



Association Aéronautique  
et Astronautique de France

# LETTRE 3AF

La revue de la société savante  
de l'Aéronautique et de l'Espace

## DOSSIER TRANSFERT DE TECHNOLOGIE DU DOMAINE AÉROSPATIAL VERS LA SANTÉ



PRÉFACE DE MADAME  
LA MINISTRE FRÉDÉRIQUE  
VIDAL



Dassault Systèmes  
le jumeau virtuel



QUAND L'INNOVATION NAÎT DE  
LA SCIENCE



UNE VALVE CARDIAQUE DANS  
LE BERCEAU DE RAFALE



LE MICROVASCUSCOPE  
POUR DÉTECTER LES CANCERS  
DE LA PEAU



UNE OPÉRATION EN  
APESANTEUR

## 3 ÉDITORIAL

## 4 MESSAGE DU PRÉSIDENT

## 5 PRÉFACE

par Madame Frédérique Vidal, Ministre de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation

## ACTUALITÉ

### 6 PARTENARIAT 3AF AVEC ALUMNI-ONERA

par Bruno Chanetz, rédacteur en chef

## POINTS DE VUE

### 8 QUAND L'INNOVATION NAÎT DE LA SCIENCE

par Stéphane Andrieux, ONERA, Académie des technologies

### 19 SUITE À LA CRISE, LE TRANSPORT AÉRIEN VA-T-IL SE RÉINVENTER ? L'EXPÉRIENCE DES CRISES PASSÉES

par Jean-Marc Garot, 3AF

### 24 L'AVIATION COMMERCIALE APRÈS LA COVID-19

par Francis Guimera, CT aviation commerciale

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ

### 30 LE JUMENT VIRTUEL, UNE NOUVELLE REPRÉSENTATION DU MONDE

par Florence Verzelen, Dassault Systèmes

### 36 SPECTROSCOPIE CARS : DE L'ÉTUDE DE LA COMBUSTION À LA MICROSCOPIE POUR LA BIOLOGIE

par Elodie Lin, Michael Scherman, Pierre Lavenus, Alexandre Bresson, Brigitte Attal-Tretout, ONERA, Aude Silve et Lluis Mir

### 42 OPTIQUE ADAPTATIVE POUR L'IMAGERIE RÉTINIENNE

par Serge Meimon, ONERA, Kate Grieve, Hôpital des Quinze-Vingts et Cyril Petit, ONERA

### 47 LE MICROVASCULOSCOPE POUR DÉTECTER LES CANCERS DE LA PEAU

par Elise Colin Koeniguer, Xavier Orlik et Aurélien Plyer, ONERA

### 50 L'AÉRODYNAMIQUE AU SERVICE DE LA CHIRURGIE ORL

par Gilles Bouchet, IUSTI - Marseille

### 57 LA RECONSTRUCTION DU TRACTUS DE SORTIE DU VENTRICULE DROIT

par Dominique Charbonnier et Jan Vos, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

### 62 MODÉLISATIONS BIOMÉCANIQUES POUR LA RÉPARATION DE STRUCTURES OSSEUSES

par Arnaud Germaneau, Institut Pprime et Tanguy Vendeuvre, CHU de Poitiers

### 68 UNE VALVE CARDIAQUE DANS LE BERCEAU DU RAFALE

par Philippe Perrier, ex-Dassault-Aviation

## ESPACE

### 74 L'ÉCHOGRAPHIE SPATIALE

par le Professeur Philippe Arbeille, Université de Tours

### 80 UNE OPÉRATION EN APESANTEUR PAR LE PROFESSEUR DOMINIQUE MARTIN

par Bernard Vivier et Claude Motel, membres émérite 3AF

## FORMATION ET CARRIÈRES

### 81 EUROSAAE FICHE DU COURS DE SERGE MEIMON

## VIE 3AF

### 82 LA CT MÉDECINE

par Philippe Mairet, président

## HISTOIRE

### 83 SYSCOMORAM : SYSTÈME À COMMANDE MODULAIRE POUR RECHERCHE ET L'AIDE MÉDICALE (1975)

par Bernard Vivier et Claude Motel, membres émérite 3AF

### 84 LES PROTHÈSES EN TITANE ET L'ONERA

par André Walder, ONERA

## IN MEMORIAM

### 86 HOMMAGE À JEAN-MARIE LUTON

par Jean-Yves Le Gall, président du CNES

## ÉVÉNEMENTS 3AF

### 87 LES PROCHAINS ÉVÉNEMENTS

#### ÉDITEUR

Association Aéronautique et Astronautique de France  
6, rue Galilée, 75116 Paris  
Tél. : 01 56 64 12 30  
secr.exec@aaaf.asso.fr

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION  
Louis Le Portz

RÉDACTEUR EN CHEF  
Bruno Chanetz

COMITÉ DE RÉDACTION  
Pierre Bescond  
Jean Détery  
Jean-Yves Guédou  
Bertrand de Montluc  
Jean-Pierre Sanfourche  
Jean Tensi  
Pierre Tréfouret  
Bernard Vivier

CONCEPTION GRAPHIQUE  
ICI LA LUNE  
www.icilaLune.com

Droit de reproduction, textes et illustrations réservés pour tous pays.



## ÉDITORIAL

Le fléau qui vient de frapper le Monde bouleverse nos vies, met nos économies à mal et fait vaciller le transport aérien et la construction aéronautique, que rien ne semblait devoir atteindre, tant les perspectives de croissance étaient assurées. Une prochaine Lettre présentera un dossier plus complet sur les conséquences de cette crise dans notre secteur d'activité, mais Jean-Marc Garot, Francis Guimera et la commission aviation commerciale de la 3AF nous livrent d'ores et déjà le fruit de leurs réflexions à travers deux articles sur le sujet. Cette crise est grave, mais d'autres, dans le passé, ont été surmontées. La faculté d'adaptation de nos structures peut être le meilleur garant de la survie d'un secteur menacé.

Notre société savante sait que de nombreuses ressources existent au sein du secteur de l'aéronautique, du spatial et de la défense (ASD) pour trouver des solutions innovantes et adaptées, d'autant plus nécessaires dans cette période où beaucoup remettent en question les fondements même de nos sociétés. *L'innovation naît de la science* comme le rappelle Stéphane Andrieux dans l'article qui ouvre cette Lettre. Et les conséquences de nos recherches scientifiques peuvent largement déborder le cadre des études qui les ont vues naître.

L'article introductif de ce dossier *Le jumeau virtuel, une nouvelle représentation du monde* est signé de Florence Verzelen de Dassault Systèmes. Cette société, issue du monde aéronautique, modélise, simule et analyse des données dans le but d'améliorer le monde réel en mettant ses univers virtuels au service de la santé.

Quand dans les années 1990, étaient réalisées des mesures de température et de densité au sein d'écoulements hypersoniques <sup>1</sup>, pouvait-on imaginer que la technique de diffusion Raman anti-Stokes cohérente (CARS) alors utilisée serait un jour appliquée au diagnostic biomédical ? Élodie Lin et ses collègues de l'ONERA et de l'Institut Gustave Roussy à Villejuif racontent dans ces pages l'histoire de la spectroscopie CARS : *de l'étude de la combustion à la microscopie pour la biologie*.

En 2018, Thierry Fusco présentait dans nos colonnes la réponse efficace qu'apporte l'optique adaptative (OA) pour

améliorer la résolution des grands télescopes <sup>2</sup>. Il évoquait en perspective les retombées de cette technique dans le domaine ophtalmologique. À présent, Serge Meimon divulgue les progrès réalisés au laboratoire ONERA installé au sein de l'hôpital des Quinze-Vingt. La technique de l'OA révèle les structures microscopiques qui tapissent le fond des yeux. Les espoirs sont immenses, notamment dans le domaine neurologique.

L'aéronautique et l'espace, tout comme la médecine requièrent des moyens d'observation, toujours plus performants. Ces deux exemples illustrent comment l'une sert l'autre.

Une troisième application de l'imagerie est un *micro-vasculoscope permettant la détection de cancers de la peau*. ITAE, une start-up éclose à l'ONERA, développe cet instrument utilisant un éclairage laser et ses propriétés polarimétriques. Le succès repose sur la mise au point de capteurs pour l'industrie aérospatiale et les compétences de l'ONERA en imagerie radar et optique.

Le domaine du numérique concourt aussi au transfert de technologie au bénéfice de la santé. Deux articles de cette Lettre illustrent comment les codes de calcul se prêtent à des extensions hors de leur domaine d'origine. Le premier émane de l'IUSTI, qui a une grande expérience dans la modélisation numérique des écoulements, de l'incompressible au supersonique. Pour son application à *la modélisation des écoulements dans les voies respiratoires supérieures*, Gilles Bouchet a travaillé en collaboration avec deux services des Hôpitaux de Marseille La Conception. Le second exemple d'utilisation des codes aérospatiaux dans le domaine biomédical est dû à Dominique Charbonnier et Jan Vos (CFS). Le code Navier-Stokes développé à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne pour des applications aérospatiales, et employé par Ariane Group, a été utilisé pour *la reconstruction du tractus de sortie du ventricule droit*.

Même les montages expérimentaux peuvent être mis à contribution. C'est en effet une application à la fois numérique et expérimentale qu'Arnaud Germaneau (institut Pprime) mise au point en lien avec le CHU de Poitiers. Les techniques développées pour des études

1. F. Grisch, P. Bouchardy, M. Péalat, B. Chanetz, T. Pot and M.-C. Coët, *Rotational temperature and density measurements in a hypersonic flow by dual-lines CARS in Appl. Physics*. B56,14-20 (1993)

2. T. Fusco, *Optique adaptative et déconvolution*, Lettre 3AF n°33 (2018)

## ÉDITORIAL (SUITE)

de structures sur l'A380 ont permis la modélisation de techniques chirurgicales pour la réparation de structures osseuses.

Philippe Perrier, ancien directeur technique chez Dassault Aviation, nous a récemment fait partager sa passion pour la voile dans deux articles remarquables<sup>3</sup>. Son présent article : *Une valve cardiaque dans le berceau du Rafale* clôt ce dossier.

La rubrique Espace compte deux articles liés au dossier principal. Le professeur Philippe Arbeille (faculté de médecine de Tours) traite de la télé-échographie avec la station spatiale internationale. La procédure est identique pour la réalisation d'une échographie entre un centre médical isolé sur Terre un généraliste jouant le rôle de l'astronaute de l'ISS. Le second article Espace rend compte d'une opération en apesanteur, sous zéro g, effectuée par le professeur Dominique Martin du CHU de Bordeaux.

En évoquant d'une part le Système à Commande Modulaire pour Recherche et l'Aide Médicale (SYSCOMORAM), né à la Société nationale industrielle aérospatiale (SNIAS), et d'autre part les prothèses en titane nées à l'ONERA, la rubrique histoire relève de la thématique du dossier central.

Cette longue tradition de soutien à la recherche médicale de la part des sociétés du secteur ASD se traduit par une implication forte dans les réponses aux appels d'offre COVID19. Ainsi l'ONERA est partenaire dans plusieurs propositions pour valoriser des technologies et savoir-faire appliqués à cette situation de crise, que ce soit pour le dépistage des personnes ayant de la fièvre à partir de techniques d'imagerie infrarouge (collaboration avec Bertin Technologies) ou la détection précoce de syndromes de déficience respiratoire par des techniques de micro-radar (collaboration avec la startup MORPHEE+). ■

Bruno Chanetz

*président du Haut conseil scientifique, rédacteur en chef*



## LE MESSAGE DU PRÉSIDENT

Cette Lettre fait honneur à notre société savante et au-delà, au domaine aéronautique spatial et défense qu'elle représente. Elle montre ce que notre secteur a apporté à la santé.

Les méthodes optiques développées pour la combustion ou le spatial et l'imagerie radar et optique ont ainsi trouvé un second souffle dans le bio-médical. Des instituts tels que Gustave Roussy à Villejuif, l'hôpital des Quinze-vingt à Paris ou l'Oncopole de Toulouse ont travaillé avec des équipes de l'ONERA pour développer des moyens de diagnostic précoces.

Les CHU de Marseille et Poitiers ont été impliqués dans des études numériques au moyen des codes de calculs initialement conçus pour des applications aéronautiques.

Des techniques développées pour les essais en souffleries comme la vélocimétrie par image de particules (PIV) ont aussi été mises à contribution pour mesurer le champ de vitesses au sein d'une valve cardiaque.

Mais avant de vous laisser découvrir l'ensemble de ces contributions, je voudrais chaleureusement remercier Madame Frédérique Vidal, ministre de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, d'avoir bien voulu préfacer cette Lettre, comme elle l'avait fait déjà l'année dernière pour le n° spécial Espace (Lettre n°38), ce qui montre son attachement à notre société savante. ■

Louis Le Portz  
*président de la 3AF*

3. Ph. Perrier, *Les bateaux qui volent*, Lettre n°27 (2017) et *Aérodynamique et hydrodynamique des records de vitesse à la voile*, Lettre n°39 (2019)



## PRÉFACE

par Madame Frédérique Vidal,

Ministre de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation

Ce numéro de la lettre de la 3AF, consacré aux liens entre ces deux domaines en apparence éloignés que sont l'aéronautique et le spatial d'une part, et la santé de l'autre, nous apporte de magnifiques exemples de ce que sont la recherche et l'innovation dans la réalité quotidienne des chercheurs, des ingénieurs et des organismes : un univers où les disciplines se croisent, où les idées des uns répondent aux questions des autres, où le hasard, parfois, joue aussi un rôle.

Alors que le monde vient de subir une pandémie dont les conséquences humaines et économiques sont encore difficiles à évaluer, nous avons pu mesurer la réactivité de notre système de recherche tout entier. L'aéronautique et le spatial ont pris toute leur part aux côtés des instituts de recherche, des hôpitaux et des personnels de santé. Les aviateurs, les ingénieurs aéronautiques et spatiaux, connaissent bien ces situations d'urgence opérationnelle telle que celle que nous avons rencontrées, et ils ont eu à cœur de se mobiliser très rapidement et avec efficacité. Qu'ils en soient remerciés.

Ce numéro avait été imaginé avant le début de la crise sanitaire ; il traite essentiellement des transferts de technologie de l'aérospatial vers la santé, mais ceci préfigure ce qui a pu être fait dans l'urgence imposée par la période, et illustre la complémentarité des diverses échelles d'avancement de la science et de la technologie, en commençant par l'éducation et la formation des chercheurs et ingénieurs, la recherche fondamentale en laboratoire ou en université, la recherche technologique dans les instituts et dans l'industrie, le développement d'applications... L'innovation, qui est le moteur de notre industrie aérospatiale dont la France est fière, est le résultat de tous ces éléments indissociables, et elle a montré qu'elle sauvait des vies.

La crise nous a aussi amenés à revoir les forces et faiblesses de notre technologie et de notre système d'innovation. Nous devons renforcer notre résilience et notre autonomie, notamment dans les domaines qui nous permettront de répondre efficacement et rapidement aux futures crises. Les outils de télécommunications qui facilitent les échanges à distance doivent être renforcés, qu'il s'agisse des moyens de transmission ou des ressources numériques permettant la téléconsultation, le télétravail, le téléenseignement. Et l'exigence d'un monde plus respectueux de la nature, de technologies moins polluantes et protégeant le climat, s'impose

à nous avec force. L'aéronautique a déjà commencé sa mue vers l'avion bas carbone, voire zéro émission qu'on nous promet pour 2035, et je m'en réjouis. C'est aussi une autre façon, discrète mais très efficace, de protéger la santé et la vie des citoyens de la Terre. La recherche française est au cœur de cet élan : les nouvelles technologies sont l'un des principaux moteurs de l'innovation du secteur aéronautique, avec de nouveaux matériaux, la miniaturisation électronique, les procédés industriels en rupture comme la fabrication additive, les liaisons sans fil et l'internet des objets, les nouvelles motorisations de puissance....

Le spatial n'est pas en reste. Il sait répondre aux catastrophes en guidant les secours ou en accompagnant les sauveteurs par des cartes établies en quelques heures par l'ensemble des agences et opérateurs mondiaux ; il permet de prévoir ou comprendre l'évolution des épidémies en suivant l'évolution de l'environnement, de la pollution et des activités humaines. Il apporte des services aux citoyens : le lancement prochain de Konnect VHTS, projet d'Eutelsat soutenu par la France, permettra d'offrir de nouvelles capacités remarquables pour les télécommunications en zones blanches. Des nanosatellites aux constellations interconnectées, de l'exploration martienne au vol habité, tout nous pousse vers l'excellence, jusqu'à avoir pu utiliser les dernières technologies d'analyse d'images satellitaires par intelligence artificielle pour détecter le Covid-19 sur les échographies pulmonaires.

Dans cette course à l'innovation, la France et l'Europe peuvent compter sur des acteurs au meilleur niveau mondial : des agences de tout premier plan, des industriels champions dans leur domaine, des laboratoires de recherche exceptionnels et un tissu de start-up en pleine expansion. Il nous faut maintenant réinventer aussi la relation entre les pouvoirs publics et l'industrie, en faisant croître des écosystèmes d'innovation ouverts qui agrègent l'ensemble des acteurs de l'innovation.

Je voudrais pour conclure rappeler le rôle important de l'Association Aéronautique et Astronautique de France, qui contribue à cette mission essentielle de faciliter l'intérêt des jeunes et de tous les citoyens et leur compréhension pour la recherche et les développements aéronautiques et spatiaux. Dans notre société d'aujourd'hui, les sociétés savantes sont une source d'échanges scientifiques et techniques intergénération-

## PRÉFACE (SUITE)

nels, et partant, elles nous aident à préserver la mémoire vivante des technologies et des processus d'acquisition du savoir. À un moment où je défends avec force la notion de science ouverte, la 3AF est un vecteur de cette ouverture et de la diffusion du savoir. J'encourage les

étudiants, les jeunes professionnels et les ingénieurs et techniciens du secteur spatial à renforcer la 3AF de leurs idées et de leurs rêves, et je continuerai à lui apporter le soutien de mon ministère. ■

## ACTUALITÉ

# Partenariat 3AF avec Alumni-ONERA

par **Bruno Chanetz**, rédacteur en chef

Alumni-ONERA est une association voulue par la direction de l'ONERA, et ouverte à ses docteurs, post-docteurs et doctorants qui a pour objet d'entretenir le dialogue entre ses membres et l'ONERA, de favoriser les échanges à caractère professionnel entre ses membres, de promouvoir la formation doctorale à l'ONERA et de contribuer au rayonnement de l'ONERA et du secteur aérospatial et défense (ASD).

En 2019, l'ONERA comptait 291 doctorants et 25 post-doctorants. C'est donc un flux d'environ 100 docteurs qui sont diplômés chaque année et qui pour 40% d'entre eux rejoignent le secteur ASD, pour 25% celui de la recherche et de l'enseignement et pour 35% celui de l'industrie et des services hors ASD. La composition du Conseil d'administration reflète celle de l'association, dont les membres titulaires d'un doctorat sont le plus souvent ingénieurs dans le secteur ASD. À ce titre ils ont aussi vocation à adhérer à la 3AF.

Depuis sa création en 2016, un partenariat de fait avec la 3AF s'était progressivement mis en place. À partir de 2018, la Lettre 3AF avait rendu compte des tables rondes organisés avec le cabinet de stratégie Oliver Wyman : Open innovation (n°31), intelligence artificielle (n°34), cyber-sécurité (n°39) et maintenance prédictive (n°41).

Depuis début 2020, ce partenariat s'est renforcé avec l'organisation d'événements conjoints 3AF/Alumni-ONERA : table ronde à l'hôtel de l'industrie le 30 janvier dernier sur l'espace et ses enjeux (Lettre n°42). Deux autres tables rondes sont prévues en 2020 : *énigmes de l'aéronautique et éthique de la science*.

Egalement trois colloques étaient programmés en région, dont on espère qu'une pourra avoir lieu à l'automne 2020 : à Méaulte dans la Somme sur Henry Potez (voir flyer dans la Lettre n°42). Un dîner-conférence au restaurant du sénat est prévu le 2 décembre avec

le professeur Paolo Vannucci de l'université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ) qui évoquera la mécanique des cathédrales gothiques. ■

[www.alumni-onera.fr](http://www.alumni-onera.fr)

### Membres du conseil d'administration

*Bruno Chanetz, ONERA - Palaiseau, Président*  
*Alain Durand, Sopra Steria - La Défense, Secrétaire Général*  
*Philippe Castera, Dassault Systèmes - Vélizy, Trésorier*  
*Pierre-Elie Weiss, ONERA - Meudon, Vice-Président*  
*Alexis Bourgoing, ArianeGroup - Les Mureaux*  
*Vincent Chabridon, EDF - Chatou*  
*Pierre Cordesse, Air Liquide - Grenoble*  
*Carsten Döll, ONERA - Toulouse*  
*Frédéric Feyel, SafranTech - Châteaufort*  
*Bruno Mangin-Birrer, Dassault Aviation - Saint-Cloud*  
*Florin Paun, Joint European Disruptive Initiative - Issy*  
*Nicolas Rivière, ONERA - Toulouse*



*Bruno Sainjon, président de l'ONERA et vice-président de la 3AF et Michel Scheller, président d'honneur de la 3AF et ancien président de l'ONERA (4 décembre 2019)*



Stéphane Andrieux, directeur scientifique général de l'ONERA lors de sa conférence « Quand l'innovation naît de la science » au restaurant du Sénat (4 décembre 2019)



Membres d'Alumni-ONERA au restaurant du Sénat (4 décembre 2019)

**Prochains évènements 3AF/Alumni-ONERA/SEIN<sup>1</sup> à l'Hôtel de l'industrie, place Saint-Germain des Prés**

**LE MARDI 20 OCT. 2020 À 18 H 00 : TABLE RONDE ETHIQUE ET NUMERIQUE : LES ENJEUX DANS LE SECTEUR AERONAUTIQUE SPATIAL ET DEFENSE** animée par Claude Kirchner, Directeur du comité national pilote d'éthique du numérique

- 1 / Catherine Tessier, référente intégrité scientifique et éthique de la recherche de l'ONERA
- 2 / Emmanuel Bloch, directeur Responsabilité d'entreprise chez Thalès
- 3 / Pascal Traverse, responsable avion autonome chez Airbus
- 4 / Jacques Arnould, éthique des programmes et conduite des activités spatiales au CNES
- 5 / Claudie Haigneré, spationaute et ancienne ministre

1. Société d'encouragement pour l'industrie nationale

**LE LUNDI 16 NOV. 2020 À 18 H : COLLOQUE MYSTERES ET ENIGMES DE L'AERONAUTIQUE**

- 1 / L'Oiseau Blanc, première traversée de l'Atlantique... par Bernard Decré, CT Histoire 3AF
- 2 / La fin du vol MH370 : un amerrissage forcé, étude du flaperon heurtant la surface de la mer par Argiris Kamoulakos et Jean-Marc Garot, 3AF
- 3 / Recherche de débris de réacteur du vol AF66 enfouis sous les neiges de l'Inlandsis par Hubert M.J. Cantalloube, ONERA
- 4 / Points de vue croisés sur des cas de PANs observés en infrarouge par Luc Dini, Jean-Marc Andre et Joel Deschamps, CT SIGMA2 3AF

# Quand l'innovation naît de la Science

par Stéphane Andrieux, directeur scientifique général de l'ONERA, membre de l'Académie des technologies

Le point de vue défendu ici concerne une forme particulière d'innovation qui prend sa source dans la science ou plus exactement dans les connaissances et les résultats obtenus grâce à l'activité scientifique dite amont, parfois baptisée du nom de *basic sciences*. On se propose d'établir combien cette forme d'innovation est spécifique et obéit à un processus spécifique lui-aussi. Au travers d'exemples issus de l'ONERA, d'un court historique du soutien public à la science fondamentale, enfin d'une rapide analyse des dispositifs de soutien actuels en France, nous tenterons de montrer que, pour susciter cette classe d'innovation, qui a profondément changé nos vies depuis un siècle et demi, il est nécessaire de faire évoluer les formes et les critères du soutien à celle-ci. Et essentiellement de découpler ce dernier de perspectives économiques à court terme et de la dominance des études de marché ou du *minimum viable product*, essentiels pour d'autres types d'innovation, mais trop souvent exclusifs dans les analyses de risque qui président à l'attribution des aides.



*La flotte romaine brûlée par Archimède par Guilio Parigi - Palais des Offices - Florence - vers 1600*

## SCIENCE ET INNOVATION : UNE TENSION CONSTANTE

L'innovation, en Europe, mais pas uniquement, a tendance à être limitée à une définition en termes de marché, associée à une temporalité rapide. Une innovation serait ainsi exclusivement une nouvelle manière de créer de la valeur : sans validation par le marché (au sens large), l'innovation n'existerait pas <sup>1</sup>. À l'inverse la science fondamentale, on peut préférer le terme anglo-saxon de *basic sciences*, est souvent

défendue comme n'étant assujettie à aucune exigence de débouchés même à moyen terme et dédiée exclusivement à l'acquisition de connaissances et au développement d'une compréhension de de l'Homme et du monde qui l'entoure. L'innovation qui en découle serait alors le fruit d'un hasard ou d'une bienveillante sérendipité, considérée comme suffisante pour répondre au besoin sociétal de progrès au quotidien, même si ce besoin reste discuté quant à ses formes les plus consuméristes. Cependant, une enquête très récente <sup>2</sup> montre que, pour 80% des Français interrogés, le progrès c'est d'abord *Inventer de nouvelles choses (nouveaux produits, nouvelles solutions)*, alors que pour les 20% restants il permet de *Faire autrement avec ce qui existe déjà*. La science elle-même est qualifiée d'innovante dans 95% des réponses, et elle *permet de développer de nouvelles technologies utiles (pour les Français)* à 89%, avec seulement 3% de sondés qui s'estiment à l'inverse *pas du tout d'accord*.

Un rapide retour historique sur les formes de financement étatique de la recherche depuis le milieu du 19<sup>e</sup> siècle illustre parfaitement le balancement entre exigence d'applications bien identifiables et nécessité de soutien à une recherche « désintéressée » parce que débarrassée de subordination à toute forme de rentabilité. L'argument de souveraineté, voire de domination, des états par la science est lui aussi une constante depuis près de deux siècles partout dans le monde et s'y ajoutent plus récemment des aspects de compétition, voire de domination, économique.

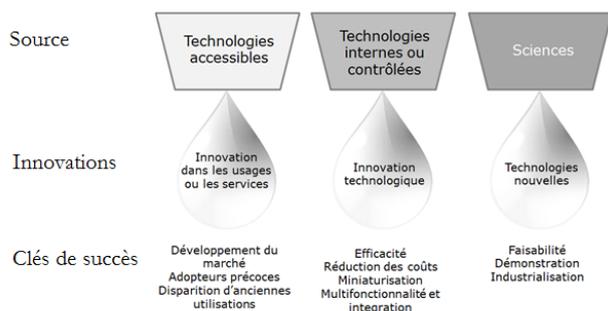
L'impact des innovations sur la société et leur processus ont fait l'objet d'une multitude de travaux d'économistes qui ont forgé des concepts démontrant le rôle essentiel de l'innovation, comme les cycles de Kondratiev (1926), la destruction créatrice de Schumpeter (1942) ou encore le résidu de Solow (1957), ce dernier identifiant la part de croissance économique qui lui est spécifiquement due. La quasi-totalité des études ignore cependant la forme d'innovation issue de la science qui va directement nous intéresser ici.

1. Blondel D, Paulré B. *L'Innovation : une force motrice complexe et ambiguë*, Synthèse de la conférence du 17 Mars 2011 de l'association Chercheurs Toujours, les Echos, 3/05/2011

2. Etude Harris Interactive *La confiance des français dans la science*, échantillon de 1008 personnes, juin 2019

## UNE FORME PARTICULIÈRE D'INNOVATION ?

En adoptant le point de vue de la source même des innovations, on peut proposer la classification suivante.



