dans la limite des places disponibles.

[www.academie-sciences.fr](http://www.academie-sciences.fr)

(rubrique « prochains événements »)

# La mécanique comme vous ne l'avez jamais vue

Avec le concours de photos MécaPixel, l'Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes du CNRS dévoile un autre regard sur les sciences de la mécanique.

Découvrez les treize clichés sélectionnés par le jury.



## Fantôme d'aorte

Plus grosse artère du corps humain, l'aorte n'a pas livré tous ses secrets. Des chercheurs en ont donc fait une réplique grandeur nature, en silicone, qu'ils appellent malicieusement « fantôme d'aorte ». Elle est la pièce maîtresse de ce dispositif reproduisant les écoulements sanguins et permettant de les visualiser grâce à un laser vert.

© Anaïs Moravia / LMFA / CNRS Photothèque



## Rond de flamme

Qui pourrait penser que cette boule qui semble figée dans la cendre est en fait une flamme ? Enfin... plus précisément, la simulation d'une flamme de 5 mètres de diamètre (en gris) se propageant au milieu d'obstacles (les arcs violets). But de l'opération : imaginer, pour les sites industriels, des designs ralentissant les flammes et limitant ainsi les risques d'explosion dévastatrice.

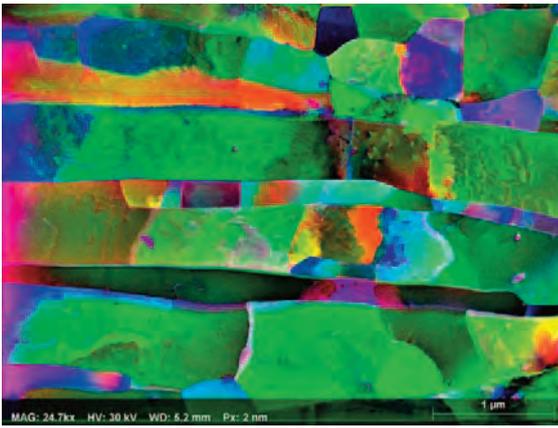
© Julien Reveillon / CORIA / CNRS Photothèque



## Spirale tatouée

Cette spirale, qui ne mesure que quelques dizaines de micromètres, a été reproduite à la surface d'un verre métallique – un alliage aux propriétés exceptionnelles – grâce au procédé de thermoformage. Les fissures proviennent de la rupture du moule lors de l'essai et ont été « tatouées » en même temps que la spirale !

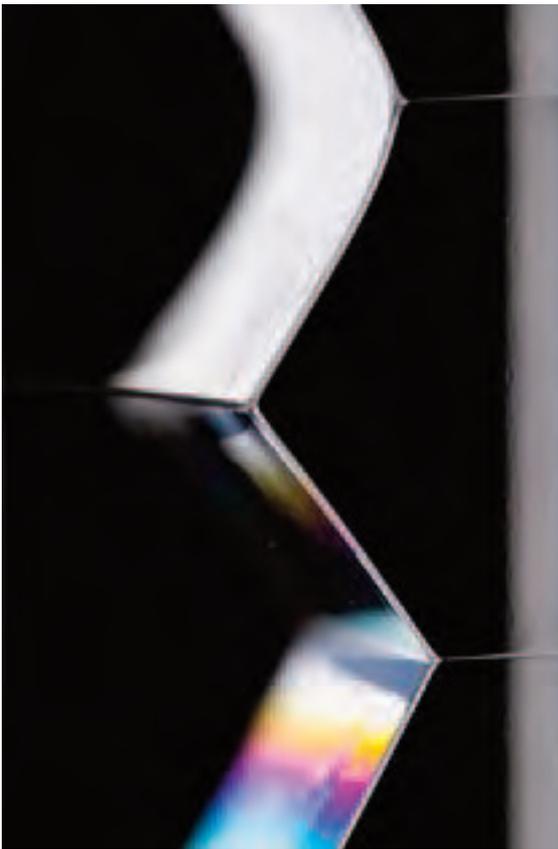
© Loïcia Gaudillière / SIMaP / CNRS Photothèque



### Acier couché

Cette palette de couleurs, qui ne dépareillerait pas au milieu des œuvres d'art d'une galerie, représente en fait la déformation d'un acier à l'échelle du micromètre (10<sup>-6</sup> m). Les grains de matière se sont allongés à l'horizontale, finissant par se fragmenter... ce qui, paradoxalement, augmente la résistance du matériau et retarde sa rupture. Des expériences précieuses pour améliorer les matériaux de nos véhicules.

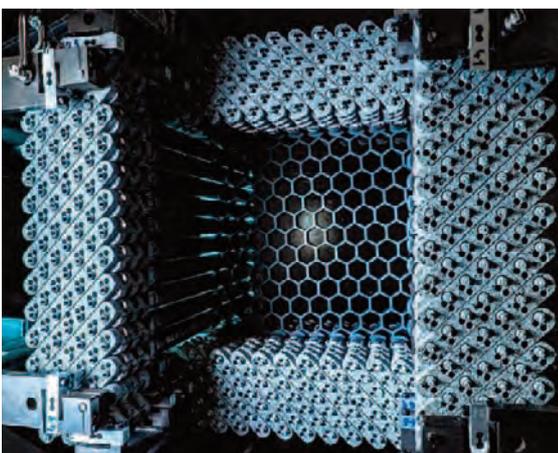
© Clément Ernould / LEM3 / CNRS Photothèque



### L'importun et la bulle

Quand des bulles de savon s'assemblent, l'architecture de la mousse obéit à des règles précises. Mais que se passe-t-il si on y ajoute un intrus, comme la lamelle élastique introduite en haut de cette colonne de bulles ? Eh bien la forme et la couleur caractéristique des bulles, visible en bas de la structure, changent radicalement. Et tout dépend alors des propriétés de l'importun...

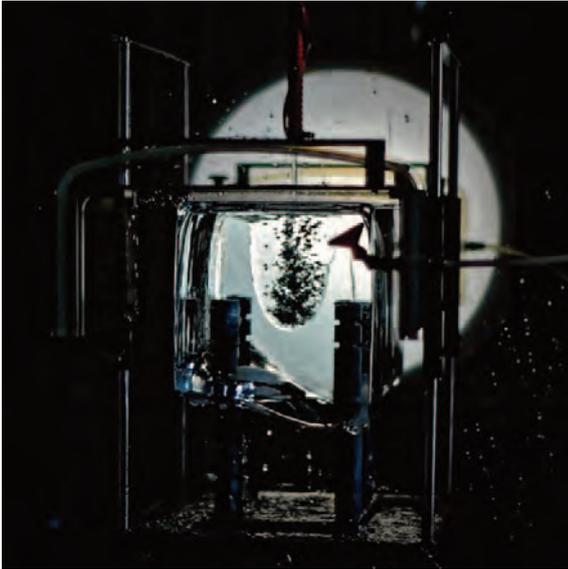
© Aurélie Hourlier-Fargette et Manon Jouanlanne / ICS / CNRS Photothèque



### Réseau nid d'abeilles

Cette machine aux airs futuristes permet de mesurer les propriétés de matériaux innovants, dits « architecturés » car leur structure leur confère des propriétés mécaniques remarquables. Sur cette image, un réseau de cellules hexagonales, formant un nid d'abeilles artificiel, très utilisé dans l'aéronautique, est soumis à l'examen.

© Maxence Wangermez et Martin Poncelet / LMT / LMPS / CNRS Photothèque



### Glaçon échaudé

Objectif de l'expérience : simuler l'impact d'un jet de métal liquide sur la paroi d'un réacteur lors d'un accident nucléaire grave. Dans cette maquette, un jet d'eau chaude vient cogner un glaçon transparent. En suivant la forme et l'évolution de la cavité au fil du temps, les chercheurs peuvent identifier l'option qui permet le mieux de ralentir la fusion au cœur du réacteur.

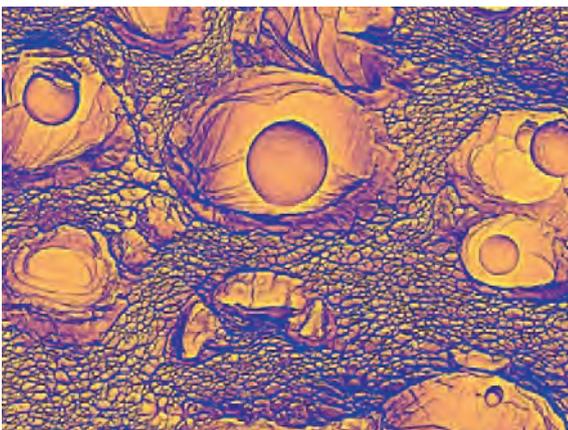
© Antoine Avrit / LEMTA / CNRS Photothèque



### Sous contrainte

Dans les laboratoires, les pièces automobiles sont soumises à rude épreuve. Objectif : prévoir la manière dont elles vont évoluer au fil du temps. Cette image révèle les contraintes exercées sur une pièce soumise à un chargement cyclique. On y voit des variations extrêmement faibles de température : 0,05 °C maximum sur cette image !