Dans le premier cas (type I), l'innovation introduit de nouveaux usages en puisant dans des technologies existantes, même s'il faut parfois les adapter. Les indicateurs de succès sont directement liés au développement d'un marché, à l'adoption par les usagers au détriment d'anciens usages, destinés à disparaître. Les innovateurs peuvent être des particuliers, la temporalité est courte, et le financement du développement est en général privé. L'adjonction de capacités de vidéo et de photo sur les smartphones en est probablement l'illustration la plus typique pour notre vie quotidienne avec la disparition d'usages comme la numérisation de document et sa transmission différée ou l'apparition de nouveaux usages comme le pense-bête en images (numéros de place de parking, références de produits en magasin, états des lieux avant travaux, etc.).

Dans le deuxième cas (type II), l'innovation se base également sur des technologies existantes, mais celles-ci sont en général maîtrisées par un industriel ou une entreprise. Il s'agit là, avec une temporalité plus grande, plus de progrès technologique que d'innovation radicale même si se manifestent des ruptures justifiant son caractère innovant. Les innovations proviennent ici d'équipes et l'objectif est de faire mieux, plus vite, souvent plus compact et toujours moins cher. L'industrie des microprocesseurs du calcul à haute performance nous en offre un exemple avec l'apparition de multi-cœurs qui ont permis de dépasser les limites physiques de l'augmentation de fréquence d'horloge des processeurs.

Le troisième type d'innovation, qui nous occupe plus particulièrement ici, trouve sa source dans le développement des connaissances et des outils scientifiques. La vérification de faisabilité, la démonstration et le prototypage, voire le début d'industrialisation dans des

marchés de niche, sont autant de facteurs ou d'indicateurs de succès mais exigent une temporalité beaucoup plus grande en général que pour les deux premiers types d'innovation. On peut véritablement parler ici de nouvelles technologies et la notion de niveau de maturité technologique (TRL ou Technology Readiness Level) prend tout son sens.

L'exemple le plus traditionnellement cité est celui du scanner médical, plus précisément de la tomo-densitométrie axiale numérique, pour laquelle l'approche théorique et l'algorithmique de traitement auraient été rendues immédiatement disponibles, dès l'instrument conçu, grâce aux travaux de recherche fondamentale du mathématicien autrichien Johann Radon, auteur en 1917 de la transformation qui porte son nom. La réalité est un peu différente et indique les éléments qui favorisent l'émergence de ce type d'innovation. Nous y reviendrons en guise de conclusion.

*Le prix Nobel de Médecine 1979 Godfrey Hounsfield & Allan Cormack pour le développement de la tomographie assistée par ordinateur*

Directeur de l'Institut de physique de l'Université Tufts aux USA, Cormack a été le premier à formuler en 1964 le problème mathématique de reconstruction d'une image bidimensionnelle à partir de l'atténuation des rayons X le long de trajets rectilignes. Il réalise bien après la publication de son article fondateur que ses travaux sont en fait l'écho de la transformation de Radon publiée en allemand dans un obscur journal.

Hounsfield, employé aux Central Research Laboratories d'EMI en Angleterre, construit le premier tomodynamomètre en utilisant un algorithme (ART) indépendant de celui de Cormack et le brevète en 1968.

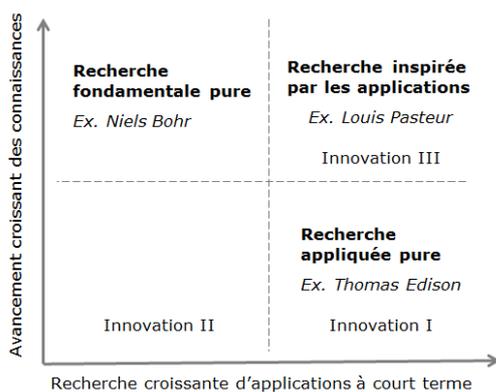
Cormack et Hounsfield ne se sont rencontrés qu'à la cérémonie de remise du prix Nobel en 1979.

Il n'en demeure pas moins qu'une fois la théorie de la transformation de Radon identifiée, et surtout de sa transformation inverse, l'assise théorique de la tomodynamométrie a non seulement été fermement établie (identifiabilité de la densité par exemple), mais a également donné lieu à des développements nouveaux et extrêmement rapides (nouveaux algorithmes, autres technologies d'illumination, etc.). Il n'est pas non plus question de nier l'intérêt de recherches amont dont les

## POINT DE VUE QUAND L'INNOVATION NAÎT DE LA SCIENCE

retombées applicatives ne sont pas explicites, voire revendiquées, comme l'illustrent les travaux de David Hilbert sur les espaces qui portent son nom ou sur la théorie spectrale, deux constructions conceptuelles qui se sont avérées prolifiques et fécondes pour les applications. David Hilbert déclarait à propos de la seconde <sup>3</sup> : *I was developing my theory of infinitely many variables having in mind merely mathematical interests, and even called it « spectral analysis », without any idea that it would later find applications in the real spectra of physics.*

Le quadrant de Pasteur est une autre représentation des relations entre l'innovation et la science ; il met en évidence l'importance relative de la recherche de la connaissance ou de la production d'applications dans l'activité de recherche. Chaque quadrant est incarné par un scientifique du 20<sup>e</sup> siècle.



Le quadrant de Pasteur, adapté d'après D.E. Stokes <sup>4</sup>

On peut y placer aisément les trois types d'innovation proposés, l'innovation issue de la science (type III) occupant le quadrant de Pasteur.

## UNE PETITE HISTOIRE DU FINANCEMENT DES BASIC SCIENCES

Si le soutien de la science fondamentale par l'État peut paraître aujourd'hui naturel en France (bien que jamais suffisant), les dispositifs et même la politique générale des différents gouvernements dans le monde a pu varier assez largement à la fois géographiquement et dans le temps. L'organisation de la recherche s'est en effet partout appuyée d'abord et majoritairement sur les laboratoires des universités <sup>5</sup>, considérées comme autonomes sur ce domaine.

En France au début du 20<sup>e</sup> siècle, les conditions de travail notamment à l'École normale supérieure dans le laboratoire de Pierre et Marie Curie, donnent une image très négative de la science française. Le mathématicien Emile Borel, également député de l'Aveyron, propose et obtient en 1925 de prélever un sou (5 centimes) sur la taxe d'apprentissage afin de financer les laboratoires de recherche. En 1934, la taxe Borel représente la part principale du petit budget de la recherche française (40 MF, qui financent également les collections du Muséum national d'histoire naturelle par exemple). En effet, sur les 13,6 millions consacrés à la recherche proprement dite, le Sou des Laboratoires atteint 7,3 millions, soit vingt-quatre fois plus que pour la petite Caisse de recherches scientifiques qui vivote alors depuis le début du siècle. Dans cette dynamique, la caisse nationale de la recherche scientifique (la CNRS) est créée en 1935. Cependant la logique exclusive de caisse de financement, on dirait agence de moyens aujourd'hui, est abandonnée en 1938 au profit de la création d'un centre de recherche scientifique appliquée. Doté de ressources propres, le CNRSA est destiné à pallier les graves insuffisances de l'Office national des recherches scientifiques et industrielles et des inventions (ONRSI). Un an plus tard ce centre est lui-même absorbé par la création du Centre national de la recherche scientifique <sup>6</sup>, tel que nous le connaissons maintenant. Il est important de remarquer que les attendus du décret de création d'octobre 1939

3. Steen, L. A. *Highlights in the History of Spectral Theory*, *The American Mathematical Monthly*, 80, 4, 1973

4. Stokes D.E, *Pasteur's quadrant, basic science and technological innovation*, *Brookings Institution Press*, 1997. Une présentation plus sophistiquée sous la forme d'un cube a été proposée récemment Tijssen R. J.W. *Anatomy of use-inspired researchers: From Pasteur's Quadrant to Pasteur's Cube model*, *Research Policy*, 47, 2018

5. Avec de grandes exceptions comme l'industrie chimique en Europe avec notamment Solvay, ses « conseils Solvay » et son institut international de physique institué en 1912, et aux USA : IBM née en 1911 (sous le nom de *Computing Tabulating Recording Company* jusqu'en 1924), ou la *Western Electric Company* suivie par l'*American Telephone and Telegraph* avec ses *Bell Labs*. Plusieurs prix Nobel en sont issus.

6. Picard J.F., *La création du CNRS*, *La revue pour l'histoire du CNRS*, 1, 1999. <http://journals.openedition.org/histoire-cnrs/485>

précisent qu'il s'agit « d'effectuer des recherches à la demande des pouvoirs publics » mais aussi et prioritairement de « coordonner l'activité des laboratoires en vue de tirer un rendement plus élevé de la recherche scientifique ».

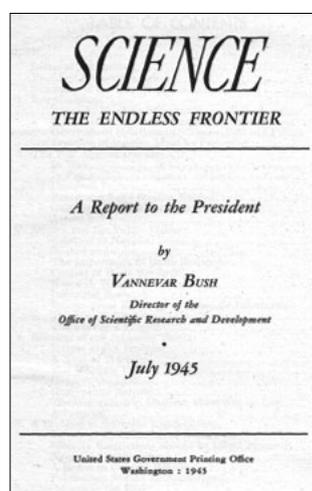
Le débat entre recherche fondamentale et applications reste actif comme l'illustre la déclaration de George Tessier, successeur de Frédéric Joliot à la tête du CNRS, en 1946 : *Un reproche souvent fait aux scientifiques français est d'avoir résolument ignoré la science appliquée, mais il ne faudrait pas que, tombant d'un excès dans l'autre, on sacrifie au bénéfice de la recherche technique la recherche pure qui elle seule prépare l'avenir ! Il faut sans aucun doute développer la recherche technique redoutablement déficiente chez nous, mais il ne faut pas que son développement ait priorité sur celui de la recherche scientifique. Il ne faut pas enfin, que le contrôle nécessaire de ces activités de recherche soit abandonné aux financiers ou aux économistes.*

Dès le début des années quarante, les grands ministères techniques ont souhaité se doter de leurs propres moyens de recherche, en opposition au CNRS. Ainsi naissent l'Institut national d'hygiène, qui deviendra l'INSERM, l'Office de recherches scientifiques, futur ORSTOM, l'Institut de recherches sidérurgiques (IRSID) et l'Institut français des pétroles (IFP), enfin le CNET pour les télécommunications, premier organisme scientifique à statut interministériel. Après la libération, c'est au tour de l'ONERA, création pendant concertée avec le CNRS, de l'Institut national de la recherche agronomique (INRA), enfin du CEA.

Si beaucoup d'initiatives de soutien, ou de demandes des États envers les scientifiques, sont nées après les conflits armés, avec la volonté de combler des écarts scientifiques et techniques perçus durant la confrontation, tant vis-à-vis de l'ennemi que de l'allié d'ailleurs et à cet égard la création de l'ONERA en France est une illustration frappante, le souci de mobiliser la science en temps de paix n'est pas absent des réflexions politiques. Ainsi en 1920, le ministre de l'industrie et du commerce Étienne Clémentel déclare que : *la science [devrait] jouer dans les luttes économiques du temps de paix le même rôle prépondérant qu'elle [venait de jouer] pendant la guerre... »,*

c'est-à-dire, « assurer une liaison efficace entre les laboratoires et les usines en vue de dresser des programmes de recherches d'intérêt public.

De façon moins délibérément marquée par les motivations économiques mais avec des conséquences majeures aux États-Unis, on retrouve cette vision lorsque, dès novembre 1944, le président Franklin Roosevelt demande à Vannevar Bush, alors directeur du bureau de la recherche scientifique et du développement en temps de guerre (OSRD), un rapport sur la science en temps de paix sur la base de quatre questions<sup>7</sup>. Bush, bien que titulaire d'un PhD prestigieux (MIT et Harvard) se vit avant tout comme un ingénieur<sup>8</sup>.



*There is no reason why the lessons to be found [during the war] cannot be profitably employed in times of peace. [it] should be used in the days of peace ahead for the improvement of the national health, the creation of new enterprises bringing new jobs, and the betterment of the national standard of living.*

*I would like to have your recommendations on four major points:*

*First: What can be done, consistent with military security, ..., to make known to the world as soon as possible the contributions which have been made during our war effort to scientific knowledge?*

*Second: With particular reference to the war of science against disease, what can be done now to organize a program for continuing in the future the work which has been done in medicine and related sciences?*

7. Il semble que c'est Vannevar Bush lui-même qui aurait écrit la lettre de commandite de Roosevelt lui étant destinée. Zachary G. Endeless frontier: Vannevar Bush, engineer of the American century. New York: The Free Press; 1997. p. 91.

8. Il est aussi l'auteur d'un article, *As We May Think*, dans *The Atlantic Monthly* de juillet 1945, qui préfigure l'esprit et la forme du World Wide Web, avec une notion de lien hypertexte, bien que basée sur la technologie des microfilms et d'un appareil mythique qu'il baptise Memex. <https://www.theatlantic.com/magazine/archive/1945/07/as-we-may-think/303881/>

## POINT DE VUE QUAND L'INNOVATION NAÎT DE LA SCIENCE

*Third: What can the Government do now and in the future to aid research activities by public and private organizations? The proper roles of public and of private research, and their interrelation, should be carefully considered.*

*Fourth: Can an effective program be proposed for discovering and developing scientific talent in American youth so that the continuing future of scientific research in this country may be assured on a level comparable to what has been done during the war?*

Le rapport de Vannevar Bush, *SCIENCE, the endless frontier*, paraît en juillet 1945, après la mort de son commanditaire le 15 avril ; il donnera naissance à la *National Science Foundation (NSF)* qui financera de nombreuses thématiques scientifiques aux États-Unis, et aura une influence profonde sur les politiques scientifiques nationales dans le monde. Sa création sera accompagnée d'un principe de gouvernance indépendant du pouvoir politique incarné dans le *National Science Board*, exprimant sa conviction que « *freedom of research must be preserved* ».

En 1960, l'OCDE définit et classe la recherche en trois catégories, *Basic research – Applied research – Experimental development*, et en 1970 paraît en Europe le Manuel de Frascati, référence méthodologique internationale pour les études statistiques des activités de recherche. C'est dans le même esprit que le programme H2020 de 2014, issu de processus de Ljubljana et de la création de l'espace européen de la recherche, est structuré en trois piliers *Excellence scientifique – Primauté industrielle – Défis sociétaux* et que naît l'*European Research Council (ERC)* dédié exclusivement au financement d'une recherche à la frontière de la connaissance.

Ce développement et cette structuration du soutien des états à la science est cependant loin de faire l'unanimité<sup>9</sup>. En 1967, Ronald Reagan alors gouverneur de Californie réduit de 64 M\$ le budget des universités de cet état au motif que : *Funding intellectual curiosity is unnecessary*. Une position dont on peut retrouver l'écho dans un livre blanc sur les sciences et technologies paru au Royaume-Uni en 1993 dans lequel on peut lire : *The*

*Government does not believe that it is good enough to trust to the automatic emergence of applicable results (from basic research) which the industry uses*. La conception que la science en elle-même ne conduit pas naturellement à des découvertes, des ruptures ou des innovations utiles et que c'est à d'autres mécanismes et d'autres individus au sein de la société qu'il faut attribuer les succès pratiques de la science, continue d'avoir ses apologistes. C'est le cas par exemple de Matt Ridley dans l'essai *the Myth of basic science*, paru dans le *Wall Street Journal* en octobre 2015 ou de critiques du modèle linéaire de Vannevar Bush estimant que l'admiration qui lui est portée par les milieux scientifiques américains repose de fait sur une ignorance de l'échec de ses recommandations à Roosevelt en 1945<sup>10</sup>.

Pour revenir en France et dans la juste après-guerre, la création de l'ONERA s'inscrit très exactement dans la triple perspective de l'appui à l'industrie, de lien avec la science et d'ambition de souveraineté retrouvée. Le ministre de l'air Charles Tillon déclare en 1945<sup>11</sup> lors de la création de la société d'étude et de recherche aéronautiques, qui deviendra rapidement l'O.N.E.R.A : *Jusqu'à présent en France, on avait un peu oublié le rapport étroit qui doit lier la recherche scientifique et la technique. Or c'est dans les pays où la science pure est la plus développée que les constructions diverses sont les plus originales et les plus profitables à tous. Notre société nationale d'études et de recherche se propose de donner aux chercheurs les moyens matériels puissants qui leur sont nécessaires et d'associer, pour le bien du pays, la science pure à la recherche industrielle*.

Aujourd'hui et dans leurs acceptions générales, Recherche et Innovation sont financées en France par des agences différentes : ANR d'un côté et BPI de l'autre. Les régions et les départements (dans une moindre mesure actuellement), financent également la recherche et l'innovation. Selon le MESRI, de 2015 à 2017, les collectivités territoriales ont affecté en moyenne 1,12 milliard d'euros par an aux opérations de recherche et transfert de technologie (R&T). Cet agrégat recouvre l'ensemble des financements ayant contribué à développer les activités de recherche et développement des universités

9. Déjà à la parution de *Science, the new frontier*, le directeur du budget de l'état américain Harold Smith avait suggéré de le renommer : *Science, the never-ending expense*.

10. cf. le chapitre : *Vannevar Bush and the Myth of Creation* du livre de Daniel Greenberg *Science, Money, and Politics: Political Triumph and Ethical Erosion*, University of Chicago Press, 2001

11. *Aviation Française*, numéro 23 du 11 juillet 1945

et des organismes publics, à soutenir l'innovation et la recherche dans les entreprises, à favoriser les transferts de technologie, à promouvoir les résultats de la recherche et à développer la culture scientifique et technique<sup>12</sup>. Une grande partie des financements français reste cependant confiée de façon collégiale à l'Union européenne, avec une contribution annuelle de la France de l'ordre de 6 milliards d'euros, un taux de retour de 0,7<sup>13</sup>.

### QUELQUES EXEMPLES À L'ONERA

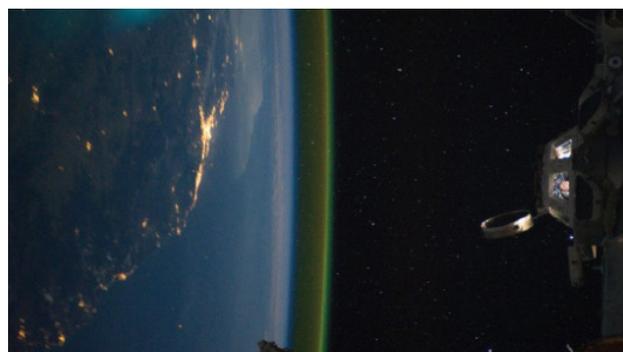
Par ses missions et la structure des compétences développées depuis sa création, l'ONERA a pu faire naître des innovations de type III. Nous en donnons ici quelques exemples.

#### *Nouveau moyen de vision nocturne*

En 1868 Anders Jonas Ångström, un des fondateurs de la spectroscopie ayant catalogué des raies de Fraunhofer du Soleil, fait paraître un ouvrage en français<sup>14</sup> sur le spectre solaire et met en évidence le rayonnement *nigthglow* ou *airglow*, mais il faut attendre la fin des années vingt pour que ce phénomène soit différencié des aurores boréales. Le *nigthglow*<sup>15</sup> provient de la recombinaison des molécules d'oxygène, dissociées pendant la journée par le rayonnement ultraviolet émis par le soleil. La recombinaison avec d'autres éléments et particulièrement la formation du radical libre hydroxyle OH<sup>o</sup> provoque à son tour par chimioluminescence un rayonnement dans le proche infra-rouge. Ce rayonnement est variable dans le temps et dans l'espace au cours de la nuit, du fait des temps de réactions chimiques et de la disponibilité des éléments chimiques ; sa source est localisée à environ 85 km d'altitude. Ces rayonnements sont étudiés par les observatoires astronomiques essentiellement pour pouvoir en soustraire le spectre « polluant » les observations.

Dans le cadre d'une action financée par la DGA, les ingénieurs-chercheurs de l'ONERA ont étudié la possibilité d'exploiter ce rayonnement pour produire de nouvelles possibilités de vision nocturne exploitant sa

réflexion par les objets ou les corps animés. L'existence d'un rayonnement comme le *nigthglow* permettait d'espérer disposer d'une nouvelle capacité d'observation nocturne en extérieur alors qu'aucun éclairage naturel n'était présent (nuit sans lune, ciel nuageux, jusqu'au niveau 5). Il a cependant fallu comprendre et caractériser finement ce rayonnement et estimer son intensité, à la fois à la surface du globe et tout au long de la nuit, pour s'assurer que les conditions d'une captation d'image étaient réunies. Puis construire un matériel, adapté à une longueur d'onde bien précise, suffisamment léger et maniable pour que des applications pussent être envisagées. Ces résultats sont désormais acquis et de manière réciproque l'examen des perturbations de la zone émettrice pourrait permettre de signer des activités au sol, qu'elles soient d'origine anthropique ou non.



*Le phénomène nightglow photographié depuis la station spatiale internationale 408 km au-dessus des lumières de Brisbane, Australie*



*Scène mesurée dans la bande spectrale 1,4 - 1,8 µm par une nuit sans lune*

12. <http://www.senat.fr/rap/a18-148-5/a18-148-510.html>

13. [https://publication.enseignementsup-recherche.gouv.fr/eestr/FR/T319/la\\_france\\_dans\\_l\\_espace\\_europeen\\_de\\_la\\_recherche\\_via\\_sa\\_participation\\_a\\_horizon\\_2020/#ILL\\_EESR12\\_R\\_28\\_01](https://publication.enseignementsup-recherche.gouv.fr/eestr/FR/T319/la_france_dans_l_espace_europeen_de_la_recherche_via_sa_participation_a_horizon_2020/#ILL_EESR12_R_28_01)

14. Ångström A.J., *Recherches sur le spectre solaire, Spectre normal du soleil. Atlas, contenant les longueurs d'onde des raies Frauenhofériennes données en 1/10000000 de millimètre*, Upsala, 1868

15. Christensen L. L., Noll S., Horálek P. *Light Phenomena over the ESO Observatories I: Airglow*, ESO Messenger, 163, 2016

## POINT DE VUE QUAND L'INNOVATION NAÎT DE LA SCIENCE

### Réduction du bruit des rotors d'hélicoptères

Dès 1994, la recherche d'un design de pale d'hélicoptère acoustiquement optimisée, sans dégradation de performances a fait l'objet d'un contrat DGA baptisé ERATO. L'idée est de revenir au mécanisme à la base de la source du bruit (mais aussi des efforts sur les pales et sur l'aérodynamique d'ensemble) : l'interaction pale-vortex (*Blade Vortex Interaction* ou *BVI*) et tout particulièrement l'interaction entre une pale et les tourbillons engendrés par celle qui la précède. Depuis les années 70, la compréhension du phénomène s'était considérablement affinée mais les solutions de traitement du problème d'interaction par modification de la géométrie des extrémités de pales s'avéraient décevantes, non pas en terme de réduction de bruit mais sur le plan de l'efficacité aérodynamique globale du rotor. De nombreux centres de recherche, dont l'ONERA, se tournaient dans les années 90 vers le contrôle actif du rotor ou des pales (commande de pas (HHC), commande individuelle des pales (IBC) et les concepts de commande intelligente du rotor<sup>16</sup>. Le retour aux fondamentaux de l'interaction pale-vortex et l'idée de se départir des géométries rectilignes des pales constitue bien avec la proposition du design Erato une innovation de type III, distincte des approches privilégiées jusqu'ici que l'on peut classer dans le type II. L'idée novatrice est d'introduire une singularité angulaire dans le dessin de la pale afin que le coin induise un tourbillon plus complexe et moins concentré par rapport au cas d'une lame droite, ce dessin étant par ailleurs optimisé pour assurer une excellente efficacité aérodynamique<sup>17</sup>.

Une validation de l'idée est alors conduite aussi bien sur des modèles numériques, qu'en soufflerie avec le DLR, puis en 2001, un brevet est déposé avec Eurocopter. Les essais en vol de 2010 confirment les performances acoustiques (de l'ordre de 4 dB) et l'absence de dégradation des performances aérodynamiques, conduisant Airbus à la pale *Blue Edge*<sup>TM</sup>, et à l'équipement avec celle-ci du modèle H160.



*Pale Blue Edge™ utilisée par Eurocopter*

Désormais, ce concept devrait être poussé plus loin pour devenir adaptatif à l'aide de surfaces mobiles couplées à des actionneurs piézoélectriques, ...c'est-à-dire en revenant à l'approche par contrôle, mais sur des concepts géométriques nouveaux.

Ce concept a été repris et adapté<sup>18</sup> pour des objectifs similaires pour le premier étage d'un CROR (Counter Rotative Open Rotor) avec le dépôt d'un brevet ONERA-Safran.

### *Lidar pour la détection de gaz à distance*

Peu de temps après l'invention du laser, la découverte des propriétés non linéaires de nombreux matériaux (cristaux essentiellement) permettant l'interaction de la lumière avec la lumière<sup>19</sup>, a conduit à s'intéresser à la conversion de longueurs d'onde (génération d'harmoniques, fluorescence paramétrique) ou aux effets de variation d'indices entraînant l'auto-focalisation ou l'auto-défocalisation d'un faisceau. Ainsi sont nées les sources paramétriques optiques qui permettent d'engendrer efficacement un rayonnement cohérent à une nouvelle fréquence à partir d'un faisceau laser incident. Cette conversion de fréquence permet de couvrir des gammes spectrales mal ou non couvertes par émission laser directe.

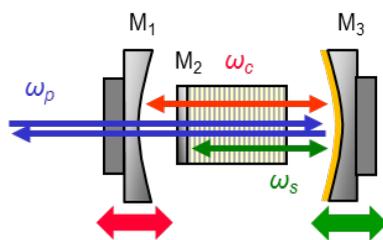
16. Voir par exemple l'article de synthèse DLR, ONERA, NASA : Yu Y., Gmelin B., Splettstoesser W. Phillippe J., Prieur J., Brooks T., *Reduction of helicopter blade vortex interaction noise by active control technology*, *Prog. Aerospace Sci.* 33, 1997

17. <https://www.youtube.com/watch?v=2t3uCDJhce8>

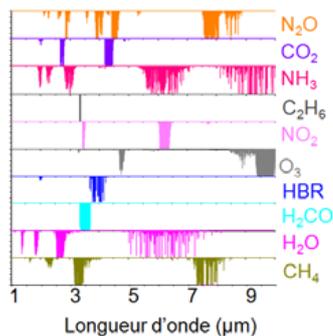
18. Delattre G., Falissard, Vion L. Jacquin L. *Open rotor interaction noise reduction through front rotor wake modification*, *International Journal of Aeroacoustics* 15, 1-2, 2016

19. Giordmaine J. A. *Mixing of Light Beams in Crystals*, *Physical Review Letters* 8(1), 1962, Giordmaine, J. A. *The Interaction of Light with Light*, *Scientific American*, vol. 210, no. 4, 1964

Si les principes de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement des photons fixent des conditions aux conversions possibles (la fréquence du faisceau de pompe est la somme de la fréquence de signal  $\omega_s$  et de la fréquence complémentaire  $\omega_c$ ), ils ne déterminent pas pour autant totalement les deux fréquences produites. Il est alors possible d'accorder l'oscillateur (OPO ou Oscillateur Paramétrique Optique) mais surtout d'augmenter le facteur de conversion par la multiplication des passages dans le cristal par résonance pour obtenir les fréquences souhaitées pour une application donnée. Dans la gamme infrarouge, l'ONERA a mis au point et breveté un procédé particulièrement efficace énergétiquement en insérant un cristal non linéaire dans un résonateur optique à double cavité pour filtrer finement, par effet Vernier <sup>20</sup>, et ainsi sélectionner la paire de longueurs d'onde émises. L'ONERA s'est d'abord focalisé sur le développement de techniques de spectroscopie non linéaire pour la caractérisation des écoulements réactifs de la combustion ou non réactifs en soufflerie.



NesCOPO (Nested Cavity doubly resonant OPO)



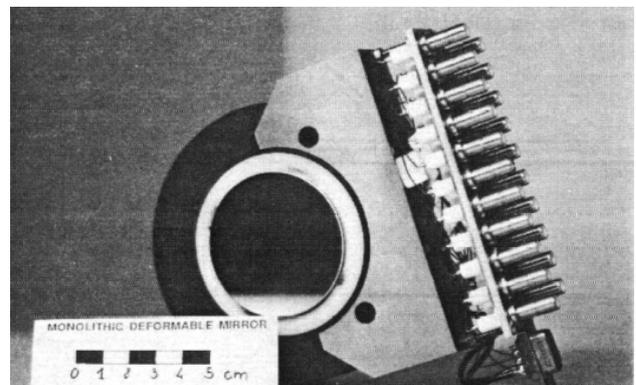
Signature en longueur d'ondes ( $\mu\text{m}$ ) de différents gaz

L'innovation de type III prend ici sa source dans l'étude de la rétrodiffusion d'aérosols atmosphériques et de molécules excités par leur éclairage à distance par une

lidar basé sur un OPO à fréquence bien précise et basée sur la signature de ces gaz, afin de les télédétecter <sup>21</sup>. Des partenariats de transfert avec diverses sociétés ont conduit à la commercialisation de systèmes de caméras hyperspectrales dédiées à des applications de défense et d'analyse environnementale.

*Imagerie et traitements ophtalmiques via l'optique adaptative*

L'observation astronomique depuis le sol se trouve confrontée depuis ses débuts il y a plusieurs siècles à la turbulence atmosphérique qui impose une limite sévère à la résolution angulaire qu'il est possible d'obtenir avec les télescopes au sol, indépendamment de leur ouverture.



Miroir monolithique déformable de l'ONERA basé sur des céramiques piézoélectriques

En 1953, naît l'idée de corriger les aberrations de turbulence atmosphérique en temps réel, mais ce n'est que vers la fin des années 70 que les premières mises en œuvre apparaissent. L'ONERA s'y intéresse à partir de cette date et propose vers la fin des années 80 un système complet basé sur de nombreux brevets. Depuis les équipes de l'ONERA ont poursuivi les recherches et les développements, et ont mis au point des technologies présentes dans tous les grands télescopes et dans tous les projets de tels instruments.

Par la précision de l'observation ainsi retrouvée, ces techniques ont permis de nombreuses découvertes en astronomie, tout dernièrement lors de la recherche d'exoplanètes <sup>22</sup>. Ces avancées et ces innovations trouvent

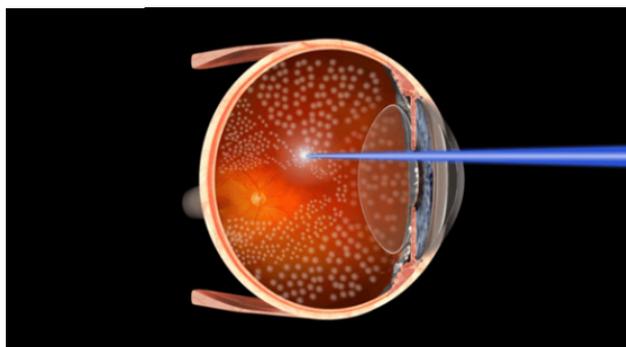
20. Hardy B., Raybaut M., Dherbecourt J. B., Melkonian J. M., Godard A., Mohamed A. K.; Lefebvre M, Vernier frequency sampling: a new tuning approach in spectroscopy—application to multi-wavelength integrated path DIAL, *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 107, 3, 2012.

21. Prix Branly de la SEE 2012 : Les oscillateurs paramétriques optiques impulsionsnels maîtrise du spectre émis et applications à la détection de gaz locale ou à distance Myriam Raybaut (ONERA)

## POINT DE VUE QUAND L'INNOVATION NAÎT DE LA SCIENCE

aujourd'hui également leur application et leur développement futur aussi bien dans les télécommunications optiques en espace libre (très haut débit entre satellites et la terre, liaison maritime) que pour des applications liées à l'arme laser. L'ensemble de ces innovations se place dans la catégorie II définie plus haut.

En revanche, les applications en ophtalmologie relèvent clairement de l'innovation de type III. En réalisant que la traversée des différentes couches de l'œil par une onde lumineuse est perturbée de manière similaire, pour les ophtalmoscopes ou les traitements par laser, l'ONERA et l'Hôpital des Quinze-Vingts à Paris ont tenté d'appliquer la correction optique adaptative aux aberrations oculaires. Des progrès spectaculaires ont ainsi été enregistrés tant dans l'imagerie de la rétine et de sa vascularisation (avec des résolutions dix fois supérieures aux techniques classiques), que dans le suivi des traitements ou dans les traitements eux-mêmes par laser comme la photocoagulation.

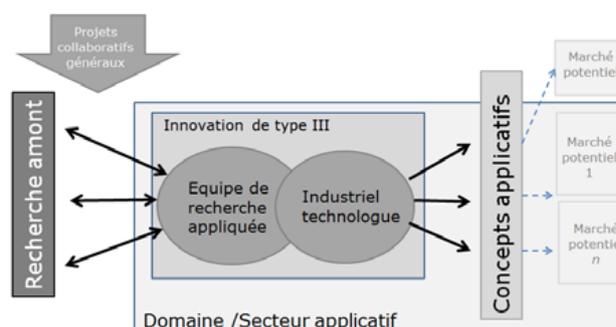


Principe de la photocoagulation par laser

### COMMENT SUSCITER ET SOUTENIR AUJOURD'HUI L'INNOVATION NAISSANT DE LA SCIENCE ?

Après ce bref aperçu historique des financements et de l'organisation de la science, après quelques exemples d'innovations nées de la science à l'ONERA et l'analyse de l'apparition du scanner médical, mais on pourrait en donner de nombreux autres, on peut tenter de tirer quelques enseignements. Le facteur commun à l'innovation de type III semble résider dans l'articulation entre trois acteurs. Un industriel tout d'abord qui croit aux potentialités d'une idée, s'y engage, mais admet qu'un laps de temps significatif est nécessaire avant

qu'une application concrète ne se dessine et sans idée de diffusion autre que celle d'un marché de niche éventuel. Une équipe d'ingénieurs-chercheurs porteurs de l'idée initiale, bien insérée dans la communauté scientifique et spécialisée dans un domaine finalisé, qui en construit la faisabilité et la démonstration. Enfin des liens forts, pour cette équipe, avec la recherche académique amont pour y puiser les résultats et les connaissances mais aussi les « traduire » dans le contexte particulier de l'innovation développée.



Le modèle de l'innovation de type III

Dès lors que l'on accepte cette hypothèse, on peut s'interroger sur les conditions favorisant, voire tout simplement permettant, l'émergence d'innovations de type III. La première question concerne évidemment les processus liés à la naissance de l'idée et à sa présentation à un industriel susceptible de s'y intéresser et parfois même de la faire évoluer. Il s'agit alors banalement de favoriser une culture de recherche exploratoire, d'innovation et d'acceptation de prise de risque dans les organismes de recherche appliquée, mais au-delà, de conserver un souci de culture et de curiosité scientifique, dans un contexte bien souvent contraint par les projets de court terme, plus incrémentaux mais à débouchés bien identifiés et plus certains.

La seconde question est celle du financement et du soutien public à ces démarches d'innovation. Force est de constater que malgré un effort extrêmement important consenti par les structures publiques en France (État et Régions, organismes dédiés), il n'existe pas vraiment de mécanismes ou d'enveloppes de financements adaptés aux spécificités de l'innovation de type III. Il est significatif que les études ou rapports sur les aides et investissements dans l'innovation sont pratiquement exclusi-

22. voir l'article *Optique adaptative et déconvolution*. T. Fusco, dans la rubrique *Science & Technologie 3AF* (novembre 2018)

23. [https://www.youtube.com/watch?v=-\\_vt10NeBh4](https://www.youtube.com/watch?v=-_vt10NeBh4)

Critère A	Critère B	Critère C	Critère D
Issues d'un laboratoire de recherche (public ou privé) et/ou s'appuyant sur une équipe/gouvernance en lien fort avec le monde scientifique (profil scientifique/technologie clé)	Qui présentent de fortes barrières à l'entrée, matérialisées par des verrous technologiques difficiles à lever	Qui constituent un avantage fortement différenciateur par rapport à la concurrence	Caractérisées par un <i>go-to-market</i> (développement, industrialisation, commercialisation) long/ complexe donc probablement capitalistique

*Critères portant sur les technologies permettant un soutien de BPI-France dans le domaine des DeepTech* <sup>24</sup>

vement centrés sur les innovations de type I et II, bien que non exprimés sous cette typologie <sup>25</sup>. Le domaine récent des DeepTech n'échappe pas à cette constatation bien que les attendus laisseraient pourtant entrevoir un espoir puisque ce secteur veut rassembler des start-ups qui « proposent des produits ou des services sur la base d'innovations de rupture » (critère A dans le tableau ci-dessus).

Tout comme pour les 13 sociétés d'accélération du transfert de technologies (SATT) dont le pilotage du programme national a été repris par BPI-France, l'ensemble des acteurs est centré sur le financement et la création de start-ups <sup>26</sup>, et cherche à en analyser puis dépasser les freins organisationnels ou financiers, invariablement dans la perspective du développement d'un marché.

De même l'objectif du Conseil national de l'industrie, rénové en novembre 2017, s'inscrit-il dans une vision à l'aval de l'innovation issue de la science. Le Premier ministre déclare <sup>27</sup> ainsi : *Parce que l'industrie est ... source d'innovation, d'emploi, de souveraineté et de cohésion de nos territoires, nous avons engagé, une stratégie déterminée de reconquête industrielle autour du Conseil national de l'industrie et de ses 18 filières industrielles* et fixe notamment quatre objectifs à l'action du CNI : Accélérer la transformation numérique de l'industrie ; Positionner, grâce à

l'innovation, nos filières industrielles sur les marchés de demain ; Investir dans les compétences et accroître l'attractivité de l'industrie ; Accélérer la croissance des PME et ETI industrielles.

L'Agence nationale de la recherche <sup>28</sup> peut sembler l'organisme le plus adapté aux besoins de soutien à l'innovation de type III puisqu'elle a reçu la mission de : *financer et promouvoir le développement des recherches fondamentales et finalisées, l'innovation technique et le transfert de technologies ainsi que le partenariat entre le secteur public et le secteur privé*. Deux classes d'instruments qu'elle met en œuvre nous intéressent ici. D'abord, au sein de la composante Recherche et Innovation, l'appel à projet générique (AAPG annuel) finance des projets de recherche collaborative entre entités publiques et privées : *pouvant présenter une ouverture vers le monde de l'entreprise* (PRCE).

Cependant, les projets soutenus n'entrent pas véritablement dans la catégorie associée aux innovations de type III, d'une part du fait de leur trop courte durée, d'autre part car : *ils visent à atteindre en commun des résultats de recherche qui seront profitables aux deux parties, en permettant aux laboratoires publics ou privés d'établissements de recherche ... d'aborder de nouvelles questions de recherche...et en permettant aux entreprises d'accéder à la recherche publique de meilleur niveau afin d'améliorer à*

24. <https://www.bpifrance.fr/A-la-une/Dossiers/Generation-Deeptech-le-futur-de-l-innovation/Une-infographie-pour-comprendre-la-deeptech-45964>

25. « Pendant longtemps l'innovation a été la conséquence d'avancées scientifiques ou technologiques. Si cette dimension est presque toujours présente, on a désormais vu apparaître, avec le très fort développement d'Internet, des télécommunications rapides, des smartphones et de nouvelles méthodes d'exploitation des données, des innovations d'usage très disruptives ». Lewiner et al., *Rapport sur les aides à l'innovation*, 2017-M-075-01 mars 2018

26. Cf. par exemples deux documents récents *The Dawn of the Deep Tech Ecosystem*, Boston Consulting Group & Hello Tomorrow, 03/19 Rev. 7/19 2019 et Lewiner et al. *Rapport sur les aides à l'innovation*, 2017-M-075-01 mars 2018

27. *Notre ambition pour l'industrie*, Conseil national de l'industrie, 22 novembre 2018

28. ANR Plan d'action 2020, 25 juillet 2019, rev. septembre 2019 <https://anr.fr/fileadmin/documents/2019/Plan-d-action-ANR-2020.pdf>

## POINT DE VUE QUAND L'INNOVATION NAÎT DE LA SCIENCE

différents termes leur capacité d'innovation. Ils ne visent donc pas à la production collaborative de celle-ci.

La seconde composante de l'organisation des appels d'offre de l'ANR, l'Impact économique de la recherche et compétitivité (IERC) : *a pour objet de stimuler le partenariat avec les entreprises et le transfert des résultats de la recherche publique vers le monde économique. Les actions proposées renforcent les coopérations et les partenariats et permettent la valorisation des résultats de la recherche.* On y distingue :

- Le programme *Chaires industrielles* ayant vocation à « mobiliser des moyens pour consolider et renforcer la compétitivité des entreprises françaises ;
- Le programme de soutien à la création de laboratoires communs (LabCom) entre recherche publique et PME ou ETI, *le transfert des résultats ou du savoir-faire de la recherche publique vers ce type d'entreprises peut être un facteur important d'innovation, de compétitivité et de création d'emplois ;*
- Financés par l'Agence d'innovation de défense (AID), les programmes *Astrid* (Accompagnement spécifique des travaux de recherches et d'innovation défense) qui visent à *stimuler l'ouverture de voies nouvelles de recherches sur des thèmes d'intérêt duaux (applications civiles et militaires). Il s'agit d'explorer des points durs scientifiques ou techniques et de favoriser les ruptures technologiques potentielles* » et *Astrid Maturation*, destiné à « accompagner la valorisation des travaux scientifiques accomplis dans des dispositifs de soutien à la recherche financés par l'AID.

Là-encore, dans aucun de ces dispositifs, n'existe à proprement parler de soutien à la naissance et au développement de l'innovation de type III. Il s'agit plutôt d'un soutien aux recherches partagées, à l'accès aux compétences et à la valorisation des résultats scientifiques de la recherche publique.

Comme on l'a vu dans l'évolution du financement de la recherche et de l'innovation, l'intervention publique se justifie s'il s'agit de financer, dans des secteurs de souve-

raineté ou de progrès sociétal, le risque qu'aucun acteur privé ne peut accepter raisonnablement de prendre entièrement. La question de la décision et des critères qui fondent celle-ci est bien entendu cruciale et on vient de le voir, l'innovation issue de la science n'entre réellement dans aucun des cadres actuels puisque deux particularités essentielles de l'innovation de type III ne sont pas prises en considération : la temporalité longue et l'absence d'un marché clairement identifié. Ces deux particularités augmentent bien entendu l'incertitude et rendent plus complexe la prise de risque mais aussi le suivi (et la continuité), de l'action publique. Une forme de financement de cette innovation pourrait se trouver au sein du mécanisme des bourses *Proof of Concept* de l'*European Research Council* (ERC), qui peut compléter une précédente bourse *Advanced* ou *Starting Grant*, cependant ni la durée de 18 mois, ni l'objectif recherché ne correspondent totalement aux innovations de type III <sup>29</sup>.

### EN GUISE DE CONCLUSION

Cela appelle à une forme de financement et de soutien de l'État plus spécifique, basée sur l'alliance d'équipes de recherche et d'industriels rassemblées sur une idée et non sur un tour de table financier induit par l'identification d'un marché ou la maturation d'une technologie en direction de celui-ci. Il n'est pas impensable d'imaginer prélever une enveloppe sur les structures de financement actuelles, probablement à l'ANR, qui soit consacrée à l'innovation issue de la science <sup>30</sup>. Il serait cependant nécessaire de l'associer à des mécanismes gérant l'identification de l'idée initiale et l'engagement de la structure destinée à sa mise en œuvre, qu'il s'agisse d'un industriel ou d'un opérateur public, le temps long admettant les réorientations, ainsi que la construction d'équipes communes (immersions par exemple). La question de la propriété intellectuelle doit également être abordée de façon spécifique en distinguant les brevets, les savoir-faire et la nécessaire diffusion des résultats scientifiques, du fait de l'existence d'une part de financements publics mais aussi et surtout de l'indispensable validation par

29. L'objectif est de ...permettre aux idées financées par l'ERC d'être amenées à un stade de pré-démonstration où des possibilités de commercialisation ou des opportunités sociétales potentielles ont été identifiées. Les innovations peuvent être commercialisées par le biais de licences accordées à une entreprise nouvelle ou existante ou par une start-up financée par le capital-risque, en fonction de la nature de l'invention/ idée [et] de ses marchés potentiels.

[https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/other/guides\\_for\\_applicants/h2020-guide20-erc-poc\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/other/guides_for_applicants/h2020-guide20-erc-poc_en.pdf)

Le domaine des sciences de la santé et du développement des thérapies est par sa spécificité et son écosystème environnant certainement hors du champ de cette proposition.

30. Voir l'article *Optique adaptative et déconvolution*, Lettre 3AF n°33 (2018)

la communauté scientifique. C'est par elle que l'innovation de type III se multipliera comme elle l'a toujours fait par le passé. Bien que le volume global d'aide que l'on peut estimer reste modeste, mais destiné à être durable, il est essentiel à mettre en place afin que l'innovation puisse continuer à naître de la science, et surtout que se perpétuent l'enthousiasme et l'inventivité de chercheurs et d'ingénieurs pour faire apparaître de nouveaux

moyens d'action sur le monde, sans qu'un quelconque marché massif en soit la véritable finalité.

*L'auteur remercie la Direction scientifique générale de l'ONERA pour les discussions, précisions et contributions à cet article dont les erreurs et les opinions présentées lui restent entièrement imputables.* ■

POINT DE VUE

## Suite à la crise, le transport aérien va-t-il se réinventer ? L'expérience des crises passées

par Jean-Marc Garot, membre de la 3AF, ancien directeur du Centre expérimental Eurocontrol

Cet article vise à expliquer que si, depuis 1970, après les crises successives, le transport aérien a retrouvé sa croissance antérieure, c'est, peut-être, parce que les acteurs, législateurs et opérateurs, ont fait preuve d'innovation et, pas uniquement, parce que cette croissance a suivi, « naturellement », celle du PIB, avec ses hauts et ses bas. De plus, la crise actuelle peut être révélatrice de difficultés sous-jacentes inaperçues.

automatique. La capacité de l'industrie à se remettre des chocs futurs imprévus sera influencée par des facteurs indépendants de sa volonté, notamment l'environnement réglementaire ».

Ces remarques sont intéressantes car elles vont au-delà du constat habituel que le transport aérien, profitant de l'économie mondiale, ne fait qu'en suivre les fluctuations.

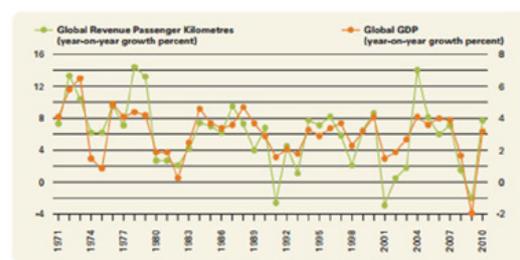
La résilience du transport aérien a été analysée dans le :

Chapitre 1.4 de *Global Air Passenger Markets: Riding Out Periods of Turbulence* de David Oxley Chaitan Jain International Air Transport Association (IATA) du rapport *The Travel & Tourism Competitiveness Report 2015 Growth through Shocks*<sup>1</sup>.

« Au cours des 30 dernières années, le transport aérien a subi de nombreux chocs : deux guerres en Irak, la crise monétaire asiatique, la grippe aviaire, le 11 septembre 2001, les SRAS (Syndrome Respiratoire Aigu Sévère), la grippe porcine, le MERS (Middle East Respiratory Syndrome) et la crise des subprimes.

Mais si l'industrie a toujours été en mesure d'adapter constamment ses opérations et ses modèles commerciaux aux nouveaux défis et aux chocs externes, il ne faut pas tenir pour acquis que la résilience sera toujours

### Global Air Traffic versus Economic Growth



Source: Traffic data from International Civil Aviation Organization (ICAO) and International Air Transport Association (IATA), GDP data from International Monetary Fund (IMF) and Economist Intelligence Unit (EIU)

Source: HCAA (2011)

### LES CRISES ET LES INNOVATIONS DU TRANSPORT AÉRIEN

Certes, on constate une forte corrélation entre la croissance de l'économie mondiale et celle du trafic aérien.

1. <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/global-air-passenger-markets-riding-out-periods-of-turbulence>

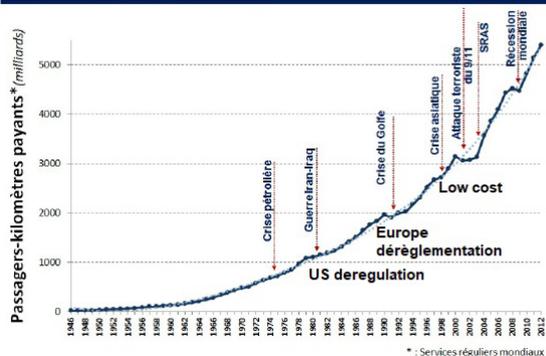
## POINT DE VUE

# SUITE À LA CRISE, LE TRANSPORT AÉRIEN VA-T-IL SE RÉINVENTER ? L'EXPÉRIENCE DES CRISES PASSÉES

En les plaçant dans le contexte politique, si on analyse ce qui a été mis en place depuis la Deuxième Guerre mondiale, après les « libertés de l'air », c'est-à-dire la dérégulation aux États-Unis, la déréglementation<sup>2</sup> en Europe et les compagnies bas coûts, on peut se demander si ceci n'a pas aussi, voire plus, permis au transport aérien de surmonter ces crises.

Le positionnement sur l'abscisse des temps est arbitraire car il peut s'écouler un temps important, entre le moment de la décision d'une évolution, son application et, a fortiori, son apport.

L'aviation mondiale - 1950 à 2012



### La fin de la Deuxième Guerre mondiale et les libertés de l'air

L'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), créée comme institution spécialisée de l'Organisation de Nations Unies à la fin de la Deuxième Guerre mondiale, a défini un certain nombre de « libertés de l'air ». Même avec les adaptations que l'on verra, ce sont les principes de ces accords qui régissent toujours le transport aérien dans le monde, lesquels affirment d'une part la totale souveraineté des États sur le contrôle de leur espace aérien national et d'autre part la réglementation des liaisons internationales par un système d'accords bilatéraux entre États ou entre États et l'Union européenne. Ces « libertés » sont :

- Deux libertés techniques : droit de survol et droit d'effectuer des escales techniques, acceptés par tous.
- Des libertés commerciales, qui font l'objet de négociations entre États, avec, notamment, le droit dit de cabotage (ce dernier est important pour l'Europe dans le cadre du Grand marché européen souhaité par Jacques Delors)

Les accords aériens restent basés sur la notion fondamentale de pavillon national<sup>3</sup> : sont considérées comme compagnies d'un État celles détenues en majorité par des capitaux de la nationalité de cet État. Les règles de nationalité varient d'un pays à l'autre : elles sont plus strictes aux États-Unis (25 % au plus de capitaux étrangers) qu'en Europe (49 %), ce qui empêche encore les fusions transcontinentales et intracontinentales entre entreprises.

La dérégulation aux États-Unis a grandement fait évoluer le paysage, on peut en rappeler quelques étapes :

- Jimmy Carter, président de 1977 à 1981, a signé la loi sur la dérégulation des compagnies aériennes le 24 octobre 1978. Son objectif était d'éliminer l'autorité gouvernementale sur les tarifs, les routes et l'entrée sur le marché de nouvelles compagnies aériennes.
- Une autre raison a pu être de trouver une façon d'utiliser les nombreux avions qui, pendant la guerre du Vietnam, avait fourni le transport de marchandises et de troupes
- Immédiatement des compagnies aériennes se sont créées et, pour accroître leur efficacité, au lieu de réseaux maillés, ont adopté le système de *Hub-and-Spokes* en utilisant quelques grands aéroports comme points de correspondance centraux.
- Ronald Reagan est devenu président le 20 janvier 1981 et le jour de l'investiture du président Reagan, les otages américains en Iran ont été libérés, mais entre-temps, il y avait eu le choc pétrolier, avec le rôle important de l'Iran, le début de la récession et la première crise majeure pour la transport aérien.

C'est à ce moment précis qu'a eu lieu un des événements les plus emblématiques du contrôle du trafic aérien : la grève de la *Professional Air Traffic Controllers Organization* ou PATCO, qui n'a pas compris quel était l'agenda de Ronald Reagan et l'environnement politique et économique. Le contrat de travail entre la *Federal Aviation Administration* (FAA) et PATCO avait expiré en mars 1981 et la PATCO s'attendait à profiter de l'essor du transport aérien pour négocier des hausses de salaires exorbitantes. Mais la récession était là et la demande scandaleuse de PATCO sur les salaires a été rendue publique. Il y avait trop de compagnies aériennes du fait de la *deregulation* et elles espéraient, plus ou moins ouvertement, que « quelqu'un

2. Le mot anglais « deregulation » est utilisé pour montrer la différence avec la déréglementation, les deux étant, en fait, trompeurs car il s'agit plutôt de changement de règles.

3. C'est une notion plus large que celle de La Compagnie Nationale, flag carrier, ambassadrice du pays, à qui est souvent réservé un traitement particulier suivant les pays.

## SUITE À LA CRISE, LE TRANSPORT AÉRIEN VA-T-IL SE RÉINVENTER ? L'EXPÉRIENCE DES CRISES PASSÉES

mette fin au jeu». La situation dans les centres de contrôle entre partisans et adversaires de la grève était à tel point malsaine que les pilotes ont commencé à avoir peur et l'ont fait savoir. Mai, aveugle et tellement habituée à ce que son chantage réussisse, la PATCO n'a rien vu.

Le président Reagan a lancé aux grévistes un ultimatum ferme : retourner au travail dans les 48 heures ou faire face à un licenciement définitif. Après l'expiration du délai de grâce, J. Lynn Helms, l'administrateur de la FAA (en pleine coordination avec le Président) a licencié environ 11,400 contrôleurs. Ces licenciements ont considérablement réduit l'effectif des contrôleurs de la FAA, mais, selon un plan bien préparé, ceci a été compensé, en partie, par du personnel de supervision et des contrôleurs militaires, mais insuffisamment pour gérer le trafic habituel. Ceci reste à ce jour le seul exemple où un pouvoir politique n'a pas cédé à un chantage des contrôleurs du trafic aérien.

Ce fut la première mise œuvre de ce qu'on appelle la gestion globale des flux de trafic aérien (*Air Traffic Flow Management, ATFM*) et est à l'origine du Centre de commandement du système de contrôle du trafic aérien de la FAA. Ceci sera ensuite mis en place en Europe en 1988 et très utile au moment du 11 septembre 2001 où le ciel américain a été vidé en une heure..

Quand le contrôle du trafic aérien a pu, à nouveau, gérer un trafic important, les compagnies ont continué à se multiplier jusqu'en 1982-1983 puisque, à côté des 80 compagnies existantes, 120 nouvelles compagnies sont entrées sur le marché. La concurrence effrénée entraînant notamment une importante baisse des tarifs, les faillites se sont multipliées, suivies de nombreuses fusions ou absorptions, qui ont conduit à la survie d'une dizaine de compagnies majeures (*Majors*). Aux USA, on est donc passé d'un système régulé à un oligopole dérégulé.

Quel lien avec la crise du pétrole, encore appelée deuxième « choc pétrolier » ?

La crise éclate réellement le 27 mars 1979, au lendemain de la signature d'un traité de paix entre Israël et l'Égypte et, soutenue par Iran, ou le chah Mohammad Reza Pahlavi a été renversé quelques semaines plus tôt. Les treize membres de l'OPEP procèdent alors à une augmentation de 9% du prix du brut. En 1980, le prix du baril atteint

la somme record de 40\$. Mais dès 1982, la situation se normalise. L'économie mondiale repart à la hausse et aussi le transport aérien.