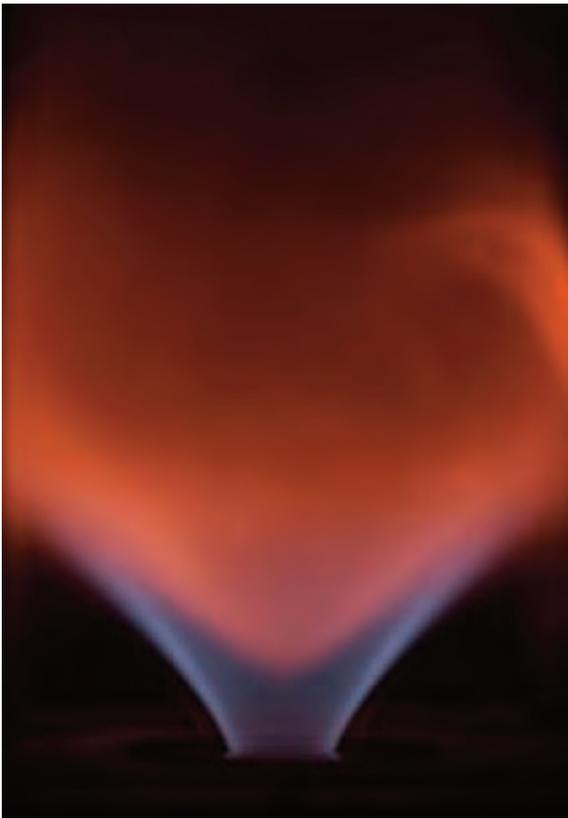
© Vincent Le Saux / IRDL



### Rupture de titane

Ce paysage lunaire est celui d'une rupture. De la rupture d'une pièce de titane plus exactement, étudiée avec attention par les scientifiques qui veulent en comprendre les causes. L'énigme a été résolue : les « cratères » révèlent en fait des grains de poudre métallique qui n'ont pas fondu durant la fabrication de la pièce, devenant les talons d'Achille de la pièce.

© Hamza Jabir / PIMM / CNRS Photothèque



### **Cœur de feu**

Une flamme esquissant un cœur, quoi de plus logique ? Derrière ses atours romantiques, cette flamme issue de la combustion d'hydrogène permet aux scientifiques d'étudier différents mécanismes de stabilisation des flammes... avec des applications allant des fournaies aux turbines utilisées dans l'aéronautique.

© Sylvain Marragou et Hervé Magnès / IMFT / CNRS Photothèque



### **Beignet d'eau**

Par Poséidon ! Des chercheurs ont créé des anneaux d'eau, comme celui que l'on voit au centre du disque gris. Ce dernier est un « substrat superhydrophobe », c'est-à-dire une surface sur laquelle l'eau n'adhère quasiment pas... à l'image d'une feuille de lotus. Ce beignet aquatique constitue un outil unique pour étudier les ondes les plus complexes.

© Filip Novkoski / MSC

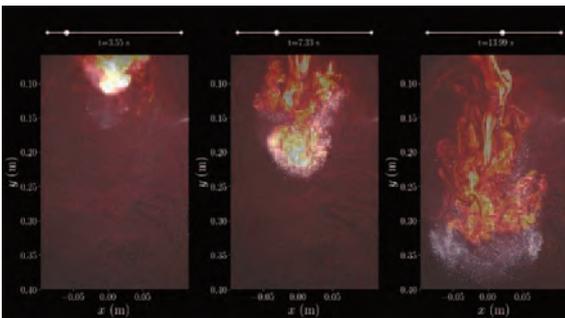




### Rotor retors

Née de la superposition de 200 photos d'un rotor prises au cours d'une même expérience, cette image révèle la déformation des deux pales flexibles provoquée par des écoulements liquides. À la clef de cette étude, de possibles améliorations pour les hydroliennes ou les drones sous-marins.

© Ahmed Eldemerdash / IRPHE / CNRS Photothèque



### Neige de fer

Comment expliquer que des petites planètes telluriques aient un champ magnétique ? Les scientifiques tiennent un suspect : la neige de fer. Pour modéliser le phénomène selon lequel du fer solide s'écoulerait vers le centre du noyau liquide de ces planètes, ils ont étudié la chute de billes dans de l'eau. Verdict : cela provoquerait bien des turbulences potentiellement à l'origine d'un champ magnétique !

© Quentin Kriaa / IRPHE / CNRS Photothèque