On peut se poser la question de savoir si, sans l'avoir prévu, Jimmy Carter, en décidant de la dérégulation aux États-Unis, n'a pas aidé les compagnies aériennes américaines à sortir de la crise ?<sup>4</sup>

### *La déréglementation en Europe a été une évolution majeure qui n'est, peut-être, pas achevée*

En Europe, dans le cadre du Grand marché européen voulu par Jacques Delors, la libéralisation du transport aérien a débuté vers la fin des années 80 et s'est effectuée en trois étapes.

La dernière étape a été la libéralisation du droit de cabotage à l'intérieur de l'Union européenne achevée en 1997, c'est-à-dire le droit pour une compagnie aérienne d'un État membre d'exploiter une route au sein même d'un autre État membre. Le processus a permis la constitution d'un marché intracommunautaire du transport aérien relativement concurrentiel, mais toujours organisé au niveau national, tant en ce qui concerne le contrôle aérien que les droits de trafic sur les routes extracommunautaires, même si la Commission essaye de jouer un rôle de plus en plus important dans les deux cas.

Cette libéralisation du cabotage a été la réelle raison des « navettes » en France entre Paris et Toulouse et Paris et Marseille, etc.

En effet, pour les aéroports avec un trafic important, il faut adapter le nombre de départs à la capacité de la piste. C'est un sujet extrêmement complexe avec différentes options et des règlements internationaux et des législations européennes<sup>5</sup>, et des enjeux considérables.

A tel point que l'on a pu dire que la seule valeur marchande d'une compagnie, qui parfois ne possède même plus ses avions mais les louent, sont ses créneaux. On a vu que, pendant le début de la crise, jusqu'à ce que la Commission européenne assouplisse la législation, des avions volaient à vide pour garder ces créneaux ....

4. Et le transport aérien mondial, car, à l'époque la domination américaine était telle que l'on disait que, quand deux avions décollaient d'un aéroport dans le Monde, il y en avait un des deux aux USA.

## POINT DE VUE

### SUITE À LA CRISE, LE TRANSPORT AÉRIEN VA-T-IL SE RÉINVENTER ? L'EXPÉRIENCE DES CRISES PASSÉES

Donc Air Inter a lancé en novembre 1996 le service La Navette entre Paris-Orly et Toulouse. L'idée était d'offrir des vols tout au long de la journée à un fort cadencement. Présenté comme un confort pour les passagers, le but était surtout de bloquer les créneaux pour empêcher l'arrivée de Lufthansa et le développement de concurrents français.

Du point de vue environnemental, des vols avec des gros-porteurs A330 auraient été préférables qu'avec des A320. De plus, la souplesse de pouvoir changer de navette au dernier moment a disparu avec les tarifs, certes bas, mais qui ne permettent plus de changer de vols.

Toujours est-il, qu'après la fin de la récession et, aussi, grâce à cette déréglementation du transport aérien en Europe, le trafic aérien en Europe a de nouveau cru : l'infrastructure de contrôle de l'espace aérien n'a pas pu suivre et les retards ont commencé à s'accumuler.

Daniel Tennenbaum, Directeur général de l'aviation civile, alors président de la *Conférence européenne de l'aviation civile* (CEAC) <sup>6</sup> a réuni à plusieurs reprises les ministres des Transports de la CEAC pour trouver des solutions. En octobre 1988, copiant le modèle mis en place aux États-Unis en 1981, la CEAC a approuvé la création de l'unité centrale de gestion des flux : la CFMU (*Central Flow Management Unit*) géré par l'Agence Eurocontrol, lui conférant ainsi un rôle opérationnel très important, non prévue dans sa convention révisée.

On peut trouver l'histoire officielle d'Eurocontrol sur Eurocontrol History Book <sup>7</sup>.

Cette gestion centrale de gestion des flux a permis de mieux utiliser la capacité du système de contrôle du trafic aérien en Europe et donc de limiter les retards avec la reprise de la croissance du transport aérien en Europe.

5. Ce règlement est aujourd'hui contesté par un certain nombre d'acteurs.

Extrait du diagnostic de la Commission européenne sur les imperfections du système d'attribution actuel :

« Dans les aéroports les plus saturés, les règles existantes (95/93) sont fondées essentiellement sur le principe des « droits acquis », qui n'offre pas une souplesse suffisante pour garantir la disponibilité des créneaux horaires et maximiser l'utilisation efficace de capacités aéroportuaires rares. Ces règles ne permettent pas une mobilité suffisante des créneaux horaires ni la concurrence entre les transporteurs en place ou entre les transporteurs en place et les nouveaux arrivants. Plutôt que de remettre les créneaux dans le pool, les transporteurs continuent à les accumuler même lorsqu'ils ne peuvent pas les utiliser de manière rentable, afin de s'assurer un nombre suffisant de créneaux en cas de besoin à l'avenir.

6. Organisation intergouvernementale, créée par l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) et le Conseil de l'Europe, au nombre de membres supérieur à ceux de l'Union européenne, surtout à l'époque.

7. <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-history-book>



Transport aérien, voyageurs transportés  
Euro area 1990 2006

Le transport aérien en Europe a plutôt bien résisté, notamment à la crise qui a suivi les attentats du 11 septembre 2001.

On peut se poser la question de savoir si, sans l'avoir prévu, Jacques Delors, en décidant de la déréglementation en Europe, n'a pas aidé les compagnies aériennes européennes à sortir de la crise.

**Le modèle des compagnies bas coûts, assez controversé, a fini par s'imposer**

Le modèle est né aux États-Unis au début des années 70 avec Southwest, compagnie figurant aujourd'hui au top 10 mondial des plus grandes compagnies. En 1995 Ryanair a débuté l'expérience européenne en Irlande, rapidement suivie par EasyJet et Virgin Express.

Les compagnies bas coûts ne répondent pas à une définition précise admise mais se distinguent des Majors par leur approche différenciatrice sur plusieurs types de coûts aboutissant à une offre avantageuse pour le passager. Ces bas coûts ne les empêchent pas de réaliser des résultats largement supérieurs à leurs consœurs Majors.

## SUITE À LA CRISE, LE TRANSPORT AÉRIEN VA-T-IL SE RÉINVENTER ? L'EXPÉRIENCE DES CRISES PASSÉES

Le modèle bas coûts se caractérise par une forte utilisation des appareils. Les avions ont un temps de rotation au sol très court, d'autant plus sur des aéroports secondaires.

Les flottes utilisées sont homogènes, le plus souvent un seul modèle d'avions commandé en grande quantité pour obtenir des économies d'échelles et de frais d'entretien. La politique sociale de ces compagnies est également particulière.

Mais certaines compagnies nationales, en période de difficultés, procèdent elles aussi à des baisses tarifaires et à des changements fondamentaux dans leur modèle pour obtenir une meilleure maîtrise de leurs coûts opérationnels, avec parfois des filiales.

La dernière grande crise, en 2008, initialement de nature financière, a eu sur le transport aérien de fortes répercussions, mais, malgré la sévérité de cette crise, il s'en est remis en un an et demi.

On peut se poser la question de savoir si, sans l'avoir prévu, le PDG de Ryanair, Michael O'Leary, en popularisant le modèle bas coûts, n'a pas aidé les compagnies aériennes mondiales à sortir de la crise.

À l'analyse de trois principales adaptations du transport aérien, on, en effet, estimerait dire que :

« L'industrie a toujours été en mesure d'adapter constamment ses opérations et ses modèles commerciaux aux nouveaux défis et aux chocs externes », comme si les législateurs et les opérateurs avaient anticipé les crises et mis en place des moyens d'y pallier.

*Face aux actuelles crises majeures sanitaire et économique, ces trois principales adaptations seront-elles assez robustes ou faut-il en inventer une quatrième ?*

*De toutes façons, est-ce que ces crises ne seront pas révélatrices de difficultés sous-jacentes inaperçues ?*

J'écarte les aspects sociétaux et environnementaux qui sont devenus, avec la crise, encore plus idéologiques.

J'écarte les aspects sanitaires, nettoyage des avions et distanciation, dont il est difficile de savoir jusqu'à quand et comment ils seront mis en œuvre. La seule chose certaine est que, considérant l'importance des taux d'utilisation des avions et de leur remplissage pour leur rentabilité, encore moins de compagnies aériennes le seront (voir : *Social distancing would make most airlines financially unviable*<sup>8</sup>).

### LES DIFFICULTÉS LATENTES DU TRANSPORT AÉRIEN

Il existe des problèmes latents que la crise pourrait révéler.

*La croissance du trafic aérien ne risquait-elle pas, de toutes façons, de ne plus être celle attendue ?*

Est-ce qu'il n'aura pas fallu se rendre compte et admettre que, pour différentes raisons, il n'y a pas de carburant de substitution au kérosène et, qu'en plus de la question du Peak Oil, il y a une limite physique à sa production ?

*La non rentabilité des compagnies aériennes est-elle inéluctable ?*

Dans la chaîne de valeurs, de façon assez étonnante, c'est celui qui est au contact du client qui perd de l'argent ou en gagne le moins. Il est face à des monopoles, comme les aéroports, alors que les compagnies apportent les clients. Faut-il penser à meilleur partage des profits ?

*Comment concilier une trésorerie fragile et des investissements très lourds que sont les achats d'avions ?*

En économie, y-a-t-il d'autres industries concurrentielles qui soient dans ce cas ? Dans les domaines du transport, pour les routes et le rail, n'est-ce pas l'État qui fait les investissements ?

*La fin des compagnies nationales ? Ou leur retour ?*

Les compagnies aériennes européennes sont-elles mortelles ? Comme l'a écrit Claude Abraham en 2013 dans le rapport Perspectives à vingt ans<sup>9</sup>, ou, comme on le voit

8. <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/social-distancing-would-make-most-airlines-financially-unviable/>

9. <https://www.vie-publique.fr/rapport/33463-les-compagnies-aeriennes-europeennes-sont-elles-mortelles-perspectives>

## POINT DE VUE

### SUITE À LA CRISE, LE TRANSPORT AÉRIEN VA-T-IL SE RÉINVENTER ? L'EXPÉRIENCE DES CRISES PASSÉES

pour les aides à Air France en ce moment, le traitement de cette compagnie « qui porte le drapeau français » sera toujours spécifique ?

Est-ce que les pays européens vont continuer à laisser les loups entrer dans la bergerie ? Comme les hausses de capacité des grandes compagnies aériennes du Moyen-Orient que dénonçait le patron d'Air France - KLM lors du colloque World Air Transport Forum en 2008<sup>10</sup>.

*Les billets d'avions ne sont-ils pas à des prix bradés ?*

Beaucoup de billets ne sont-ils pas vendus à perte ? En espérant faire faillite aux concurrents ? Est-il sain d'habituer les passagers aériens à des prix si éloignés d'un « juste prix » ?

*Les taxes en Europe ne sont-elles pas une distorsion de concurrence ?*

La taxation du kérosène aurait un effet négatif car les compagnies, surtout non européennes, viendraient avec leurs réservoirs encore plus pleins.

Les taxes « carbone » et la taxe de « solidarité » sont spécifiques à l'Europe. Aux États-Unis, les taxes de sûreté sont payées par l'État fédéral. Les redevances du contrôle du trafic aérien en Europe sont deux fois moins chères aux États-Unis, nulles dans les pays du Golfe et sont payées à plus de 50 % par les compagnies européennes.

Sera-t-il toujours acceptable que, quel que soit le nombre de vols, les compagnies aériennes paient le recouvrement complet des 8 milliards des coûts des organismes de contrôle du trafic aérien, sans contrôle et sans obligation de qualité de service ?

#### UNE CONCLUSION EN FORME D'INTERROGATION

Que le transport aérien ait, ou non, à envisager sa quatrième révolution, de nombreux sujets sont actuellement ouverts et, s'il est aujourd'hui trop tôt pour aborder les réponses à venir, La Lettre vous proposera dans ses prochaines éditions de nouvelles analyses, bénéficiant, avec le temps, d'une plus grande visibilité sur l'avenir. ■

10. <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/services/transport--logistique/20081031tribo00305180/air-france-klm-denonce-la-hausse-de-capacite-des-compagnies-du-golfe.html>

## POINT DE VUE

# L'aviation commerciale après la Covid-19

par Carsten Doll, Philippe Chenevier, Francis Guimera, Philippe Jarry, Alain Joselzon, Jean Pierre Jung, Laurent Mangane, Jean Baptiste Rigaudias, Jean Claude Ripoll et Manola Romero, membres de la commission technique Aviation commerciale

### INTRODUCTION

Une pandémie s'est déclarée, les mesures prises de par le monde ont interrompu pratiquement le trafic aérien commercial de passagers. Cette interruption prolongée provoque une crise dont les conséquences marqueront sans aucun doute profondément le secteur et par ricochet bien d'autres. Tous les transports sont fortement touchés, l'aviation l'est de façon massive et certainement durable.

Dans le présent article, la Commission technique Aviation commerciale de la 3AF aborde à grands traits les conditions de reprise des activités et les perspectives d'avenir pour le transport aérien (TA).

### UNE CRISE INÉGALÉE

Le transport aérien est une branche de l'industrie du voyage, très sensible évidemment au contexte économique-financier.

La figure 1 montre sur le demi-siècle précédent, la corrélation étroite entre l'évolution du PIB mondial et le trafic aérien en passagers-kms. On y constate que le transport aérien a jusque-là surmonté les crises qu'il a rencontrées et qu'il a rattrapé en quelques trois ans les retards de croissance qu'il avait subi.

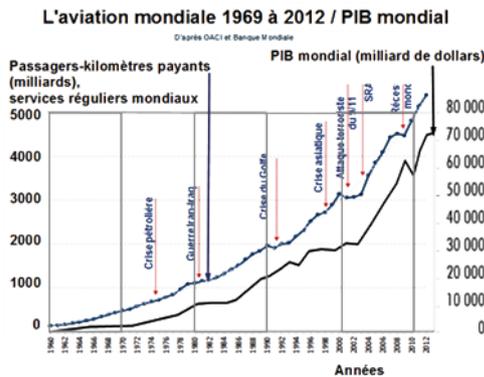


Figure 1. Transport aérien et PIB mondial

La dernière grande crise, en 2008, initialement de nature financière, a eu sur le transport aérien de fortes répercussions. Elle présentait temporairement des caractéristiques géographiques et économiques similaires. Aux USA, le secteur du voyage a enregistré une baisse encore plus grande que celle de l'indice S&P500 des plus grosses firmes US. Les actions des compagnies aériennes US ont chuté d'environ 70% en moins d'un an, entre le niveau moyen au moment du déclenchement de la crise et le point le plus bas. Malgré la sévérité de cette crise, le transport aérien s'en est remis en un an et demi environ avec de nombreuses concentrations. Le degré de gravité de la crise actuelle fait plutôt penser que ses conséquences pourraient être de plus longue portée, avant une reprise complète éventuelle, avec peut-être des mesures nouvelles et des changements d'habitudes de voyages.

### LA CRISE ÉCONOMIQUE DU TRANSPORT AÉRIEN ENGENDRÉE PAR LE COVID-19 EST MAJEURE

Cependant, il y a des différences notables entre la crise actuelle - laquelle de plus, n'est pas terminée - et celle de 2008, tant du point de vue général que du point de vue du transport aérien : la crise du Covid-19 est-elle une crise comme une autre, ou ouvre-t-elle sur une ère nouvelle ?

Il y a de nombreuses évaluations de l'impact économique de la crise sur le transport aérien. Toutes ne sont pas convergentes, mais elles s'accordent sur la gravité de la situation.

Les diagrammes ci-après, donnés en tant qu'exemples, proviennent des données de l'IATA, complétées des PIB établis par la Banque Mondiale :

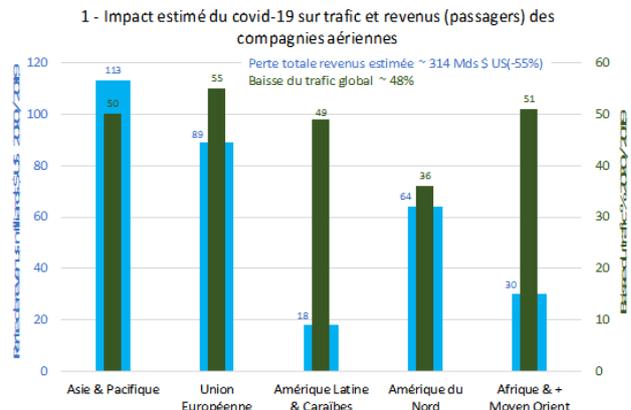


Figure 2. Trafic au moins réduit d'un tiers en Amérique du nord, de moitié ailleurs, 200 milliards de dollars de recettes en moins en Asie-Pacifique et Europe

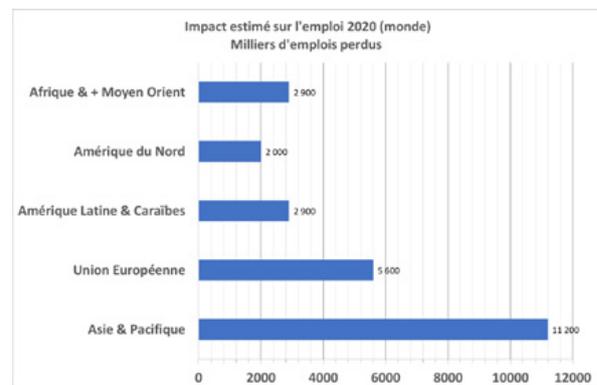


Figure 3. 25 millions d'emplois induits perdus dans le monde

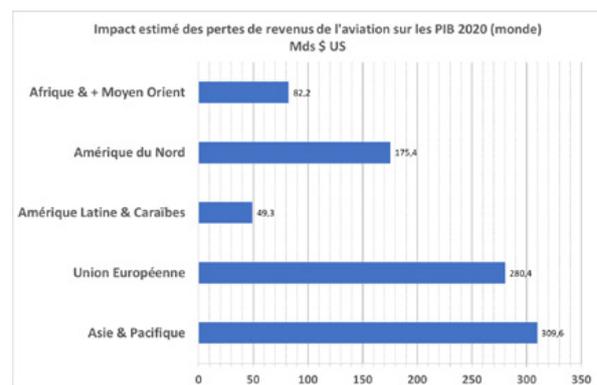


Figure 4. Impact des pertes de recettes de l'aviation sur les PIB 2020. TOTAL : 900 milliards de dollars, soit 1,06% du PIB 2020

Ces chiffres sont préliminaires et approximatifs, à réévaluer selon les dates et rythmes de reprise. Les impacts sur les PIB ont été estimés en supposant « simplement » une baisse uniforme des PIB de 8% en 2020 par rapport à 2019.

## POINT DE VUE L'AVIATION COMMERCIALE APRÈS LA COVID-19

Pour schématiser à des fins de description et sachant bien que les situations réelles – aujourd'hui imprévisibles – ne seront sans doute pas aussi tranchées, on peut imaginer deux types de « scénarios » post-crise à moyen et long terme :

**Scénarios A** : dans la continuité avec le demi-siècle précédent, l'évolution se fait à moyen et long terme principalement fondée sur les facteurs économiques et selon une approche économique non dirigiste. L'impact de la crise du Covid-19 sur les PIB représente alors la variable décisive qui dimensionne le transport aérien mondial. C'est la famille de scénarios Business as usual.

**Scénarios B** : on constate que deux extrêmes, l'un profondément naturel et biologique, l'autre profondément artificiel et technologique, se rencontrent, dans une dramaturgie qui remet en cause le confort de l'humanité. Admettre qu'un virus puisse réduire la population mondiale paraît désormais inadmissible à l'opinion publique, (seul l'accroissement de la menace terroriste matérialisée par le 11/9/2001 et ses conséquences a eu un impact psychologique comparable). Le drame immédiat met en lumière l'approche d'autres drames qui pourraient résulter des aveuglements sur le caractère vital de certains des rapports entre humanité et nature notamment au travers du changement climatique. Parce que la crise sanitaire amène à de nouvelles visions du sens de la vie, parce qu'elle est globale, massive et donne lieu à des interventions économiques d'urgence étatiques, elle donne l'opportunité à de nouveaux comportements socio-économiques d'émerger, ou de se cristalliser alors qu'ils étaient déjà présents mais pas en situation de se poser en ruptures acceptables. C'est la famille de scénarios Ruptures sociétales.

### FUTUR PROCHE DU TRANSPORT AÉRIEN

On peut penser qu'à échéance d'environ trois ans, la menace du virus passera, soit parce qu'on aura trouvé vaccins et traitements qui le confineront (à son tour !) dans la catégorie des affections contrôlées, soit parce que l'évolution (la plus souvent observée lors des pandémies) ne le rendra plus d'actualité. En attendant, il faut faire avec !

La reprise ne pourra intervenir qu'en ordre dispersé, en surcapacité : en domestique, entre 2 régions que l'État permettrait, pour les clients que l'État autoriserait, puis entre 2 États qui l'auraient permis. Les réouvertures dépendront donc des décisions politiques auxquelles chacun, en ordre dispersé parfois, se résoudra.

S'agissant d'un transport public, le transport aérien devra satisfaire les exigences que chaque État stipulera en matière d'opérations !

#### *La protection des personnes*

Le transport aérien est le mieux « adapté » de tous les moyens de transports à la situation présente : l'air de la cabine y est renouvelé rapidement et passées les premières minutes, en vol cet air est exempt de virus venus de l'extérieur parce qu'aucun humain n'y séjourne. Bien sûr, avant l'embarquement, les virucides s'il en est, auront été diffusés en cabine, mais dès l'embarquement, les passagers apporteront leurs virus !

En vol, les passagers sont bien rangés, tous dans le même sens, chacun séparé de son voisin de devant par un dossier relativement épais. Bien que les passagers qui ne s'accompagnent pas, n'aient aucune raison de se tourner l'un vers l'autre, il est possible de leur demander de se masquer, y compris d'une écharpe, avec visière si l'intérêt est avéré ! Certes une action commerciale peut être la fourniture d'un accessoire par leur transporteur, mais il n'est pas nécessaire d'en faire une règle. Le transporteur peut aussi laisser un siège vide entre 2 voisins non réservés ensemble, mais, vu les marges qu'il dégage, une telle restriction de charge marchande devrait être légitimée par la prise de plus de précaution.

Les exploitants tenteront de faire observer les gestes barrières dans l'aérogare, la passerelle et la cabine. Comme depuis le 11/9/2001, cela ralentira embarquements et débarquements : si les passagers ne savent toujours pas charger en porte-bagages sans obstruer l'allée, le transporteur pourra aussi interdire les bagages à mains, mais ce sera très impopulaire. Les distances à respecter en passerelle entre passagers ne résidant pas ensemble peuvent être marquées au sol, mais les salles d'embarquement sont trop exigües pour que ne s'y forment pas spontanément les queues d'embarquement.

Aux enregistrements et dans les couloirs d'aérogare, les marquages peuvent réguler la cadence du cheminement des passagers dociles : pour retrouver des surfaces suffisantes pour un trafic réduit, les sièges des salles d'embarquement, sinon quelques-uns, isolés et distants, devraient être simplement supprimés, évitant tous litiges entre inquiets légitimes et indociles ! Aux aérogares d'organiser entre rubans à enrouleurs, des multiples mais distantes, queues d'embarquement.

### *Reprise du trafic opérationnel*

Les transporteurs auront entamés ou épuisés leurs réserves financières pour payer leurs frais fixes. Ils auront d'abord mis fin aux locations et retardés les livraisons des machines pour lesquelles les engagements contractuels l'auront permis : les constructeurs le subiront. Boeing disposera donc de temps pour solutionner sa déconfiture sans qu'Airbus puisse en profiter.

Les marges des exploitants étant très faibles, leurs réserves seront rares : les plus « gros » trouveront des financements bancaires, les autres, sauf rares niches lucratives et pérennes, disparaîtront, laissant la place à reprises des créneaux après rétablissement des demandes. Les autorités internationales ont déjà recommandé que les droits ne soient pas perdus malgré les suspensions des dessertes imposées en ordre dispersé par les États. La tendance favorisera les concentrations.

Évidemment chacun des exploitants pourra être aidé par son État, inégalement selon la richesse nationale et le profit pour l'économie nationale que chaque gouvernement trouvera dans le service : l'Europe limitera probablement les aides de ses États pour proscrire à ses yeux l'occurrence de biais de concurrence. À moins qu'une des conséquences de cette crise ne soit que la valeur « concurrence » ne soit quelque peu démonétisée devant l'ambition de mieux maîtriser la souveraineté et le développement de l'Europe.

Les aides d'états font supposer que peu d'opérateurs disparaîtront pendant le confinement : quelle que soit leur taille, certains seront très affaiblis. Certes le carburant n'aura pas coûté, ni les redevances d'atterrissage et de navigation, ni les commissions sur ventes, mais les loyers des machines, les salaires des employés non au chômage, les loyers des terminaux et bureaux, et les budgets d'aviations civiles auront été réglés : les aéroports imagineront aussi les moyens de rattraper les manques à gagner : ils sont en situation de monopole !

Les flottes auront été stockées sans possibilité d'entretien : le premier jour du déconfinement initiera les tâches de remises en service que les opérateurs les plus fins ont programmées d'avance. Les machines redeviendront aptes au vol progressivement ! Ce peut être assez rapide, quoique rythmé par la reprise commerciale pour éviter de dupliquer la maintenance.

De même, les équipages retrouveront leurs aptitudes, moins progressivement que les machines, selon les capacités des simulateurs et des vols techniques.

Les réservations auront repris, soit dès le premier jour du déconfinement, soit d'avance pour les opérateurs qui auront imaginé comment. C'est l'état des réservations qui renseignera sur les dessertes pour lesquelles la demande sera présente. Les ouvrir d'avance sur déconfinement conditionnel permettrait d'organiser les remises en exploitation.

Il peut être considéré qu'il suffit de se replacer quelques décennies en arrière avec les outils, machines et systèmes d'informations d'aujourd'hui. Ce n'est pas une inconnue, c'est le quotidien que chaque exploitant a vécu un jour, avec la particularité que tous dans le monde le vivra en même temps... donc agressivité accrue essentiellement bilatérale entre pavillons d'origine et de destination, peu favorable aux marges !

### *Combien de temps durera la suroffre ? La phase transitoire.*

Il est impossible de faire un pronostic d'autant que les mesures réglementaires limitant la mobilité sont encore en vigueur : chaque exploitant fera le sien selon la levée des restrictions réglementaires, ses réservations et leurs cadences. Les concentrations s'imposeront, d'autant qu'il y aura peut-être un changement de consommation de la mobilité basé à la fois sur une plus grande habileté dans les activités à distance et en sens contraire, par la soif de tourisme ou de retrouvailles familiales ou amicales héritées des privations vécues.

La demande sera modeste là où elle attendra la reprise des activités après période d'appauvrissement de tous les consommateurs, entreprises d'une part, accueils touristiques et touristes d'autre part, durement touchés par les mesures de confinement.

Des entreprises seront impatientes de reprendre des activités interrompues contre leur gré, pour autant que leurs reprises se fassent sans délai ni mobilisation de finances : celles-ci seront calées sur celle des échanges économiques, qui n'ont pas de raison d'être très dynamiques et qui auront aussi pris quelques habitudes de savoir-faire à distance.

Les offres des accueils touristiques, en manque, tenteront de remotiver la consommation de clients longtemps sevrés mais désargentés...

La demande sera ainsi satisfaite en surcapacité, donc plus que jamais :

- en moyens courriers avec maximisation des fréquences, donc moindre capacité par vol et
- en long courrier, directement entre plates-formes de correspondances alliées, avec les appareils de moindre capacité de sa flotte.

Hors hub allié, il pourra être opéré une bretelle supplémentaire « bout de ligne », bien que ce ne soit qu'un pis-aller. Notons qu'en suroffre, le coût des redevances, d'atterrissage et de navigation, basées sur les masses maximales au décollage, réduit les marges et que la composition de la flotte devra également s'y adapter en privilégiant les faibles tonnages au détriment des plus gros appareils dont la capacité de remplissage serait inutile.

La surcapacité d'une part, et la demande d'autre part, privilège des plus aisés, exigera de renouveler les offres diversifiées de haute contribution en concurrence ! La pratique exige souvent le remodelage onéreux des cabines. Les finances devront le permettre.

Il faut être conscient que la situation initiale des acteurs : avionneurs, compagnies, aéroports, services associés, différant grandement et les politiques propres des acteurs et de soutiens des états, ayant des efficacités variées à plus long terme - que l'on ne pourra apprécier qu'après ! -, il y aura des disparitions parmi ces acteurs, des survivants dont la récupération prendra plus ou moins de temps et d'autres pour qui la crise aura été une opportunité. C'est de toute façon la loi des scénarios Business as usual.

### **VERS UN AUTRE AVENIR DU TRANSPORT AÉRIEN ?**

Dans son texte à l'enthousiasme communicatif publié sur Aero buzz le 15 avril 2020, Catherine Maunoury, présidente de l'Aéro-club de France, a fait joliment résonner des mots incarnant les valeurs qui ont fondé l'aéronautique. Le texte évoque les nouvelles avenues prometteuses qui pointent à l'horizon en dépit des difficultés actuelles.

Les experts redoutent combien il est difficile de continuer sur la lancée des progrès accomplis et les prochaines avancées seront plus que jamais dépendantes d'un engagement très soutenu dans la recherche en particulier et l'investissement en général. En 2017, l'OCDE

notait l'embellie de la croissance, et l'analysait comme portée par l'investissement. Lequel investissement avait été préalablement mis à mal par une forte généralisation des politiques de rémunération à deux chiffres du capital. En Europe, la politique monétaire de la Banque centrale européenne, en maintenant des taux d'intérêt très bas, a permis aux entreprises d'investir plus facilement.

Quels seront les facteurs critiques pour affronter les grands défis de l'aviation ? Le développement phénoménal du secteur a engendré une croissance industrielle, des enjeux économiques et de compétitions colossaux, un changement d'échelle tel que la vision, l'esprit pionnier, la culture technique et les atouts qui étaient à la base de la réussite, semblent étouffés sous leur poids.

Ce sont les mêmes valeurs qu'il faut donc amplifier, pour réaliser les transformations permettant de relever les grands défis qui jalonnent la route. L'aviation est un domaine stratégique, une étroite dépendance l'unit aux autres domaines dont ni elle, ni aucun autre ne pourra se sauver tout seul. Elle ne se montrera à la hauteur de ces enjeux qu'en retrouvant et partageant ses valeurs.

La première question que l'on pose donc ici est : peut-on se contenter de tourner la page du Covid-19 sans tenter d'en tirer avec recul, des leçons ? Pour ne pas faire mentir Winston Churchill, « il ne faut jamais gaspiller une bonne crise ! », tout indique que le monde d'aujourd'hui, tel qu'il fonctionne, est devenu vulnérable sur beaucoup de plans, malgré les progrès scientifiques et technologiques, avec sa fragilité économique-financière liée à plusieurs facteurs mondiaux combinés, énergie, compétition, enjeux de productivité, spécialisation, dépendances... Il en résulte de multiples vulnérabilités, d'ailleurs interdépendantes :

- vulnérabilité géopolitique avec ses lignes de fractures,
- vulnérabilité environnementale (qualité de l'air et de l'eau, particules fines, pollutions chimiques, biodiversité, réchauffement climatique),
- vulnérabilité sanitaire (besoins d'investissement, adaptabilités réglementaires, besoins de recherche médicale ou écologique),
- vulnérabilité sociale (démographie, migrations, inégalités besoins éducatifs), accompagnées de forte incertitude dans tous les domaines et d'interactions complexes.

La crise actuelle est bien partie pour entraîner des dégâts économiques inédits dont les répercussions vont peser lourdement pendant plusieurs années et marquer d'autant plus les mentalités.

On ne peut ignorer évidemment les nombreuses victimes de la crise sanitaire, ni le fait que bien d'autres personnes aient à endurer ses conséquences. On ne peut ignorer le bouleversement mondial provoqué par le Covid-19, dont on ne sait pas si ses futures variantes n'auront pas une contagiosité et des effets encore plus sévères. « L'après » doit être pensé dans toutes ses dimensions, mettant à profit l'immédiat riche en interrogations, avant que les esprits se « renferment ». Les difficultés économiques à court terme poussant en priorité la reprise économique, ne doivent pas amener à négliger les changements profonds structurels et fonctionnels nécessaires pour préserver l'avenir.

Dans le contexte de telles crises soudaines et évolutives, la grille de jugement de chacun, simple citoyen comme dirigeant, peut évoluer très vite :

- Qui imaginait que le monde entier se figerait à l'exception des hôpitaux et services essentiels, en quelques semaines ? N'avait-on pas omis de tenir compte des risques que les crises sanitaires précédentes auraient dû mettre en évidence ? La notion du « retour d'expérience », bien connu des techniciens de navigabilité de l'aéronautique, ne devrait-elle pas faire partie plus systématiquement de la panoplie méthodologique des acteurs et décideurs ?
- Comment peuvent se combiner les crises de toutes natures, y compris guerres de l'eau et guerres tout court ? Quelles sont les « bonnes » décisions sur quels critères ? Seront-elles prises, et, surtout, par qui ? Aujourd'hui, dans une crise dont l'impact déborde les frontières, les décisions sont prises dans l'urgence, par des états redevenus des acteurs économiques majeurs agissant sur la base de critères stratégiques plutôt qu'uniquement financiers, mais pour combien de temps, avec quelle régulation et légitimité mondiale ? Quid de l'ensemble des menaces qui se profilent ?
- Comme « gouverner, c'est prévoir », cela suppose donc aussi de disposer de bons indicateurs. Quel a été le taux de réussite des scénarios produits dans le passé, comparés aux tendances réellement suivies ? Correspondent-ils à la réalité, du point de vue des facteurs pris en compte, des types d'évolutions, du découpage des options envisagées et des résultats prédits ? Comment différencier les mesures réellement efficaces des mesures symboliques, comme de vouloir limiter les lignes aériennes intérieures quand il y a une desserte par train, avant d'avoir analysé toutes les implications : apports réels des uns et des autres, complémentarité, concurrence, efficacité globale pour l'aménagement des territoires, etc. La vision système est à la fois

une nécessité et un véritable défi.

- Le transport aérien est une composante indissociable de l'écosystème global incluant l'humanité, tel qu'il s'est développé en un siècle marqué par des progrès entrecoupés de guerres, crises énergétiques, économiques et pandémies. C'est une infrastructure mondiale indispensable, non seulement pour soutenir l'économie mondiale mais aussi pour faire barrière à des isolationnismes néfastes, réduire les inégalités et stimuler le codéveloppement.

Il pourra être possible plus tard d'apprécier son impact « en creux » par les conséquences de l'arrêt quasi-total provoqué par la pandémie de Covid-19.

## A TITRE DE CONCLUSION

Compte tenu de cette imbrication profonde du transport aérien dans le tissu socio-économique mondial, toute tentative de remodelage du système de transport aérien, ou d'action d'envergure sur lui, que ce soit pour améliorer son efficacité ou diminuer son empreinte écologique, ne pourrait avoir de sens et ne saurait être conçue hors d'une stratégie globale mûrement réfléchie, pesant notamment l'importance de chacun des facteurs et chacune des répercussions en jeu, dans chacun des domaines-clés concernés.

Dans cette situation où l'on doit affronter des vulnérabilités et des incertitudes multiples, croissantes, la meilleure « arme défensive » est de s'assurer que les transformations des systèmes - incluant le transport aérien - souhaitées ou nécessaires, aillent dans le sens de maximiser leur résilience.

Nous pouvons méditer dans ce contexte, ce qu'écrivait Paul Valéry dans *Regards sur le Monde* et autres essais (1945) :

Il s'agit d'essayer de concevoir une ère toute nouvelle. Nous voici devant un désordre universel d'images et de questions. Il va se produire une quantité de situations et de problèmes tous inédits, en présence desquels presque tout ce que le passé nous apprend est plus à redouter qu'à méditer. C'est d'une analyse approfondie du présent qu'il faut partir, non pour prévoir les événements sur lesquels, ou sur les conséquences desquels, on se trompe toujours, mais pour préparer, disposer ou créer ce qu'il faut pour parer aux événements, leur résister, les utiliser. ■

# Le jumeau virtuel, une nouvelle représentation du monde

par Florence Verzelen, directrice générale adjointe, Industries, Marketing, Affaires internationales, Dassault Systèmes

Depuis 1981, Dassault Systèmes a joué un rôle central dans l'innovation durable de produits. L'entreprise est née de l'essaimage d'une petite équipe d'ingénieurs issue des rangs de Dassault Aviation. Ces ingénieurs développaient alors un logiciel permettant de concevoir des maquettes aérodynamiques pour réduire le temps nécessaire aux essais en soufflerie en faisant appel à la modélisation de surface en trois dimensions (3D). L'automobile et l'aéronautique furent les premiers utilisateurs de ce logiciel.

Au cours des trois décennies qui ont suivi, l'entreprise a développé de nouvelles versions de son architecture logicielle, introduisant des fonctionnalités originales basées sur le concept initial de la modélisation en 3D pour concevoir des produits. L'adoption croissante de la conception en 3D par des clients industriels pour tous les composants d'ensembles complexes a été le déclencheur de sa vision : transformer le processus de réalisation de pièces en 3D en une conception systématique intégrée des produits pour réaliser la maquette numérique complète (DMU) de tous types de produits. Une telle approche permettrait aux clients de réduire le nombre de prototypes physiques et, par conséquent, la durée du cycle de développement, rendant possible l'ingénierie globale en donnant aux ingénieurs la possibilité de partager virtuellement leurs travaux en cours à travers le monde.

Ensuite, Dassault Systèmes a développé une solution éprouvée de gestion en 3D de la totalité du cycle de vie des produits (« PLM »), de la conception virtuelle à la fabrication virtuelle, ce qui implique souvent le recours à des technologies en rapide évolution, ainsi que l'introduction ou le perfectionnement fréquent de nouveaux produits. Ces solutions répondent à des besoins d'ingénierie complexes en matière de conception, de simulation et de fabrication de produits, ainsi qu'à des exigences de process sophistiquées dans les domaines de la gestion des modifications, de la collaboration industrielle et des travaux transversaux dans l'entreprise.

Dans le même temps, l'ambition d'harmoniser produit, nature et vie a conduit l'entreprise à une nouvelle compréhension de la vie et de la nature. Désormais, Dassault Systèmes peut appliquer au monde organique (le vivant) le savoir et le savoir-faire acquis dans le monde non-organique. De l'objet à la vie.

Il y a eu un avant et un après 1989, l'année où Dassault Systèmes a créé le premier jumeau virtuel d'un avion, le Boeing 777. Il y a eu un avant et un après le 9 février 2012, lorsque Dassault Systèmes a déplacé le centre de gravité du secteur en passant du produit à l'expérience. Il y aura un avant et un après le jumeau virtuel du corps humain.

Dassault Systèmes offre aux entreprises et aux personnes des univers d'expérience 3D pour imaginer des innovations durables capables d'harmoniser produit, nature et vie. Lorsqu'elle a formulé sa raison d'être en 2012 en se définissant comme la *3DEXPERIENCE Company*, l'entreprise a anticipé que le monde passerait d'une économie de produit à une économie d'expérience. Une économie où l'usage a plus de valeur que la chose même.

L'économie de l'expérience ne se limite pas à « l'expérience utilisateur ». Il s'agit du bilan global d'un service apporté à la société. Autrement dit, il ne faut plus penser l'industrie comme un ensemble de moyens de production, mais comme un processus de création de valeur pour la société. L'industrie du XXI<sup>e</sup> siècle est un réseau de création, de production et d'échange d'expériences.

## **DASSAULT SYSTÈMES FAIT LE PARI QUE LA PLATEFORME 3DEXPERIENCE DEVIENDRAIT LE PLUS PUISSANT VECTEUR D'INNOVATION DURABLE.**

Le « phénomène plateforme » est en train de réinventer l'industrie. En effet, aujourd'hui le principe organisateur de la chaîne de valeur industrielle, ce n'est plus le producteur, mais chaque personne, professionnel, consommateur et citoyen. Bien plus qu'une technologie, les plateformes virtuelles constituent donc une approche holistique de l'innovation et une source d'inspiration pour de nouvelles offres. Un nouveau monde où chacun est un consommateur frugal : où chacun aspire à une certaine qualité de vie et à un rôle positif à jouer.

Au fur et à mesure que de nouvelles catégories d'innovateurs l'adoptent, la plateforme 3DEXPERIENCE de Dassault Systèmes est devenue le catalyseur et le vecteur de la Renaissance de l'industrie, ce mouvement de transformation qui est à l'œuvre dans le monde – une nouvelle façon d'inventer, d'apprendre, de produire et de commercer. Là encore, ce n'est pas la technologie en soi qui compte : la valeur de la plateforme 3DEXPERIENCE

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ LE JUMENT VIRTUEL, UNE NOUVELLE REPRÉSENTATION DU MONDE

tient dans sa capacité à augmenter et transmettre des savoirs et des savoir-faire au bénéfice des forces vives de demain. La connaissance culmine dans l'expérience.

Le nouveau livre, c'est l'expérience ! Les mondes virtuels révolutionnent le rapport au savoir, comme l'imprimerie le fit au XVe siècle en Europe. Les mondes virtuels sont à la fois une bibliothèque et un atelier. Ceux qui gagneront ne sont pas ceux qui auront le plus automatisé leur production, mais ceux qui instaurent un patrimoine de savoir et de savoir-faire dans un environnement où le sous-traitant devient un partenaire de création de valeur.

L'humanité se trouve aux portes d'un nouveau monde où les industriels doivent créer de nouveaux territoires d'offre, arbitrer entre des scénarios d'usage et transfigurer l'art de produire. Le monde ne pourra le faire qu'en embrassant toutes les dimensions de ce que c'est qu'être humain : à la fois un être vivant, un être social et un être industriel. La capacité à imaginer, la passion d'apprendre, l'envie d'oser et l'art de faire deviennent essentiels. Dans ce monde, le virtuel est le lien entre l'imaginaire, l'utile et le durable.

Il va sans dire que cela ne s'exprime pas par la capacité exponentielle de calcul. Disposer de données sur le passé ne veut pas dire que le futur peut être envisagé. Les big data ne valent rien sans un modèle virtuel qui leur donne un sens : l'expérience projetée déborde la simple utilité pour englober la qualité et l'art. Modélisation et simulation ne sont que d'autres mots pour dire l'imaginaire. Et l'imaginaire, c'est un collectif qui se projette et se rassemble autour de représentations du monde et d'un projet. Si les mondes virtuels élargissent et augmentent le monde réel, c'est parce que ce sont des espaces où les personnes peuvent représenter et expérimenter leur imaginaire.

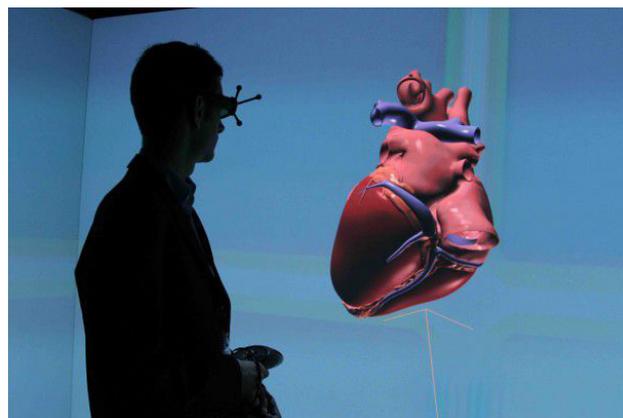
Pourquoi parler de « virtuel » plutôt que de « numérique » ? Précisément parce que le virtuel vaut par le potentiel de projection qu'il nous offre. Le virtuel, c'est le possible, le potentiel, le monde en puissance. On peut alors dire que le virtuel est l'essence même de la nature humaine : l'être humain est un être virtuel, un être de possible.

La finalité et la matière première de Dassault Systèmes, c'est l'humain. Toute expérience est humaine.

Le jumeau virtuel du corps humain, au travers de la plateforme 3DEXPERIENCE, intègre modélisation, simulation, intelligence de l'information et collaboration. Il réunit les biosciences, les sciences des matériaux et les sciences de l'information pour projeter les données d'un objet dans un modèle virtuel complet qui peut être configuré et simulé de bout en bout. En associant art, science et technologie, le jumeau virtuel permet de comprendre l'invisible pour représenter le visible. Industriels, chercheurs, médecins et patients peuvent visualiser, tester, comprendre et prédire ce qu'ils ne peuvent pas voir – depuis l'effet d'un médicament sur la maladie jusqu'aux résultats d'une intervention chirurgicale – et ce, avant même que le patient commence son traitement.

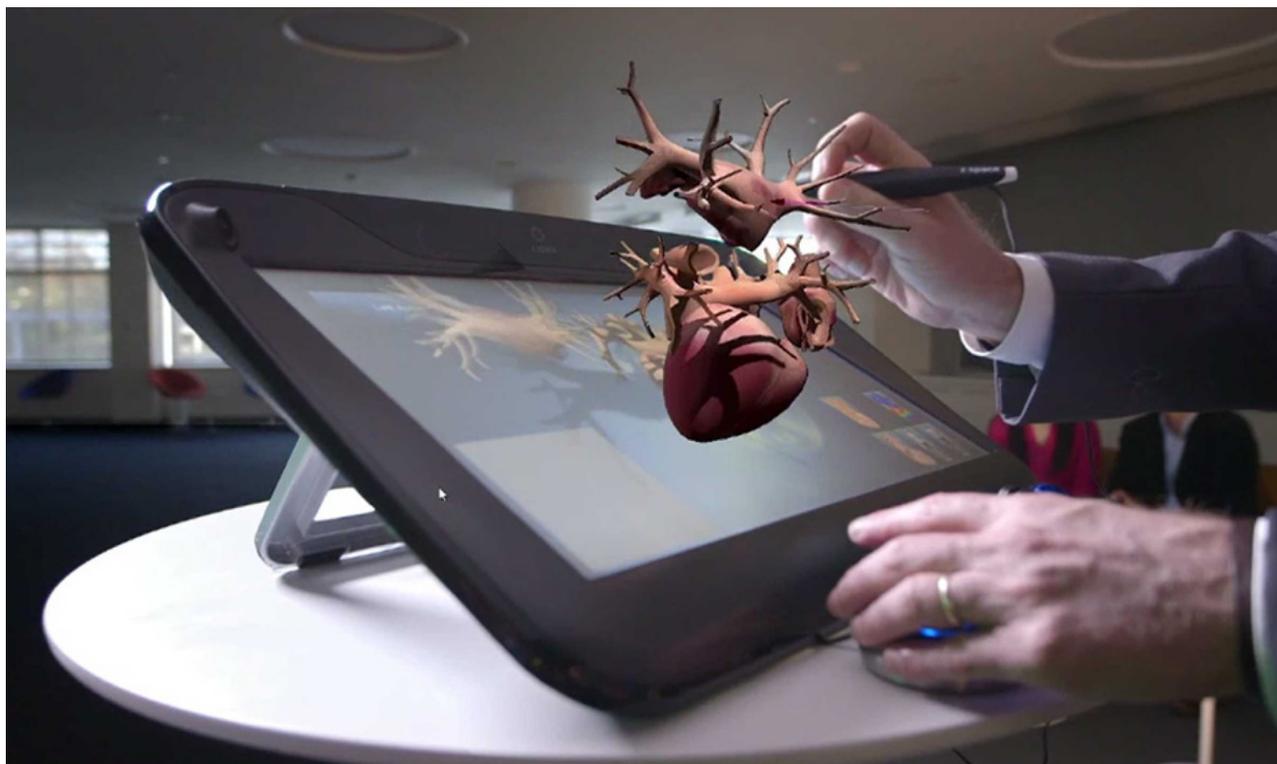
### LE PROJET LIVING HEART

Dassault Systèmes a déjà effectué la démonstration d'un jumeau virtuel de la vie dans le cadre du projet Living Heart. Cette initiative translationnelle mondiale réunit des spécialistes des maladies cardiovasculaires, des enseignants, des développeurs d'équipements médicaux, des agences de réglementation et des cardiologues praticiens dans le cadre d'une mission visant à développer et valider des modèles de cœurs humains numérisés personnalisés de haute précision, qui peuvent être utilisés pour traiter et diagnostiquer des maladies cardiaques, ainsi que développer des appareils médicaux.



Projet « Living Heart » - expérience de réalité virtuelle immersive d'un cœur humain sur une tablette zSpace

Avec l'appui de la Food and Drug Administration américaine, Dassault Systèmes reconnaît l'impact transformateur de la modélisation et de la simulation sur la santé publique et la sécurité des patients. En juillet 2019, l'entreprise a annoncé la prolongation pour cinq ans de sa collaboration avec la FDA. Sa plateforme 3DEXPERIENCE



*Projet « Living Heart » - expérience de réalité virtuelle immersive d'un cœur humain dans un CAVE*

sera utilisée pour développer un nouvel outil numérique permettant de procéder à un examen réglementaire plus efficace des appareils cardiovasculaires et médicaux. Les chercheurs espèrent que ce processus unique en son genre favorisera l'innovation industrielle et permettra aux patients d'accéder à de nouveaux traitements sûrs et efficaces contre la principale cause de décès dans le monde : les maladies cardiaques.

### **LE RYTHME DE L'INNOVATION DANS LES SCIENCES DE LA VIE**

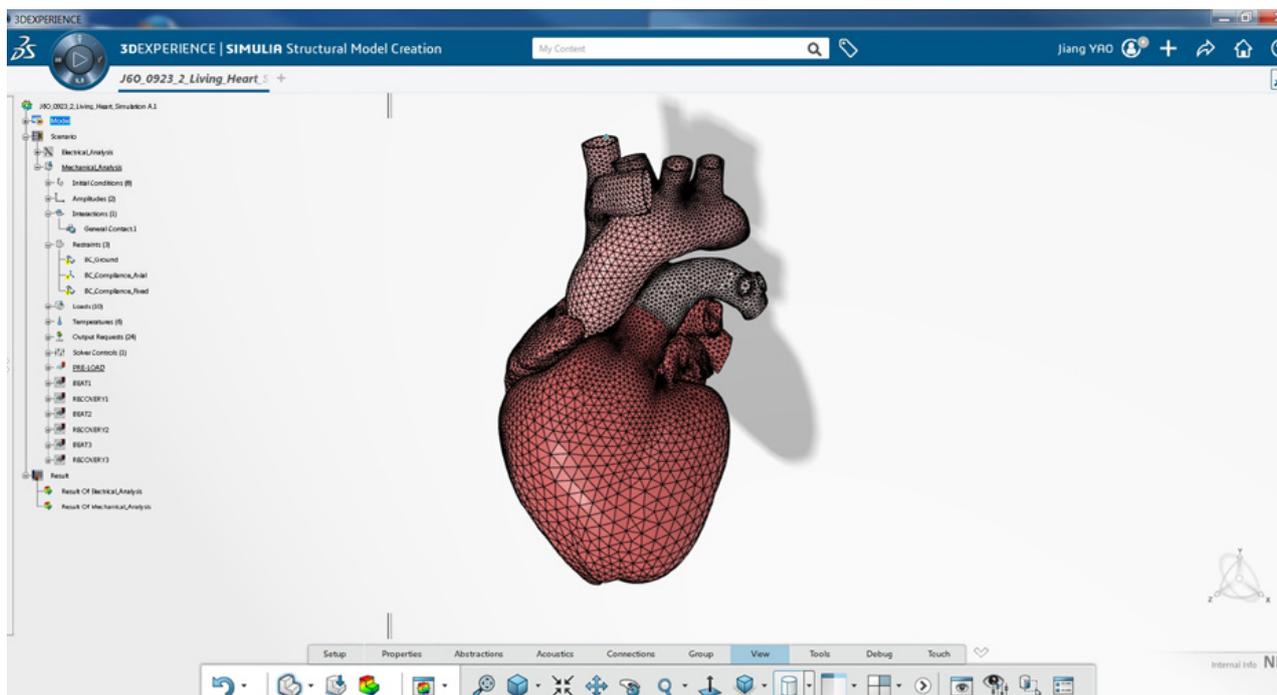
Le projet *Living Heart* est l'une des nombreuses initiatives que Dassault Systèmes a lancées au fil des années en faveur des sciences de la vie. Dassault Systèmes collabore avec des laboratoires biopharmaceutiques, des entreprises de biotechnologie, des fabricants d'appareils médicaux, des instituts de recherche et des organismes de réglementation gouvernementaux pour les aider à développer et commercialiser des produits et des technologies de santé innovants tout en s'appuyant sur la puissance des univers virtuels pour transformer l'expérience du patient.

Le rythme de l'innovation et la prolifération des possibilités qui ont vu le jour ces dix dernières années dans

l'industrie des sciences de la vie sont à la fois passionnants et sans précédent. Ces phénomènes permettent aux fabricants de produits de biotechnologie de mieux répondre aux besoins d'un nombre accru de personnes à travers le monde et ce, avec des diagnostics, des traitements et des remèdes plus avancés et novateurs. Parallèlement, le marché exerce une pression croissante pour que soient commercialisés des produits de santé à la fois moins onéreux, davantage personnalisés et basés sur les résultats, à l'aide de données concrètes. Pour les parties prenantes du secteur, la convergence de ces tendances implique une évolution des paradigmes fondamentaux dans la culture des entreprises, la planification stratégique, les processus métier, les cadres réglementaires et les solutions technologiques.

Les grands noms du secteur des sciences de la vie ont appris d'autres industries que pour relever ces défis, il est nécessaire d'innover afin de créer des avantages concurrentiels et d'offrir des expériences personnalisées centrées sur le patient. Cette évolution de l'innovation englobe les thérapies créées, ainsi que les processus qui accompagnent leur développement. L'innovation se déploiera sur plusieurs fronts : de la R&D à la mise en œuvre chez le patient avec un souci permanent d'excellence opérationnelle.

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ LE JUMENT VIRTUEL, UNE NOUVELLE REPRÉSENTATION DU MONDE



Projet « Living Heart » -jumeau numérique d'un cœur humain avec la plateforme 3DEXPERIENCE de Dassault Systèmes

Mais une approche de pointe en matière d'innovation requiert la mise en œuvre de projets collaboratifs couvrant plusieurs disciplines scientifiques. C'est l'une des principales fonctions de la plateforme d'expérience virtuelle de Dassault Systèmes. En plus de la collaboration multidisciplinaire, cette plateforme permet aux équipes de mener, *in silico*, des expériences en 3D, de réaliser des modèles numériques multi-échelles et multidisciplinaires, de simuler des scénarios de santé et de transformer des big data en données intelligentes. Cette approche se traduit par l'amélioration continue des processus industriels, le perfectionnement et la personnalisation des traitements, ainsi que le développement de nouveaux services, du laboratoire jusqu'au lit du patient. L'innovation consiste à imaginer le monde de demain. Les plateformes d'innovation collaborative peuvent permettre aux laboratoires pharmaceutiques d'apporter une valeur ajoutée sans précédent au monde de la santé et de la science.

Au cours de la décennie écoulée, Dassault Systèmes a investi dans des solutions destinées aux industries pharmaceutiques et des sciences de la vie. L'acquisition d'Accelrys, socle de sa marque BIOVIA et, à l'époque, premier éditeur de logiciels pure play du secteur, a joué un rôle clé dans la stratégie d'investissements. L'année dernière, Dassault Systèmes a acquis MEDIDATA, leader de la transformation numérique dans le secteur des sciences de la vie pour le développement clinique, la commercia-

lisation de solutions thérapeutiques et l'intelligence des données du monde réel. Objectif : accélérer l'innovation de l'industrie à l'ère des expériences centrées sur le patient, grâce à une plateforme collaborative de bout en bout.

Dassault Systèmes est convaincu que la modélisation scientifique, la simulation et les actifs numériques associés au savoir et au savoir-faire mondiaux en matière d'essais cliniques fusionneront pour accélérer le développement de soins personnalisés au bénéfice du patient. L'entreprise pense également que l'industrie tirera profit de « l'effet plateforme » — de la recherche et de la découverte des médicaments jusqu'à leur développement, leurs essais cliniques, leur fabrication et leur commercialisation.

Plus récemment, Dassault Systèmes a également investi dans BioSerenity pour accélérer le développement de dispositifs médicaux textiles embarquant des capteurs et de services de télésanté en ligne pour les domaines de la cardiologie, de la neurologie et des troubles du sommeil. En permettant de collecter automatiquement des données cliniques directement fournies aux médecins et associées à l'utilisation d'outils de diagnostic et surveillance en ligne des pathologies chroniques, BioSerenity représente une avancée majeure vers une télémédecine au coût abordable.

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ LE JUMENT VIRTUEL, UNE NOUVELLE REPRÉSENTATION DU MONDE

L'expérience du patient représente la nouvelle frontière dans le développement des médicaments. L'industrie des sciences de la vie est confrontée à plusieurs défis : répondre aux attentes sans cesse croissantes des patients et réduire les coûts tout en offrant des produits aux qualités et aux performances homogènes. Le regain d'intérêt que suscite l'expérience du patient oblige les industriels à se tourner vers les produits biologiques et combinés, avec la possibilité de traiter les patients à domicile pour leur assurer le plus haut niveau de confort. C'est dans cet esprit que Dassault Systèmes a développé IASO, un démonstrateur illustrant le cycle de vie d'un produit combiné destiné à l'oncologie. De la réflexion en amont aux étapes de commercialisation, cet outil démontre la valeur fondamentale de la modélisation et de la simulation en reliant les systèmes, les personnes et les données, d'un bout à l'autre du processus d'innovation et en préservant l'intégrité des données.

### AUJOURD'HUI, AVEC LA PANDÉMIE DE COVID-19, LE MONDE EST CONFRONTÉ À UN DÉFI SANS PRÉCÉDENT QUI TOUCHE TOUS LES ASPECTS DE LA VIE

En tant qu'entreprise, Dassault Systèmes est plus que jamais convaincue de la pertinence et de la valeur de son offre logicielle.

Avec des millions de cas et plusieurs milliers de décès dus à la pandémie de COVID-19 confirmés à travers le monde, les entreprises des sciences de la vie et, de façon plus générale, l'écosystème sanitaire sont en première ligne pour contenir et combattre le fléau. Les hôpitaux et les points de santé locaux doivent prendre en charge un nombre exponentiel de personnes infectées sans délaissier les autres patients, eux aussi gravement malades. Les laboratoires biopharmaceutiques se battent pour trouver un remède et/ou un vaccin tout en développant des traitements destinés à d'autres maladies, tandis que les fabricants d'appareils médicaux s'efforcent de livrer des équipements de diagnostic et des appareils essentiels (ventilateurs, masques et gants).

Cette crise sans précédent met en valeur les convictions stratégiques de l'entreprise qui sont ancrées dans la valeur du monde virtuel pour modéliser, simuler et analyser des données dans le but d'améliorer le monde réel. Dassault Systèmes contribue au plan mondial de lutte contre la COVID-19 en mettant ses univers virtuels au service de ce combat.

### LES SOLUTIONS DE L'ENTREPRISE PEUVENT ÊTRE UTILISÉES POUR RELEVER LES DIFFÉRENTS ASPECTS DU DÉFI : DE LA RECHERCHE ET DU DÉVELOPPEMENT CLINIQUE À LA FABRICATION ET AUX SOINS DES PATIENTS

Déjà largement adoptées par l'industrie aéronautique pour simuler la dynamique des fluides et la circulation de l'air, les applications de la famille SIMULIA ont été utilisées pour prévoir et empêcher la propagation du virus SRAS-CoV-2 en environnement hospitalier. À Wuhan (Chine), ces solutions ont permis de simuler la contamination et la diffusion du virus dans le système de ventilation de l'hôpital de Leishenshan construit en 14 jours, l'objectif étant de contrer les effets négatifs des risques de ventilation non planifiés. En France, la simulation de la dynamique des fluides a été utilisée pour simuler différents champs d'écoulement de l'air à l'intérieur de l'hôpital Saint-François de Marange-Silvange, lorsque l'établissement a dû convertir un étage entier pour accueillir des patients atteints par la COVID-19. Les responsables de l'hôpital ont ainsi pu comprendre à quel point les couloirs représentent des vecteurs majeurs de propagation du virus et optimiser l'aménagement intérieur afin de réduire les risques dans l'enceinte de l'établissement.

La simulation par ordinateur de l'éternuement humain a également été utilisée pour mieux mesurer l'efficacité des différents équipements de protection individuelle (EPI) développés et déployés, ainsi que contribuer à l'amélioration de leur conception. La simulation réaliste de ce phénomène montre clairement la trajectoire des différentes particules de mucus émises dans l'air lors d'un éternuement, la répartition des particules à la surface de la visière d'un individu protégé, ainsi que les petites particules entraînées au-delà du bouclier, à proximité de l'individu protégé.

Par ailleurs, les applications de conception CATIA ont permis à une startup indienne de concevoir dans un très bref délai le modèle 3D d'un « ventilateur intelligent » sûr, au coût optimisé et pouvant être fabriqué et déployé rapidement afin de répondre aux besoins urgents soulevés par la pandémie de COVID-19. Développé en moins de huit jours, ce ventilateur a été réalisé grâce à l'intelligence collective d'une communauté d'experts de différents domaines sur la plateforme collaborative de Dassault Systèmes.

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ LE JUMENT VIRTUEL, UNE NOUVELLE REPRÉSENTATION DU MONDE



*Dassault Systèmes a acquis la société américaine Medidata, spécialisée dans le suivi des essais cliniques*

S'agissant de la recherche et de la découverte, les applications BIOVIA de modélisation des virus et des sites d'arrimage aux fins de traitement permettent aux chercheurs de réutiliser des candidats-médicaments connus ou d'en inventer de nouveaux ; de plus, environ la moitié des tests commerciaux de dépistage de la COVID-19 effectués en Amérique du Nord et dans la région EMEA utilisent la technologie MEDIDATA de Dassault Systèmes.

Ces exemples montrent combien « l'expérience est humaine » et que cette phrase n'est pas une simple signature pour Dassault Systèmes : c'est un engagement sans faille pour améliorer le monde en ayant un impact fort sur l'harmonisation des produits, de la nature et de la vie. Partout où c'est possible, Dassault Systèmes entend fournir des expériences reposant sur des jumeaux virtuels grâce auxquelles les professionnels de santé et des sciences de la vie pourront soutenir les initiatives lancées au niveau mondial, ainsi que les efforts déployés dans les régions gravement touchées par la pandémie de COVID-19.

Le concept « l'expérience est humaine » est au cœur de l'identité de l'entreprise : qui elle est, ce qu'elle fait et avec qui elle le fait.

Ce précepte nourrit sa stratégie. Celle-ci évolue de *Social Industry Experiences* à *Human Industry Experiences*. Human veut dire que l'ambition et la matière première de Dassault Systèmes, c'est l'humain. Avec l'imagination, le savoir et le savoir-faire pour ressources, l'entreprise veut contribuer durablement au bien-être de tous. Industry signifie que Dassault Systèmes souhaite

apporter à ses clients ce qui a le plus de valeur pour eux – un bénéfice durable. Experiences enfin, indique que Dassault Systèmes veut aider chaque entreprise et chaque personne à construire et habiter le nouveau « Nouveau Monde » qui est aujourd'hui le nôtre.

Pour concrétiser cette stratégie, Dassault Systèmes s'attache à asseoir son leadership dans le domaine des sciences de la vie et de la santé, mais aussi dans deux autres domaines stratégiques de l'économie : les industries manufacturières, ainsi que les infrastructures et les villes.

Ces domaines ont en commun des processus de développement et des besoins en matière de durabilité. Ils ont aussi en commun la volonté d'améliorer la qualité de la vie, en rendant les traitements plus précis et abordables par de meilleures infrastructures ou encore par un meilleur usage des ressources environnementales.

L'expérience est humaine : l'expérience, c'est le plaisir de l'art, de la science et de la technologie pour imaginer et créer un monde meilleur pour tous.

Un monde nécessairement durable. ■

# Spectroscopie CARS : de l'étude de la combustion à la microscopie pour la biologie

par Elodie Lin, Michael Scherman, Pierre Lavenus, Alexandre Bresson, Brigitte Attal-Tretout, ONERA, Aude Silve, Karlsruhe Institute of Technology et Lluis Mir, Institut Gustave Roussy

## INTRODUCTION

La diffusion Raman anti-Stokes cohérente ou DRASC (en anglais Coherent Anti-Stokes Raman Scattering ou CARS) est un processus d'optique non-linéaire qui permet de caractériser in-situ un milieu de manière non-invasive. Basée sur la spectroscopie Raman, la CARS fournit une signature moléculaire caractéristique de l'espèce analysée. Le signal détecté dépend des paramètres d'état du milieu (la concentration relative d'espèces, leurs conformations, la température) et permet donc une mesure riche et précise, si les données spectroscopiques des espèces sont connues au préalable. Cette technique a été utilisée sur un éventail de domaines très variés, qui s'étend de l'étude de la combustion au diagnostic biomédical en passant par la caractérisation des plasmas ou la détection d'éléments chimiques dangereux. Dans tous les cas, en effet, l'enjeu est de caractériser le milieu avec une bonne résolution spatiale et un suivi temporel adapté à la dynamique du phénomène à étudier. De la mesure ponctuelle rapide de température dans une flamme turbulente à la reconstruction en trois dimensions de tissus biologiques, la CARS a pu être adaptée, au travers de ses multiples déclinaisons, afin de répondre aux exigences propres à chacune de ces analyses.

## SPECTROSCOPIE CARS POUR LA MÉTROLOGIE DES ÉCOULEMENTS RÉACTIFS

Un faisceau lumineux incident, appelé pompe ( $\omega_p$ ), se propageant au sein d'une population d'atomes ou de molécules, loin de toute résonance électronique, peut subir de la diffusion Raman incohérente selon deux processus : Stokes ( $\omega_s = \omega_p - \Omega$ ) ou anti-Stokes ( $\omega_{AS} = \omega_p + \Omega$ ) lorsque les photons diffusés sont décalés en longueur d'onde, soit vers le rouge, soit vers le bleu respectivement. Les décalages spectraux observés par rapport à la longueur d'onde incidente renseignent sur la structure ro-vibrationnelle des molécules qui répondent, comme illustré sur la Figure 1a.

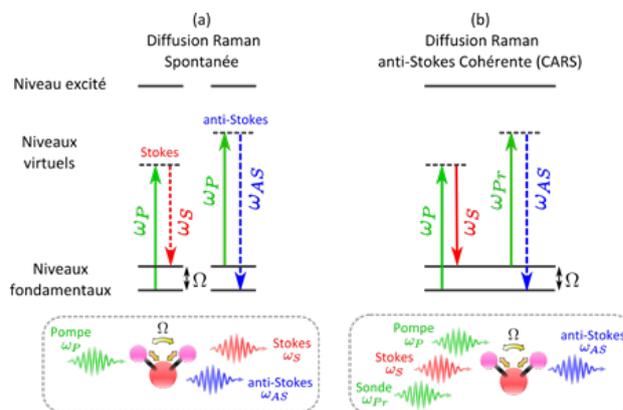


Figure 1. Principe de la diffusion Raman (a) spontanée et (b) cohérente

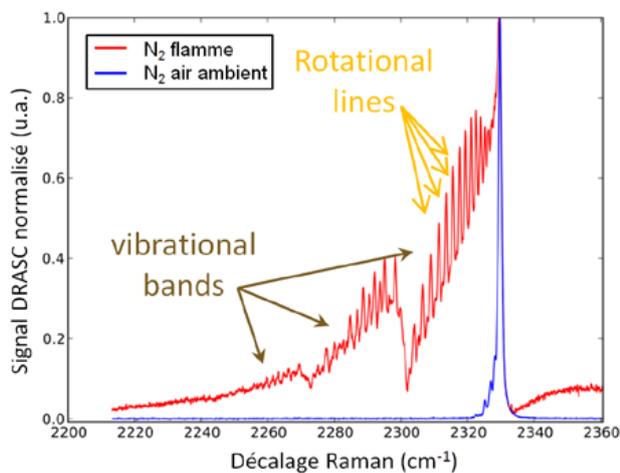
La CARS est un processus Raman cohérent (Figure 1b), au cours duquel deux impulsions laser synchrones, pompe et Stokes, sont envoyées sur le milieu. Lorsque leur différence de fréquence entre en résonance avec une transition vibrationnelle active en Raman, une cohérence macroscopique est induite dans le milieu. Une troisième impulsion, la sonde (ou probe  $\omega_{pr}$ ), permet d'interroger cette cohérence et de créer le faisceau anti-Stokes en vérifiant la loi de conservation de l'énergie ( $\omega_{AS} = \omega_{pr} + \Omega$ ). Ce signal est intense, émis sur une bande spectrale réduite et dans un petit angle solide respectant la condition d'accord de phase propre aux effets d'optique non linéaire. Ces propriétés permettent une acquisition rapide du signal, parfois en un tir laser unique ultracourt (quelques femtosecondes à quelques nanosecondes).

Le principe de la spectroscopie CARS repose donc sur la création, l'amplification et la collection du faisceau anti-Stokes, qui est généralement analysé à l'aide d'un spectromètre et détecté sur la matrice d'un imageur (CCD, ou CMOS par exemple). Le signal dépend de la transition Raman sondée, et on obtient ainsi pour chaque molécule, un spectre caractéristique, situé dans une fenêtre spectrale ro-vibrationnelle particulière. Il dépend également fortement des paramètres thermodynamiques décrivant le milieu, comme la concentration, la pression et la température, qui influencent les profils de raies et leurs amplitudes relatives.

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ SPECTROSCOPIE CARS : DE L'ÉTUDE DE LA COMBUSTION À LA MICROSCOPIE POUR LA BIOLOGIE



(a)



(b)

Figure 2. (a) Diagnostic CARS appliqué sur une flamme de laboratoire ; (b) Spectres CARS de  $N_2$  mesurés dans l'air ambiant et au sein d'une flamme  $CH_4/air$

Historiquement, le diagnostic CARS s'est largement développé à partir des années 1980 [Druet1981] pour caractériser des milieux transitoires comme les plasmas, les écoulements des souffleries et les combustions. Cet élan, porté par le secteur aéronautique, a permis d'appliquer la technique à des milieux de natures très variées, des flammes de laboratoire (voir Figure 2a) aux chambres de combustions simulant des moteurs aéronautiques réels : chambres haute pression (10–60 bar), à injection multiphasique (moteur fusée cryogénique), écoulements supersoniques, etc. Le diagnostic CARS fournit également des mesures précieuses sur l'interaction flamme/plasma développée à des fins d'allumage ou de stabilisation. Les espèces analysées sont celles que l'on retrouve dans les réactifs ou produits majoritaires comme  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $HCl$ ,  $O_2$ , etc. Parmi eux, l'azote représente un bon traceur moléculaire car il est présent en abondance

dans l'air utilisé comme comburant, et est le plus souvent inerte. Les spectres CARS de  $N_2$  obtenus dans l'air ambiant et dans une flamme de pré-mélange  $CH_4/air$  (température d'environ 2000 K) sont présentés sur la figure 2b pour illustrer l'influence de la température sur les populations des niveaux ro-vibrationnels sondés. Ces données sont aujourd'hui acquises à haute cadence (1-5 kHz) en utilisant des lasers ultra-courts (femto ou picosecondes) [Santagata2019], et utilisées pour réaliser le suivi rapide de la température avec une précision inégalée (0,5%).

Le diagnostic CARS a également été appliqué à de nombreux autres milieux réactifs pour lesquels la connaissance des paramètres d'état apporte des informations précieuses pour la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu. Citons par exemple les réacteurs de synthèse de nanotubes de carbone où la mesure in-situ a permis de valider le modèle de formation des nanotubes du LEM (Laboratoire d'Études des Microstructures); les membranes biologiques soumises à des excitations électromagnétiques qui déforment et oxydent les couches lipidiques à des fins de vectorisation médicale (Institut Gustave Roussy, CNRS), les tissus biologiques dont on cherche à caractériser la nature et l'évolution sans utiliser de sonde chimique intrusive (niveau d'hydratation, présence de tumeur), etc.

C'est dans ce dernier domaine que la CARS a connu un essor tout particulier depuis les années 2000, la technique s'étant révélée particulièrement adaptée à la microscopie hyperspectrale du plan objet, qui fournit sur l'échantillon une information instantanée, sensible aux espèces moléculaires le constituant, spatialement résolue (1  $\mu m$ ), et bien contrastée.

### MICROSCOPIE CARS

#### Principe de la microscopie CARS

La majorité des systèmes de microscopie CARS fonctionnent selon le schéma présenté sur la figure 3 : les faisceaux CARS sont focalisés dans l'échantillon à l'aide d'un objectif de microscope et le spectre anti-Stokes est acquis en un point (volume focal). L'acquisition point par point permet de reconstruire l'image, en balayant l'échantillon à l'aide de platines micrométriques, ou en balayant les faisceaux à l'aide de miroirs galvanométriques. Une variation de la technique, dite « champ large » consiste à acquérir l'image d'une zone étendue

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ

### SPECTROSCOPIE CARS : DE L'ÉTUDE DE LA COMBUSTION À LA MICROSCOPIE POUR LA BIOLOGIE

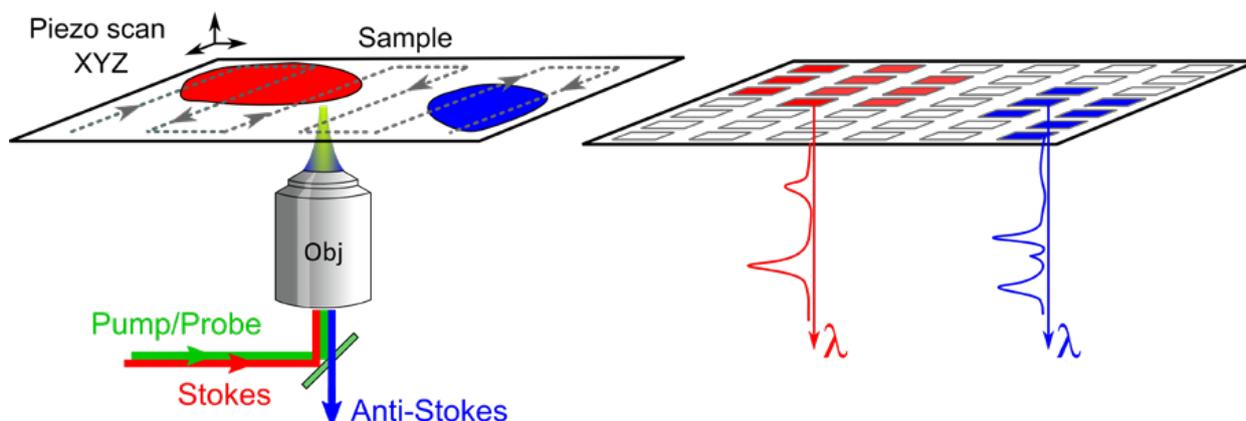


Figure 3. Principe de la microscopie CARS hyperspectrale

pour une vibration précise à l'aide d'une caméra et à balayer la longueur d'onde pour reconstruire le jeu de données hyperspectrales. Des systèmes clés en main sont aujourd'hui proposés dans le commerce bien que de nombreux développements continuent de mobiliser la communauté scientifique.

#### *La spectroscopie vibrationnelle, une petite révolution dans le monde de l'imagerie biomédicale*

Les techniques de spectroscopie vibrationnelles, comme la spectroscopie infrarouge, ou la spectroscopie Raman, ont révolutionné le domaine de l'imagerie biomédicale. Les méthodes d'imagerie traditionnelles utilisent des agents de contraste exogènes, tels que des marqueurs fluorescents. Ces marqueurs perturbent le fonctionnement normal des échantillons étudiés et peuvent entraîner des dommages irréversibles. Leur utilisation est ainsi contraignante pour l'observation de cellules vivantes sur des échelles de temps longues.

L'intérêt de la spectroscopie vibrationnelle est dû au fait que le contraste est intrinsèque à l'échantillon, car les différentes compositions chimiques engendrent des signatures spécifiques qui se reflètent ensuite dans le spectre. Ainsi, chaque espèce a son spectre, et il est possible, en associant ces techniques de spectroscopie vibrationnelle à un système de microscopie, d'obtenir à la fois une information chimique et une information structurale des échantillons microscopiques. Ces techniques d'imagerie sont regroupées sous le terme d'imagerie multi- ou hyper-spectrale, où chaque pixel de l'image comporte un spectre.

À la différence de la spectroscopie infrarouge, la spectroscopie Raman présente l'avantage d'une meilleure résolution spatiale, et ne souffre pas de la forte

absorption de l'eau dans le domaine infrarouge, particulièrement gênante pour l'observation d'échantillons biologiques. Par ailleurs, la diffusion Raman spontanée étant un processus peu efficace, les signaux générés sont faibles, rendant difficile l'application de cette technique à l'observation d'espèces en faible concentration, ou à l'étude de processus dynamiques. La micro-spectroscopie CARS offre donc l'avantage d'un système d'imagerie hyperspectral générant des signaux intenses, sans toutefois avoir besoin d'une forte puissance lumineuse, ou de temps d'intégration longs.

Un exemple de données CARS hyperspectrales est présenté sur la figure 4. Il s'agit de billes de polystyrène dans de l'eau utilisées comme échantillon de calibration. Sur la figure, une image en lumière blanche est comparée à une image CARS obtenue à la vibration  $3050\text{ cm}^{-1}$  (pic du cycle benzénique) pour laquelle les billes apparaissent alors sur fond noir avec un contraste exalté. Le spectre du polystyrène présenté est obtenu en isolant la contribution d'une bille sur une étendue spatiale restreinte (quelques  $\mu\text{m}$ ).

#### *Des applications prometteuses dans des domaines divers du biomédical*

En 1999, Zumbusch et al. proposèrent un système de microscopie CARS à balayage laser, capable de réaliser des images 3D de cellules vivantes [Zumbusch1999]. Ces travaux marquèrent le début d'un intérêt croissant pour l'utilisation de la microscopie Raman cohérente pour l'observation in-vivo d'échantillons biologiques.

En particulier, de nombreux travaux ont exploité la réponse Raman intense des liaisons carbonées  $-\text{CH}_2$  et  $-\text{CH}_3$ , qui sont fortement présentes dans les lipides (autour de  $2900\text{ cm}^{-1}$ ), et qui font partie des constituants fondamentaux des organismes vivants. Ils assurent en

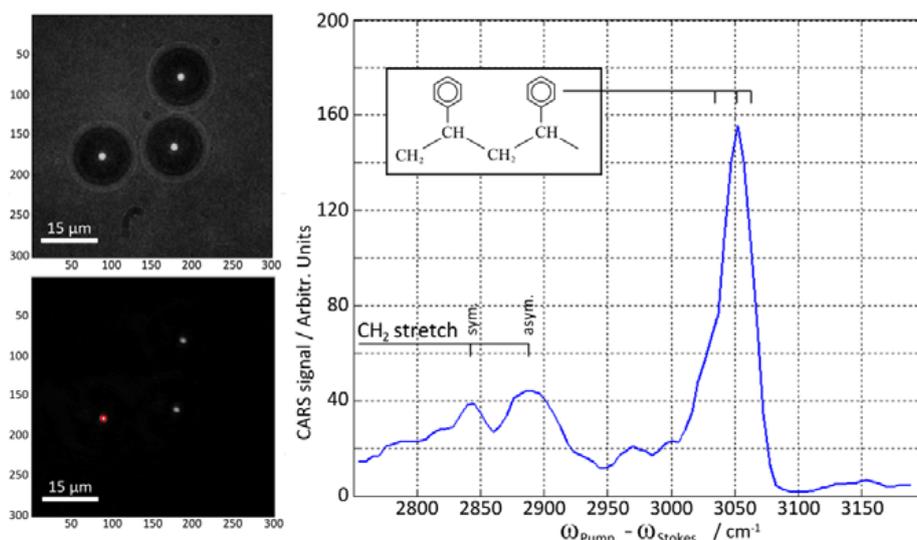


Figure 4. Images de billes polystyrène dans l'eau acquises (a) en lumière blanche, (b) en CARS à la vibration 3050 cm<sup>-1</sup>. (c) Spectre du polystyrène reconstruit en isolant la contribution d'une bille (carré rouge) dans l'image hyperspectrale

effet de nombreuses fonctions essentielles, comme par exemple, le stockage de l'énergie, la signalisation ou la compartimentation des organelles et des cellules via la formation de membranes. Cette signature caractéristique fait de la micro-spectroscopie CARS une technique privilégiée pour l'observation de ces structures fondamentales pour l'étude du vivant [Le2010].

On peut par exemple citer les études faites sur les gouttelettes lipidiques, organites cellulaires longtemps considérés comme de simples stockages d'énergie et dont la formation, la dynamique et le métabolisme sont encore peu connus.

Par ailleurs, des études suggèrent une forte relation entre un métabolisme lipidique altéré et l'agressivité de certains cancers. Une meilleure compréhension des mécanismes d'interaction entre les lipides et les tumeurs est ainsi primordiale afin de proposer de nouvelles thérapies par exemple [Yue2014]. Finalement, les images de ces liaisons chimiques obtenues en Raman cohérent ont été utilisées en histologie pour différencier les tissus sains des tissus cancéreux [Sarri2019].

Un autre sujet de recherche remarquable porte sur la myéline, qui constitue une couche lipidique protectrice autour des axones, à la manière des gaines plastiques autour des fils électriques. Son étude est essentielle à la compréhension de certaines maladies neurodégénératives comme la sclérose en plaques, pour lesquelles la dégradation progressive de la myéline est à l'origine d'une altération des performances du système nerveux. Alors que les méthodes d'imagerie traditionnelles ne permettent pas une visualisation in-vivo de la myéline

intacte sur des échelles de temps appropriées, la microscopie CARS a été utilisée avec succès pour imager l'évolution temporelle de la myéline sur une souris vivante lors d'un processus de démyélinisation [Fu2007].

En s'appuyant sur la réponse Raman de certaines liaisons chimiques privilégiées, la microscopie CARS fournit donc des conditions d'imagerie difficilement accessibles par des techniques traditionnelles, comme l'imagerie in-vivo, en temps réel, affranchie des problèmes liés à l'utilisation de marqueurs (photobleaching, toxicité, fonctions altérées). Elle représente un moyen d'étude robuste et simplifié pour de nombreuses structures, de l'organelle jusqu'à des structures macroscopiques telles que des tissus.

Des efforts ont été faits pour réduire le coût des systèmes de microscopie CARS, mais aussi pour les rendre plus simples, rapides et sensibles, notamment grâce au développement de sources laser compactes et robustes. En particulier, tirer profit de régimes temporels rapides (femto et/ou picoseconde) propres à ces nouvelles générations de sources, est aujourd'hui un champ d'investigation actif et très prometteur. Une autre voie de développement consiste à associer cette technique à d'autres diagnostics non-linéaires, tels que la génération de seconde harmonique, ou la fluorescence à deux photons. La combinaison de ces techniques complémentaires au sein de systèmes multimodaux semble aujourd'hui être la clé pour aller vers des applications cliniques [Sarri2019].

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ SPECTROSCOPIE CARS : DE L'ÉTUDE DE LA COMBUSTION À LA MICROSCOPIE POUR LA BIOLOGIE

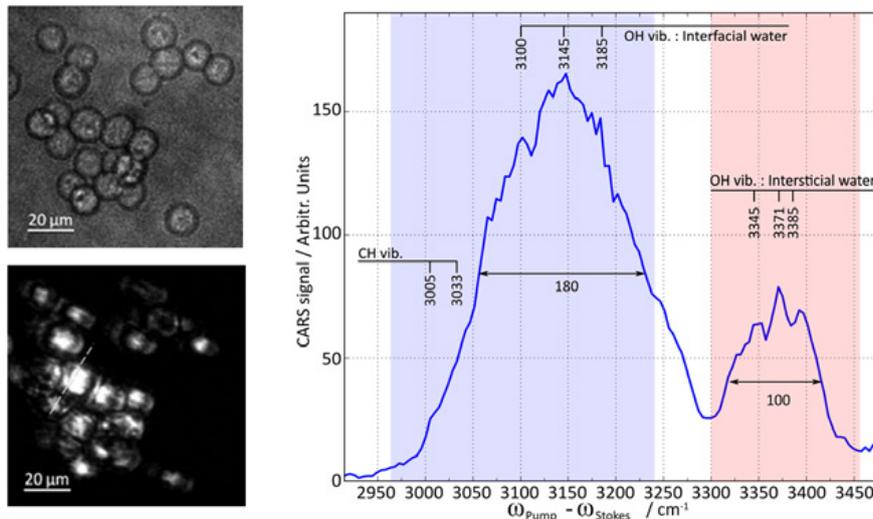


Figure 5. Image (a) en lumière blanche et (b) en CARS à  $2847 \text{ cm}^{-1}$  (bande lipidique) de cellules vivantes de hamster (DC3F) dans une solution saline tampon (PBS) issu de [Silve2012], et (c) spectre CARS de la bande de l'eau structurée entourant la membrane lipidique

### LA MICROSCOPIE RAMAN À L'ONERA

Un microscope CARS utilisant des impulsions lasers nanosecondes accordables en fréquence a été développé à l'issue d'une collaboration entre l'Institut Gustave Roussy (Laboratoire de Vectorologie et Thérapeutiques Anticancéreuses, UMR 8203) et l'ONERA. Le système permet de sonder les membranes biologiques (cellules, vésicules, couches lipidiques) soumises à des champs électriques intenses [Silve2012]. En effet, l'électro-poration (où la membrane est rendue perméable par des impulsions électriques) est proposée comme une alternative non virale prometteuse à la vectorisation de substances à l'intérieur des cellules et au traitement de cancers, mais son mécanisme est encore mal connu. La possibilité d'imager les cellules soumises à de tels protocoles via des procédés résolus en temps, sensibles au type de liaison chimique, à son environnement et son orientation spatiale, apporte donc de nombreuses informations sur les mécanismes à l'œuvre sur la couche lipidique.

Par exemple, sur l'image CARS présentée sur la figure 5, des cellules vivantes de hamster apparaissent sur fond noir, avec un contraste exalté lorsque les lasers visent une vibration caractéristique des lipides ( $3050 \text{ cm}^{-1}$ ). Par ailleurs, la signature spectrale de l'eau à proximité de la membrane révèle une organisation complexe dont on peut suivre les modifications au cours du processus d'électro-poration pour identifier les mécanismes chimiques ou structuraux à l'œuvre.

Un nouveau dispositif est aujourd'hui à l'étude, associant des impulsions ultra-courtes (femto et picoseconde) à une plateforme de microscopie traditionnelle. Il sera utilisé pour le diagnostic d'échantillons biologiques pathogènes (bactéries, virus) dans une optique de détection et d'identification pour la prévention de menaces biologiques [Petrov2007].

Le dispositif sera également consacré à la caractérisation d'échantillons solides, notamment dans le domaine des nouveaux matériaux pour l'aéronautique. En physique du solide, les progrès récents s'intéressent aux nanomatériaux (nanotubes, graphène, nitrure de bore) dont les propriétés aussi bien électriques que magnétiques et optiques sont originales. Les dernières pistes s'orientent vers les matériaux 2D semi-conducteurs, en s'appuyant sur les propriétés déjà connues de leur version bulk, pour des applications optoélectroniques nouvelles (dichalcogénures de métaux de transition).

Les résultats obtenus en spectroscopie sur les nanotubes, ont d'abord permis de valider la nature particulière du mécanisme de croissance proposée par le LEM. Des études portant sur des mono ou multi-couches de graphène et de BN (Boron Nitrure) sont également en cours à l'ONERA. Le graphène est un semi-conducteur à gap nul, alors que BN est semi-conducteur à grand gap (6 eV). Les propriétés particulières de ces objets peuvent être étudiées à l'aide de la microscopie Raman. En effet, la spectroscopie laser a déjà été utilisée pour des études allant de la simple observation de défauts structuraux, comme illustré sur la figure 6, jusqu'à la recherche de

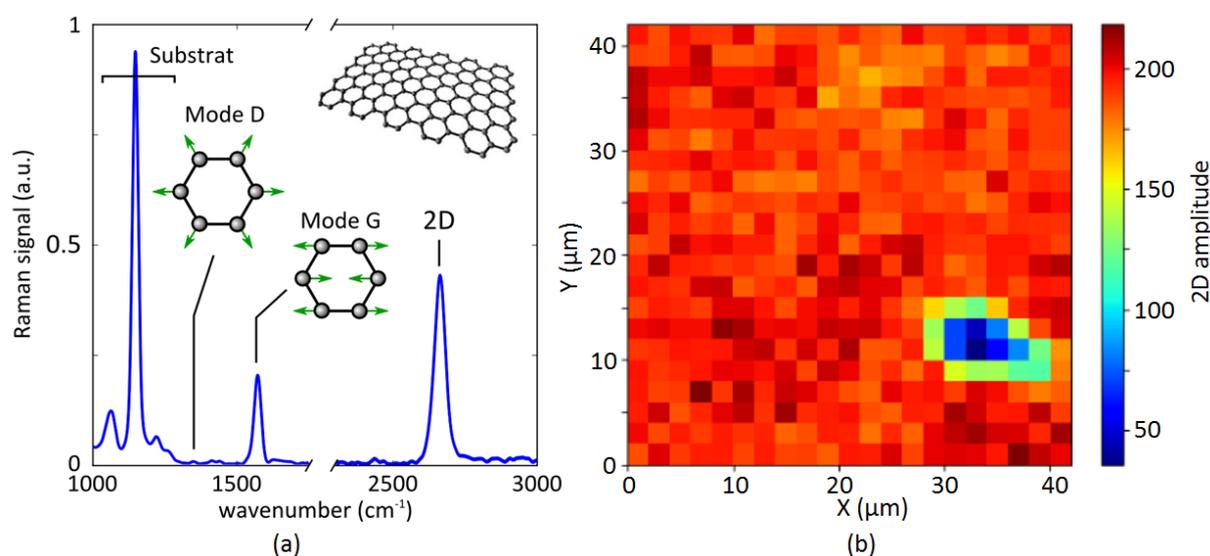


Figure 6. (a) Spectre Raman du graphène, (b) image issue des données hyperspectrales acquises en spectroscopie Raman point par point révélant un défaut dans le nano-dépôt

bandes spectrales particulières qui vont être révélatrices des interactions des électrons de surface. L'analyse de ces bandes offre des renseignements précieux pour la compréhension théorique de ces interactions. L'utilisation du Raman cohérent devrait permettre d'obtenir des signaux plus intenses sur des bandes spectrales caractéristiques, permettant des analyses plus poussées des phénomènes à l'étude.

Enfin, les interactions de molécules directement placées à la surface du graphène est un autre thème d'étude important où la microspectroscopie Raman cohérente pourrait être très utile, surtout dans le cas de molécules biologiques comme celles décrites dans le début de ce chapitre.

## CONCLUSION

Ce tour d'horizon rapide montre que la CARS permet une analyse in-situ riche en informations dans des milieux très divers. La technique est résolue en temps, sensible au type de liaison chimique, à son environnement et son orientation spatiale, permettant ainsi d'apporter de nombreuses informations sur les phénomènes physico-chimiques à l'œuvre. Initialement développée par l'industrie aéronautique à des fins de recherche fondamentale, pour des applications de niche, la spectroscopie CARS s'exporte aujourd'hui vers de nouveaux domaines plus grand public, comme par exemple la science du vivant.

L'alliance de la CARS à des plateformes de microscopie offre l'avantage d'un système d'imagerie hyperspectral adapté à l'étude non-invasive d'échantillons biologiques, facilement associable à d'autres techniques d'imagerie non linéaire. Les applications cliniques possibles de ces nouveaux systèmes semblent très prometteuses, pour faciliter le processus de diagnostic notamment.

De nombreuses autres applications pourraient bénéficier de la CARS et de ses spécificités. L'ONERA, forte d'une expérience importante dans le domaine des nouveaux matériaux, souhaite explorer les performances de la CARS sur les nanomatériaux bidimensionnels. Un autre axe de recherche envisagé consiste à observer les membranes des bactéries, avec pour visée, la détection d'agents biologiques et chimiques.

## RÉFÉRENCES

- S.A.J. Druet and J.-P.E. Taran, «CARS spectroscopy», *Progress in Quantum Electronics* (1981) 7(1), 1-72.
- [Santagata2019]: R. Santagata, M. Scherman, M. Toubéix, M. Nafa, B. Tretout and A. Bresson, «Ultrafast background-free ro-vibrational fs/ps-CARS thermometry using an Yb:YAG crystal-fiber amplified probe», *Optics Express* (2019) 27(23), 32924, 2019.
- A. Zumbusch, G.R. Holtom, and X.S. Xie "Three-dimensional vibrational imaging by coherent anti-Stokes Raman scattering", *Physical Review Letters* (1999) 82(20), 4142-4145. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.82.4142>

T.T. Le, S. Yue, and J.X. Cheng, "Shedding new light on lipid biology with coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy," *Journal of Lipid Research* (2010) 51(11), 3091–3102. [https://doi.org/10.1194/jlr.R00GTGR\\$8730](https://doi.org/10.1194/jlr.R00GTGR$8730)

S. Yue, J. Li, S. Lee, H.J. Lee, T. Shao, B. Song, L. Cheng, T.A. Masterson, X. Liu, T. Ratliff and J. Cheng, "Article Cholesteryl Ester Accumulation Induced by PTEN Loss and PI3K / AKT Activation Underlies Human Prostate Cancer Aggressiveness," *Cell Metabolism* (2014) 19(3), 393–406. <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2014.01.019>

B. Sarri, R. Canonge, X. Audier, E. Simon, J. Wojak, F. Caillol, C. Cador, D. Margue, F. Poizat, M. Giovannini and H. Rigneault, "Fast stimulated Raman and second harmonic generation imaging for intraoperative gastro-intestinal cancer detection," *Scientific Reports* (2019) 9, 10052. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46489-x>

Y. Fu, H. Wang, T. B. Huff, R. Shi, and J.-X. Cheng, "Coherent Anti-Stokes Raman Scattering imaging of Myelin Degradation Reveals a Calcium-Dependent Pathway in Lyso-PtdCho-induced Demyelination," *Journal of Neuroscience Research* (2007) 3253, 3244–3253. <https://doi.org/10.1002/jnr>

A. Silve, N. Dorval, T. Schmid, L.M. Mir, B. Attal-Tretout, "A wide-field arrangement for single-shot CARS imaging of living cells," *Journal of Raman spectroscopy* (2012) 43, 644–650 <https://doi.org/10.1002/jrs.4051>

G.I. Petrov, R. Arora, V.V. Yakovlev, X. Wang, A.V. Sokolov, and M.O. Scully, "Comparison of coherent and spontaneous Raman microspectroscopies for noninvasive detection of single bacterial endospores," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (2007) 104(19), 7776–7779. <https://doi.org/10.1073/pnas.0702107104> ■

## Optique adaptative pour l'imagerie rétinienne

par Serge Meimon, ONERA, Kate Grieve, Hôpital des Quinze-Vingts et Cyril Petit, ONERA

### TÉLESCOPES, MICROSCOPES ET OPHTHALMOSCOPES

Depuis l'invention par Galilée de l'occholino, l'ancêtre du microscope et de la lunette astronomique, la même année 1609, l'observation du ciel et l'observation du vivant semblent se répondre et dialoguer, chacune empruntant à l'autre ses meilleures trouvailles. C'est encore le cas ici, où une technique de correction de la turbulence atmosphérique dans les images astronomiques, l'optique adaptative, vient révéler les structures microscopiques qui tapissent le fond de nos yeux.

### LA RÉTINE, UN CERVEAU MINIATURE

L'une des possibilités les plus excitantes de l'imagerie médicale est l'observation du fonctionnement du cerveau. L'imagerie calcique, récompensée en 2014 par un prix Nobel, permet l'observation de l'activité de neurones spécifiques dans un cerveau de souris en activité. Cette technique est hélas très invasive et donc non transposable au cerveau humain, dont l'observation ne peut être

faite qu'avec une résolution de l'ordre du millimètre, grâce à l'IRM fonctionnelle.

L'ensemble du cerveau humain semble donc résister à l'observation microscopique in-vivo. Tout le cerveau? Non! Il en existe une unique partie observable aux longueurs d'onde optiques (avec une résolution de l'ordre du micron, c'est à dire la taille d'une cellule) : la rétine. En effet, le réseau neuro vasculaire profond que constitue la rétine peut être vu comme une partie du cerveau, dont il partage certaines structures et certaines pathologies. Par exemple, les bêta-amyloïdes, qui s'accumulent dans le cerveau chez les patients atteints de la maladie d'Alzheimer, se retrouvent aussi dans la rétine. Il est même possible de les identifier grâce à une épice courante, le curcuma. De même, lors d'une suspicion de traumatisme cérébral, comme pendant des compétitions de rugby, c'est la rétine que l'on observe pour y rechercher des lésions dont la présence indique que le cerveau est atteint.

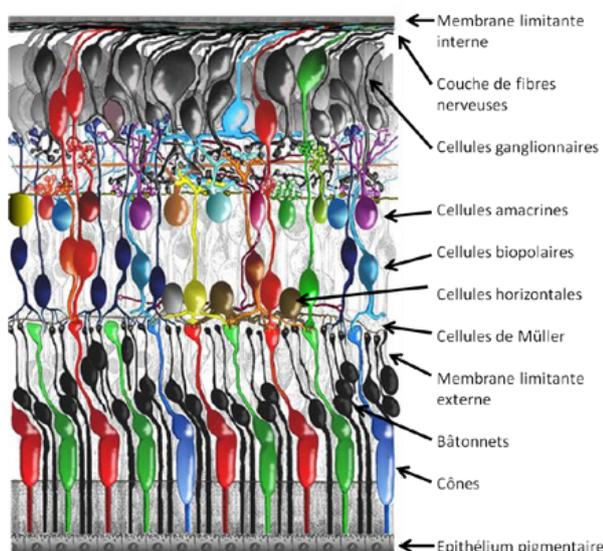


Illustration adapted from: Helga Kolb, How the retina works. American Scientist 2008, 91, 28-35

Figure 1 (adaptée de [1]). Notre rétine est un tissu d'à peine un demi-millimètre d'épaisseur qui tapisse le fond de notre œil. Elle est constituée d'un réseau vasculaire complexe qui alimente une architecture de neurones divisée en trois étages : un premier étage de photorécepteurs, les fameux cônes et bâtonnets, des neurones chargés de transformer la lumière en signal nerveux ; les deux étages suivants servent à prétraiter les informations, qui seront acheminées vers le nerf optique par les axones (fibres nerveuses) des cellules ganglionnaires. Ces deux étages supérieurs sont relativement transparents aux longueurs d'ondes optiques, car la lumière incidente les traverse avant d'être perçue par les photorécepteurs. Tout au fond, au pied des photorécepteurs, la rétine est limitée par une monocouche cellulaire, l'épithélium pigmentaire rétinien, qui absorbe la lumière non captée par les photorécepteurs (et en rétrodiffuse une partie)

## 200 ANS D'OBSERVATION DE LA RÉTINE

De par sa particularité, la rétine fait l'objet d'une observation minutieuse depuis plus de 200 ans (voir Figure 2), grâce à des instruments spécifiques baptisés « ophtalmoscopes ».

L'ophtalmoscopie plein champ consiste à illuminer la rétine par une source large et à recueillir la lumière rétrodiffusée à l'aide d'une caméra. Cette technique a été révolutionnée par l'adaptation de l'optique adaptative à l'ophtalmologie en 1997 [2]. Grâce à un ophtalmoscope plein-champ, l'équipe de David Williams à Rochester est ainsi parvenue à corriger les aberrations optiques rapidement évolutives de l'œil, et ainsi à résoudre les neurones photorécepteurs, cellules de quelques microns chargées de la conversion de la lumière en signal neuronal. Ces photorécepteurs sont de deux types, les bâtonnets, dédiés à la vision de nuit, et les cônes, dédiés à la vision de jour, à haute précision, et à la détection des couleurs. En 1997, seuls les cônes étaient observables, mais ceci permit déjà de comprendre comment les classes de cônes sensibles aux différentes couleurs étaient organisées [3]. Dans le sillage de ces réalisations pionnières, le premier ophtalmoscope plein champ à optique adaptative commercial a été développé par la société française Imagine Eyes.

Malgré tout, de nombreuses autres cellules essentielles à la vision se dérobaient encore à l'observation microscopique : les bâtonnets, bien sûr, mais aussi d'autres neurones chargés du prétraitement des données acquises par les photorécepteurs avant transmission au cerveau via le nerf optique, tels que les cellules ganglionnaires. L'une des limites essentielles à l'observation de ces couches supérieures de la rétine est le fait que celles-ci sont quasiment transparentes, car la lumière les traverse avant d'atteindre les photorécepteurs. De plus,

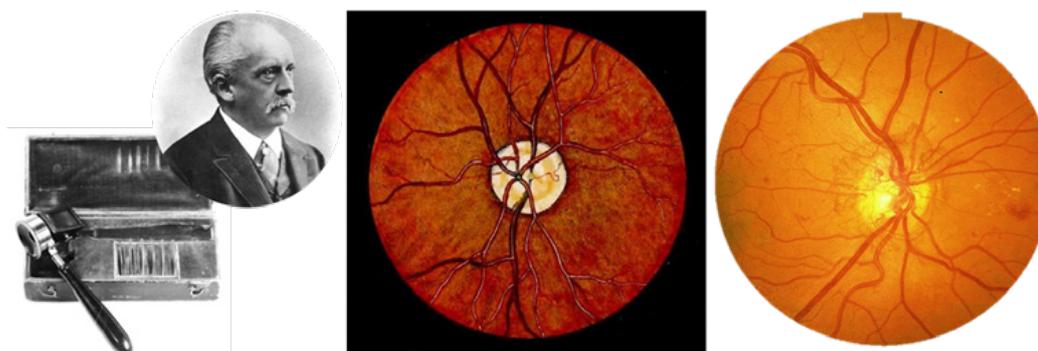


Figure 2. À gauche : Helmholtz et ophtalmoscope de Helmholtz (1851)  
Au milieu : dessin du fond d'œil réalisé par Van Trigt (1853). À droite : fond d'œil réalisé de nos jours

il s'agit d'observer un volume de tissu, de telle sorte que lorsque l'on observe l'une des couches, toutes les autres contribuent à l'image sous la forme de structures défocalisées et d'un fond diffus qui réduit le contraste.

**LA RÉVOLUTION CONFOCALE**

En microscopie, une solution révolutionnaire pour s'abstraire de la diffusion d'autres couches d'un volume de tissu avait été inventée par Marvin Minsky, le père de l'intelligence artificielle, en 1953 : le microscope confocal à balayage. Il consiste à illuminer le tissu par une source ponctuelle focalisée sur la couche d'intérêt, et à capter la lumière rétrodiffusée à travers un petit trou conjugué du même foyer (d'où l'adjectif « confocal »), de façon à filtrer par ce trou la lumière multi-diffusée ainsi que les faisceaux défocalisés issus d'autres couches. Il suffit alors de balayer la source ponctuelle et le trou de réception sur l'échantillon pour reconstituer une image, à l'aide de miroirs de balayage galvanométriques. Dans ce cas, la fonction d'étalement de point est approximativement le carré de celle d'un microscope classique, elle est donc plus fine dans les trois dimensions : la résolution est accrue, ainsi que le sectionnement optique (sélectivité en profondeur).

C'est au début des années 2000 qu'un ophtalmo-cope confocal à balayage corrigé par optique adaptative a vu le jour [4]. L'augmentation drastique de contraste et de résolution a permis d'imager non seulement les cônes, mais aussi les bâtonnets. Mais l'imagerie des cellules ganglionnaires, quasiment transparentes et peu contrastées, n'a été possible que grâce à une astuce elle-aussi issue de la microscopie : en décalant légèrement le trou confocal de réception de la position de la source ponctuelle, on bloque la réflexion diffuse directe (ou rétrodiffusion spéculaire) pour ne capter que la lumière multi-diffusée. Cette imagerie en « champ sombre » rehausse le contraste de cellules transparentes de façon spectaculaire, permettant une meilleure compréhension du réseau neuronal rétinien. Mais le réseau vasculaire n'est pas en reste ! La paroi des vaisseaux, ainsi que le trajet des globules rouges, deviennent beaucoup plus contrastés.

Cette méthode d'observation monopoint que l'on balaye devant l'échantillon se prête parfaitement à une mise en œuvre par optique fibrée. C'est la tête de fibre qui joue alors le rôle de source ponctuelle (à l'aller) et de trou confocal (au retour <sup>1</sup>). Résolution accrue, sectionnement optique, champ sombre, mise en œuvre par optique fibrée, etc. cette modalité à balayage a largement supplanté la méthode plein champ des origines. Pour autant, cette dernière n'a pas totalement disparu !

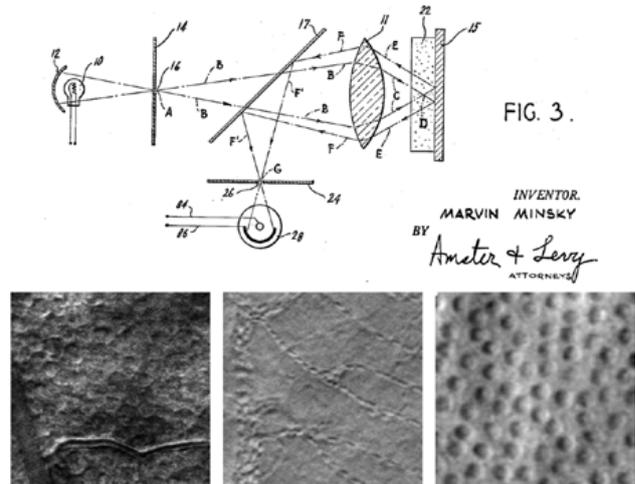


Figure 3. Haut : schéma du brevet de M Minsky pour l'ophtalmo-cope confocal [5] ; bas : trois images en champ sombre : gauche, cellules ganglionnaires [6] en multioffset detection ; centre, vaisseaux et leurs globules (image prise par K. Grieve en champ sombre) ; droite, segments internes de photorécepteurs [7] en split detection.  
 Images : 1°x1° de champ

**LE RENOUVEAU DE L'OPHTALMOSCOPIE PLEIN-CHAMP**

En effet, l'ophtalmoscopie plein-champ présente des atouts importants vis-à-vis de la technique à balayage : la détection parallèle de tous les pixels est par nature plus rapide qu'une détection séquentielle (typiquement 50 fois plus rapide) ; de plus, l'ensemble des pixels de l'image sont acquis au même moment, alors que l'imagerie à balayage présente de nombreux artéfacts lorsque la scène est mouvante. Les mouvements de rétine, qui sont présents en permanence chez l'humain, induisent une

1. La détection peut se faire de façon incohérente (ophtalmo-cope confocal à balayage) ou de façon cohérente, en faisant battre le signal retour avec une partie du faisceau source. Cette détection cohérente, ou Optical Coherence Tomography (OCT), rend possible une imagerie en profondeur de la rétine avec une résolution de l'ordre de quelques microns dans les trois dimensions. Couplée elle aussi avec l'optique adaptative, l'OCT est aujourd'hui l'imagerie rétinienne la plus utilisée, mais ses multiples modalités mériteraient un dossier complet à elles toutes seules...

distorsion des images obtenues par balayage. De même, les mouvements des globules rouges se combinent avec le balayage créant un effet de brouillage (pour mieux se le représenter, si un globule rouge suivait la même trajectoire que le balayage, il pourrait être présent plusieurs fois dans l'image). Hormis un éventuel flou de bouger, l'imagerie plein-champ est exempte de ces effets. Elle est donc plus adaptée à des mesures précises de la topographie rétinienne, comme par exemple la mesure du calibre des capillaires, les plus petits vaisseaux rétiniens (de l'ordre de 10  $\mu\text{m}$ ) [8]. Cette mesure rend possible l'évaluation du couplage neuro-vasculaire, un mécanisme fondamental du cerveau et de la rétine impliqué notamment dans les maladies d'Alzheimer, de Parkinson et dans les AVC [9].

De l'aveu même de l'un des inventeurs de l'ophtalmoscope à balayage corrigé par optique adaptative (Austin Roorda), l'avenir est à la parallélisation et donc à l'imagerie plein champ... pourvu que cette dernière parvienne à améliorer sa résolution et son sectionnement optique et à proposer une imagerie en champ sombre ! C'est le défi que nous tentons de relever en utilisant une technologie présente dans tous les vidéoprojecteurs, les Digital Micromirror Devices (DMD), pour projeter au fond de la rétine des motifs d'illumination spécifiques.

### LES DEUX FACES D'UN MOTIF D'ILLUMINATION DIGITALE

Les motifs que nous projetons sont des motifs binaires, permettant d'éclairer à volonté certaines zones pour en laisser d'autres dans l'ombre. Prenons l'exemple de la figure 4, où un motif de bandes verticales est projeté.

Dans les zones sombres, il n'y a pas d'éclairage direct, donc pas de rétrodiffusion simple. Les structures sont indirectement éclairées par la lumière multi-diffusée issue des bandes claires, et apparaissent plus contrastées pour certaines d'entre elles, telles que la paroi des vaisseaux. C'est là exactement le principe de l'imagerie en champ sombre, dont nous démontrons ici la faisabilité dans la rétine avec une imagerie plein champ.

Considérons à présent les cases claires d'un motif en damier (voir Figure 5). Le contraste des photorécepteurs est bien meilleur que lorsque toute la scène est illuminée. Cela est dû au fait que l'on éclaire à travers un « trou » carré, qui délimite la case claire du damier, et qu'au retour on ne regarde qu'une zone de pixels délimitant une zone carrée. Ce double filtrage spatial constitue une détection confocale. Avec des cases de damier d'une taille proche de la tache d'Airy on obtiendrait le gain de résolution d'un facteur 2 que l'on obtient en microscopie confocale à balayage, mais l'amélioration de contraste et de sectionnement optique sont déjà visibles ici. En combinant cette image avec celle du damier opposé (en négatif), on peut reconstituer une image confocale, acquise avec une caméra, et donc exempte de toute distorsion.

Ces premiers résultats montrent qu'il est possible, grâce à une optique adaptative de haute performance et une illumination digitale, de combiner les avantages d'une détection confocale ou en champ sombre avec ceux d'une acquisition parallélisée (caméra) rapide et sans distorsion.

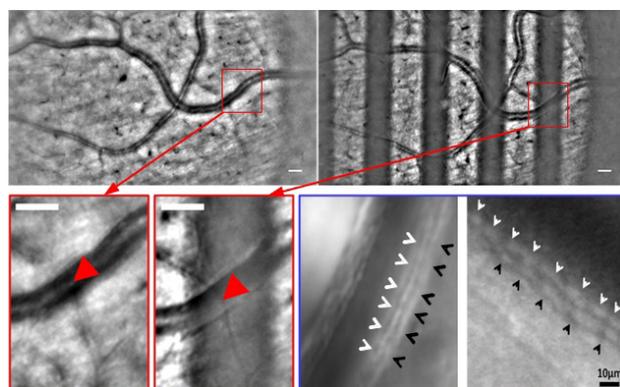


Figure 4. Effet de l'illumination structurée : images de vaisseaux rétiniens à 7° nasal (à 7° du centre de vision dans la direction du nez), en haut à gauche : Optique Adaptative plein champ [10] sous illumination classique et en haut à droite : sous projection de franges de 200 $\mu\text{m}$  ; encadrés en rouge : zooms sur vaisseaux (flèches).

Encadré en bleu : à gauche, triple paroi de vaisseaux vue en Optique Adaptative plein champ, et à droite en Optique Adaptative en champ sombre par balayage [11]

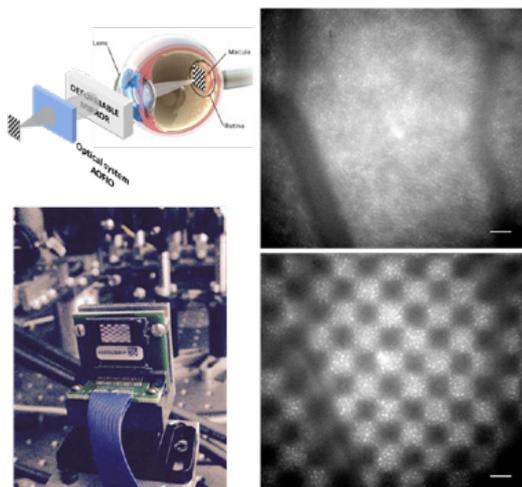


Figure 5. À gauche, schéma et photo de projection de damier par DMD (Digital Micromirror Device), et à droite : comparaison d'illumination classique en Optique Adaptative plein champ (haut) et illumination en damier (bas) : notez l'augmentation de contraste sur les photorécepteurs grâce à l'effet confocal apporté par le damier

## VERS LE TOUT DIGITAL

Et si, en plus de l'illumination, la correction des aberrations devenait elle aussi digitale ? C'est aujourd'hui possible en imagerie plein champ cohérente dite holographique. Ce mode d'imagerie permet l'acquisition de l'amplitude et de la phase du champ, et non seulement l'intensité comme en imagerie classique. Il est alors possible de propager à volonté ce champ dans différents plans, et d'y appliquer des corrections de phase de façon similaire à ce que fait le miroir déformable [12]. Cette technique, que nous développons déjà à l'hôpital des Quinze-Vingts (Paris), pourrait s'imposer comme le nouveau standard en imagerie de la rétine, pourvu que les algorithmes de correction digitale des aberrations deviennent suffisamment rapides pour permettre une correction en temps réel. Les nouvelles techniques d'apprentissage profond (ou deep learning) par noyaux convolutifs sont une piste privilégiée pour atteindre cet objectif.

Illumination digitale, correction de phase numérique, algorithmie innovante par réseaux de neurones ou noyaux convolutifs... la technologie ne freine plus les performances, le facteur limitant est aujourd'hui notre propre capacité à innover et à exploiter au mieux les possibilités qui s'offrent à nous. Et ces possibilités sont nombreuses, tant dans les modalités d'imagerie que dans les phénomènes à observer dans ce cerveau miniature sur lequel s'ouvrent nos pupilles !

La 3AF remercie la revue de la Société Française d'Optique, pour l'autorisation de publication de cet article antérieurement paru dans la revue Photoniques.

## RÉFÉRENCES

- Helga Kolb, *How the retina works*. *American Scientist* 2008, 91, 28-35
- Liang, J., Williams, D. R. & Miller, D. T. *Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics*. *J. Opt. Soc. Am. A* 14, 2884-2892 (1997).
- Roorda, A., & Williams, D. R. *The arrangement of the three cone classes in the living human eye*. *Nature* 397, 520-522 (1999).
- Roorda, A., Romero-Borja, F., Donnelly III, W. J., Queener, H., Hebert, T. J., and Campbell, M. C. W., «Adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy», *Opt. Express* 10, 405-412 (2002)
- Minsky, M. (1961). *Microscopy apparatus.confocal*
- Rossi, E. A., Granger, C. E., Sharma, R., Yang, Q., Saito, K. Schwarz, C., Walters, S., Nozato, K., Zhang, J., Kawakami, T., Fischer, W., Latchney, L. R., Hunter, J. J., Chung, M. M., Williams, D. R., *Imaging Individual Neurons in the Retinal Ganglion Cell Layer of the Living Eye*. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 17;114(3):586-591,(2017).
- Scoles, D., Sulai, Y. N., Langlo, C. S., Fishman, G. A., Curcio, C. A., Carroll, J., & Dubra, A. *In Vivo Imaging of Human Cone Photoreceptor Inner Segments*. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 55(7), 4244-4251. (2014).
- Bedggood, P., & Metha, A. (2012). *Direct visualization and characterization of erythrocyte flow in human retinal capillaries*. *Biomedical optics express*, 3(12), 3264-3277.
- Girouard, H., & Iadecola, C. (2006). *Neurovascular coupling in the normal brain and in hypertension, stroke, and Alzheimer disease*. *Journal of applied physiology*, 100(1), 328-335.
- Gofas Salas et al, *High loop rate Adaptive Optics Flood Illumination Ophthalmoscope with structured illumination capability*. *Applied Optics* 2018.
- Chui, T. Y. P., Gast, T. J., Burns, S. A. *Imaging of vascular wall fine structures in the human retina using adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy*. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 54 :7115-7124. (2013).
- Hillmann, D., Spahr, H., Hain, C., Sudkamp, H., Franke, G., Pfäffle, C., ... & Hüttmann, G. (2016). *Aberration-free volumetric high-speed imaging of in vivo retina*. *Nature Scientific reports*, 6

# Le MicroVasculoscope utilisant un éclairage laser et ses propriétés polarimétriques pour détecter les cancers de la peau

par Elise Colin Koeniguer, Xavier Orlik et Aurélien Plyer, ONERA

## L'ONERA, UN ORGANISME MULTIDISCIPLINAIRE

L'ONERA possède différents départements, travaillant aussi bien sur le développement de capteurs spécifiques au domaine aérospatial, que sur les traitements associés, et ce, dans tous les domaines du spectre électromagnétique. C'est en unissant les expertises acquises dans ces différents domaines qu'est née ITAE ([www.itae.fr](http://www.itae.fr)), une start-up issue de l'Onera, développant un nouvel appareil d'imagerie médicale, le MicroVasculoscope (voir Figure 1).



Figure 1. L'appareil MV1, constitué d'un système optique laser et d'une simple interface logicielle

Non seulement les chercheurs de l'ONERA ont pu s'inspirer de leurs connaissances des capteurs dédiés à l'industrie aérospatiale, mais en plus, ils ont pu combiner leurs compétences acquises dans deux domaines d'application en apparence très différents : l'imagerie radar pour l'observation terrestre et l'imagerie optique pour l'analyse de surfaces.

Dans cet article, il nous est apparu intéressant de présenter ces deux domaines d'expertise, et de montrer leurs liens, tant sur le sujet de l'imagerie cohérente dynamique que sur la polarimétrie, avant d'explicitier le transfert de technologie proprement dit du secteur aérospatial au secteur médical.

## LA GENÈSE D'UNE CONVERGENCE OPTIQUE ET RADAR

Les images obtenues par des systèmes d'imagerie cohérente, qu'elles soient générées par des ondes acoustiques ou électromagnétiques, ont la caractéristique commune de contenir des motifs (ou grains) de speckle. On entend par là des grains d'intensités variables résultant d'interférences entre les multiples contributions diffusées par l'objet illuminé. Ce phénomène est appelé en français 'chatolement' ou 'tavelure'. Ainsi, l'échographie médicale, le sonar, l'imagerie laser ou les images Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) sont entachées de ces grains plus ou moins brillants. La représentation de ce speckle est illustrée Figure 2.

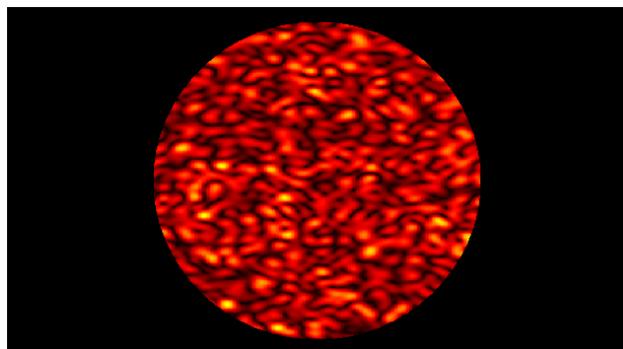


Figure 2. Motif de speckle

Dans la grande majorité des applications qui utilisent des ondes cohérentes, les grains de speckle sont considérés comme un bruit (acoustique ou optique) qui diminue la qualité de l'image. C'est pourquoi, de nombreuses méthodes sont mises en œuvre pour essayer de les supprimer. Cependant, les propriétés statistiques des grains de speckle contiennent, dans certaines conditions d'illumination et d'observation, des informations sur l'objet qui les a diffusés. Il peut donc s'avérer judicieux de les étudier. En effet, ces grains de speckle sont particulièrement sensibles aux phases relatives des multiples ondes cohérentes diffusées par l'objet ou la scène d'intérêt. Ils constituent de ce fait des détecteurs de mouvement sensibles et efficaces. L'étude des variations temporelles des grains de speckle constitue le large domaine du *speckle dynamique*.

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ

### LE MICROVASCULOSCOPE UTILISANT UN ÉCLAIRAGE LASER ET SES PROPRIÉTÉS POLARIMÉTRIQUES POUR DÉTECTER LES CANCERS DE LA PEAU

L'ONERA dispose de deux types de systèmes d'imagerie de speckle utilisés pour des applications aérospatiales. L'un d'eux, développé pour la métrologie des surfaces, analyse des images générées par illumination laser cohérente, dans le domaine optique (longueur d'onde du demi-micromètre). L'autre fait appel au Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) aéroporté, utilisé pour l'observation terrestre, avec des longueurs d'onde comprises entre le centimètre et le mètre.

Ces deux systèmes diffèrent par les longueurs d'ondes des rayonnements utilisés (un rapport de l'ordre du million) et par de nombreux autres paramètres : la largeur spectrale de la source, le principe de formation de l'image, la possibilité d'accéder à la phase du champ électrique complexe. Ils convergent cependant dans deux domaines : les propriétés polarimétriques du champ électromagnétique et la dynamique des interférences générant les grains de speckle.

La polarimétrie, c'est à dire la capacité de maîtriser les polarisations d'émission et de réception de l'onde utilisée pour former une image d'un milieu, permet d'enrichir considérablement l'information accessible par rapport à l'imagerie habituelle, dite, par opposition, "scalaire". Elle permet d'analyser des types de comportements d'un milieu ou d'une scène, en étudiant la rétrodiffusion de l'onde. Suivant l'anisotropie du milieu, l'onde est susceptible de subir des phénomènes d'absorption, de retard de phase, et de dépolarisation qui dépendent de l'orientation du champ électrique. Aussi, l'analyse polarimétrique fournit-elle des renseignements précieux sur la constitution du milieu et la géométrie de ses composants décrits à l'échelle de la longueur d'onde.

Cet avantage s'applique aux deux échelles d'observation, laser optique pour l'analyse du tissu biologique sur quelques millimètres et radar pour l'analyse de la végétation en observation terrestre sur des distances kilométriques.

#### APPLICATION AU DOMAINE RADAR

Depuis quelques années, on assiste en imagerie radar à un déluge de données sans précédent, qui rend possible une analyse temporelle de l'observation terrestre. Des satellites actuels, comme le satellite Sentinel 1 géré au sein du programme Copernicus de l'Agence spatiale européenne, fournissent des données d'observation tous les cinq jours sur une même scène. La télédétection

devient « dynamique ». Le projet de recherche MEDUSA de l'ONERA vise la dimension « big data » du traitement d'images en observation terrestre. Dans ce cadre, un algorithme appelé REACTIV a été proposé, qui permet de visualiser et détecter tous les changements observés au sein de la scène imagée, pendant une période de temps donnée, à l'aide d'une séquence d'images radar. Cet algorithme se base sur les propriétés statistiques temporelles du speckle. L'apport de la polarimétrie y a également été démontré : en sélectionnant une réponse polarimétrique appropriée plutôt qu'une autre, il est possible de mettre en avant des zones aux comportements statistiques plus ou moins singuliers par rapport aux statistiques stationnaires des zones stables. Par ailleurs, il est bien connu dans le domaine du radar, que la sélection d'une polarisation adéquate permet d'accéder à des profondeurs de pénétrations de l'onde plus importantes dans un milieu naturel comme un couvert végétal.

#### APPLICATION AU DOMAINE OPTIQUE

Parallèlement, des avancées majeures ont été réalisées sur les images de speckle dynamiques dans le domaine optique. L'étude de la dynamique des grains de speckle, permet de restituer les mouvements de l'objet ou de la zone observée.

La grandeur clé de l'imagerie dynamique de speckle est la même, qu'il s'agisse de l'optique ou du radar : il s'agit du *coefficient de variation temporel*. Dans le domaine optique, ce coefficient est souvent appelé coefficient de contraste.

#### VERS LE CANCER DE LA PEAU... ET BIEN D'AUTRES APPLICATIONS MÉDICALES

Le mélanome cutané est l'un des cancers les plus meurtriers. Il est en forte augmentation dans la plupart des pays développés. Le carcinome est plus répandu et moins dangereux, mais, non détecté à temps, l'exérèse des tumeurs soulève des problèmes importants en terme de préjudice esthétique et moral.

Aujourd'hui, la technique de détection des cancers cutanés repose sur l'observation visuelle de taches suspectes. Son efficacité n'est pas totalement satisfaisante : elle enregistre un taux d'échec de l'ordre de 20%. Or, la détection précoce est essentielle pour la réussite du suivi thérapeutique, car plus on détecte tôt le cancer,

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ LE MICROVASCULOSCOPE UTILISANT UN ÉCLAIRAGE LASER ET SES PROPRIÉTÉS POLARIMÉTRIQUES POUR DÉTECTER LES CANCERS DE LA PEAU

plus on a de chances de le guérir. C'est particulièrement vrai pour le mélanome : une fois la tumeur installée, elle métastase rapidement.

La première idée originale est d'utiliser la dynamique des grains de speckle à l'amélioration de l'efficacité de ce diagnostic. En filmant en temps réel les micromouvements sous-cutanés générés par les flux sanguins, il est possible de détecter de manière très précoce les zones cancéreuses et également de suivre leur évolution au long des thérapies.

Le rapport entre les flux sanguins ainsi détectés et la détection des tumeurs s'explique de la façon suivante. Le métabolisme des cellules tumorales est beaucoup moins performant que celui des cellules saines, et nécessite un apport en nutriments supérieur. D'autre part, la forte dynamique de division cellulaire des cellules cancéreuses augmente encore ce besoin et stimule donc les vaisseaux sanguins de voisinage, ce que l'imagerie permet de suivre.

Il restait cependant un verrou majeur à lever. En effet, même en utilisant des longueurs d'ondes et des temps d'intégration appropriés, la plus grande partie du signal de speckle est générée par les diffusions de surface de la peau. La seconde idée originale est de s'affranchir de cet inconvénient grâce à un *filtrage polarimétrique*, pour ne détecter que les photons multi-diffusés, issus de couches situées à plusieurs millimètres sous la peau.

Cette technique a permis d'obtenir des images inédites de la microvascularisation humaine (voir Figure 3).

Le principe de cette idée a été validé dans le cadre d'un projet de transfert clinique (APRTCN) cofinancé par la région Occitanie et l'ONERA, qui a impliqué l'IPBS (Institut de pharmacologie et de biologie structurale) et l'Oncopole de Toulouse. Le plan Physique cancer 2014-2019 nous a ensuite permis d'améliorer considérablement la qualité de l'image par l'optimisation de nombreux paramètres physiques et optiques.

Les images de speckle dynamique polarisé permettent ainsi de mettre en évidence des contrastes entre des zones vascularisées soumises à différentes dynamiques de micromouvements sous la peau. Le nouvel imageur utilisant ce principe a été baptisé *MicroVasculoscope*. La startup *ITAE Medical Research* ([www.itae.fr](http://www.itae.fr)) intégrant trois chercheurs de l'ONERA se charge de valoriser le brevet co-déposé par l'ONERA et le CNRS.

Comme pour toute nouvelle méthode d'imagerie médicale, il est encore difficile d'imaginer la totalité des applications. En plus de celles particulièrement prometteuses dans le domaine de la cancérologie, nous approfondissons actuellement de nouvelles potentialités au niveau du diabète, de la neurofibromatose et de la prise de greffes, par des collaborations avec des CHU. Notons qu'il serait possible d'envisager également une application à l'observation de l'activité virale en utilisant des temps d'observation de quelques minutes. Dans ce cas, la recherche de l'efficacité de molécules neutralisantes pourrait être grandement accélérée.

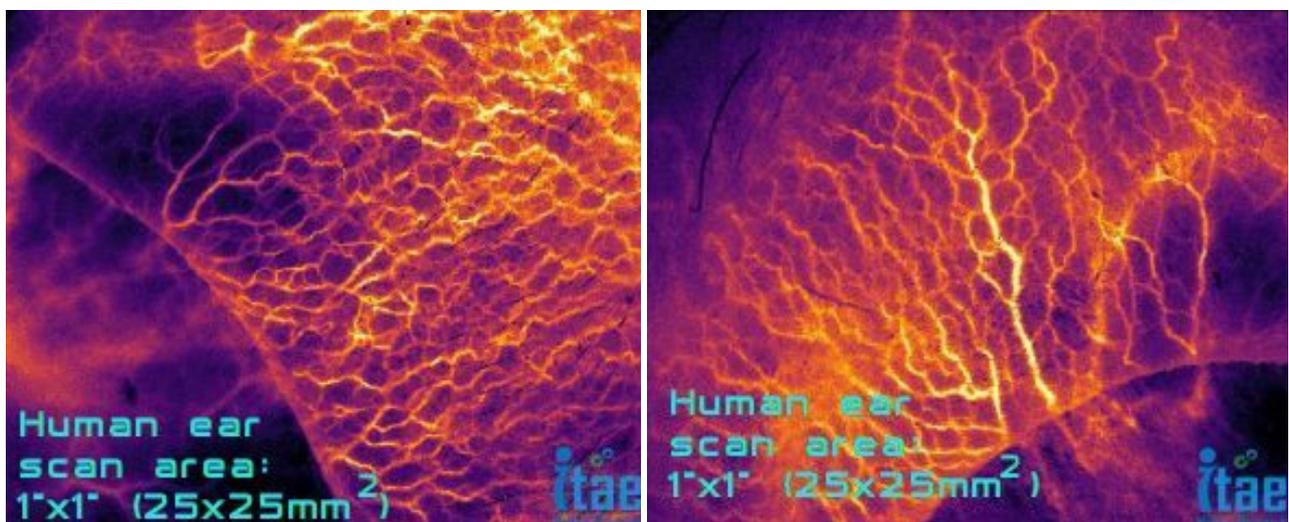


Figure 3. Images de microvascularisation observable sur l'oreille grâce au principe de speckle dynamique polarisé

Notons que cet appareil constitue une rupture technologique par rapport aux autres systèmes d'imagerie du domaine. D'abord, n'utilisant qu'une source laser de faible puissance, c'est un système non invasif, léger et non encombrant. Une photographie du système est illustrée sur la figure 1. Ensuite, c'est l'utilisation judicieuse de la polarisation qui lui confère les propriétés de pénétration de l'onde. Enfin, la nature même de l'information contenue dans les images diffère de celle des images habituelles d'IRM ou de scanner : ce n'est pas ici une imagerie de la structure tissulaire qui est mesurée mais une image des micromouvements locaux, 'naturellement' détectés par le speckle dynamique avec une résolution submicrométrique. Cette nouvelle méthode permet d'autre part une reconstruction de l'image en temps réel.

Cette nouvelle méthode semble n'être qu'à ses débuts. En effet, suite aux résultats obtenus par ce premier MicroVasculoscope, nous développons une imagerie d'activité grand champ à distance. Cette évolution permettra l'utilisation de l'instrument pour scanner de grandes surfaces, et de s'affranchir d'un opérateur pour un monitoring plus long. Une vidéo de résultats préliminaires disponible sur le site <https://www.itaefr.fr/nos-objectifs> illustre le potentiel de cet instrument pour visualiser la vascularisation à l'échelle d'un corps humain. ■

## Modélisation numérique des écoulements dans les voies respiratoires supérieures : l'aérodynamique au service de la chirurgie ORL

par Gilles Bouchet, Laboratoire IUSTI – CNRS/Aix Marseille Université, en collaboration avec le service d'ORL et Chirurgie Cervico-Faciale du CHU La Conception – APHM

*Le laboratoire IUSTI (UMR 7343) a une grande expérience dans la modélisation numérique des écoulements de l'incompressible au supersonique. Pour cette application biomédicale, nous avons utilisé un code qui nous sert habituellement pour des applications dans le domaine de l'aéronautique et de l'espace.*

La chirurgie fonctionnelle du nez a pour but d'améliorer la fonction ventilatoire nasale. Elle peut également avoir des répercussions esthétiques bien que son objectif principal ne soit pas l'embellissement du nez mais le traitement de l'obstruction nasale. Cette dernière est, en France, le 4ème motif de consultation en Oto-Rhino-Laryngologie (rapport CNP ORL 2013). La sensation d'avoir le nez bouché peut être considérée comme un problème de santé publique car sa prévalence est estimée à plus de 30% de la population. Le coût direct annuel de sa prise en charge a été estimé aux USA à 5 milliards de

dollars, dont 60 millions liés à la chirurgie (1)(2). Au coût direct, il faut ajouter les coûts indirects, plus difficiles à évaluer, représentés par la baisse de productivité au travail et l'absentéisme généré par l'obstruction nasale. De plus, l'obstruction nasale est un facteur de sévérité pour plusieurs pathologies telles que le syndrome d'apnée obstructive du sommeil et l'asthme (3)(4).

Le rôle du praticien ORL, lorsque le patient exprime cette plainte, est de définir la ou les causes d'obstruction nasale afin de pouvoir décider au mieux du traitement adapté, qu'il soit médical ou chirurgical. Le plus souvent, l'insuffisance de passage de l'air est due à une trop grande étroitesse des couloirs respiratoires. On oppose classiquement les causes architecturales, liées à une anomalie du squelette ostéo-cartilagineux des fosses nasales et qui relèvent plutôt d'un traitement chirurgical, aux causes inflammatoires, liées à une hypertrophie de la

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES ÉCOULEMENTS DANS LES VOIES RESPIRATOIRES SUPÉRIEURES

muqueuse nasale et qui relèvent souvent d'un traitement médical. Toutefois, il est désormais rapporté qu'un excès de largeur des fosses nasales peut, lui aussi, être responsable d'une sensation d'obstruction nasale qui est, alors, dite paradoxale. Cette pathologie, appelée syndrome du nez vide, survient chez certains patients opérés d'un nez bouché avec amputation totale des cornets du nez, structures anatomiques intervenant dans le conditionnement (réchauffement, épuration des particules et humidification) de l'air inspiré. Dans le syndrome du nez vide, il semble exister un défaut conformationnel (excès de largeur), mais aussi un défaut de conditionnement d'air qui aboutit à la sensation d'obstruction nasale. Cette pathologie met en évidence que la sensation de bien-être respiratoire nasale n'est pas uniquement liée à la quantité d'air traversant les fosses nasales à chaque inspiration. Le conditionnement de l'air lors de cet écoulement, tout comme le fait que le passage de l'air soit ressenti par l'individu, doivent aussi être pris en compte. Le syndrome du nez vide est également la démonstration qu'un geste chirurgical inadapté peut aggraver un problème au lieu de le résoudre.

La plainte d'obstruction nasale du patient découle donc, (i) soit d'une insuffisance de passage de l'air, (ii) soit d'un défaut de conditionnement de l'air, (iii) soit encore d'un défaut de détection du passage de l'air.

Ainsi, le diagnostic étiologique de l'obstruction nasale doit prendre en compte :

- l'architecture des fosses nasales évaluée par l'examen clinique, l'endoscopie et l'imagerie (tomodensitométrie) ;
- la trophicité et l'état inflammatoire ou non de la muqueuse nasale évaluée par l'endoscopie ;
- l'absence de certaines structures intervenant dans le conditionnement et la détection de l'air.

La première difficulté rencontrée par le praticien ORL reste l'objectivation de la plainte du patient, symptôme très subjectif. De nombreux examens paracliniques ont été développés pour l'aider dans cette démarche comme la rhinomanométrie qui permet, à partir de la mesure des débits et des pressions de l'air lors de la respiration, de calculer la résistance à l'écoulement de l'air. Toutefois, ces examens, pour utiles qu'ils soient, ne sont pas toujours corrélés au ressenti du patient.



Figure 1. Système de rhinomanométrie antérieure active. Pendant le test, le patient respire avec une fosse nasale, l'autre étant volontairement obstruée. Grâce à un capteur de pression et un débitmètre, il est possible de calculer la différence de pression entre l'entrée de la fosse nasale et le rhinopharynx, donc de mesurer la perte de charge  $\Delta P$  [<https://www.otopront.de>]

Au total, à ce jour, plusieurs questions se posent à l'ORL qui prend en charge ces pathologies :

- est-il possible d'objectiver de manière fiable la plainte d'obstruction nasale du patient ?
- est-il possible d'identifier la ou les cause(s) de ce symptôme ?
- est-il possible de visualiser les effets qu'aurait tel ou tel geste chirurgical sur le passage de l'air mais aussi et surtout sur le ressenti du patient ?

Tenter d'améliorer l'examen ou de préparer l'acte chirurgical par la seule voie clinique est problématique, voire impossible, du fait de la très grande diversité morphologique entre individus, de la complexité de l'anatomie nasale et de l'impossibilité d'intégrer in vivo des capteurs de mesure trop intrusifs au sein des cavités nasales sans en modifier la physiologie.

La voie qui semble actuellement la plus prometteuse pour progresser dans la connaissance du fonctionnement du nez et la maîtrise de l'acte chirurgical ou médicamenteux semble être la voie in silico.

### MODÉLISATION NUMÉRIQUE

C'est dans ce contexte que le laboratoire IUSTI, en collaboration avec le service d'ORL et Chirurgie Cervico-Faciale du CHU La Conception – APHM, s'est lancé il y a quelques années dans le développement d'un nez virtuel multi-physique ayant pour vocation d'aider le

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ

### MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES ÉCOULEMENTS DANS LES VOIES RESPIRATOIRES SUPÉRIEURES

médecin ORL lors de son diagnostic puis du dialogue qui s'en suit avec le patient, d'aider le chirurgien ORL lors de la préparation de son geste chirurgical en proposant les solutions les plus optimales, et enfin, d'aider à l'élaboration ou à l'amélioration de l'administration topique de médicaments.

Le Laboratoire IUSTI a une grande expérience dans la modélisation numérique des écoulements avec ou sans transfert de masse, avec ou sans transfert de chaleur, que ce soit du régime de Stokes aux régimes pleinement turbulents, de l'incompressible au supersonique. Pour cette application biomédicale, nous avons utilisé un code volumes finis qui nous sert habituellement pour des applications dans le domaine de l'aéronautique et de l'aérospatiale ; il est basé sur des maillages non-structurés, incluant une large gamme de modèles de discrétisation spatiale et temporelle, de turbulence, de chimie, et des fonctionnalités de couplage fluide-structure.

La première modélisation de l'écoulement d'air dans le nez par simulation numérique à partir du scanner d'un patient a été réalisée en 1995 (5). Depuis, on peut recenser à travers le monde une cinquantaine d'études CFD portant sur l'adulte ou l'enfant.

La première étape de la méthodologie développée au IUSTI consiste à extraire la géométrie de l'anatomie des voies ventilatoires d'un patient à partir d'une tomodensitométrie. Les scanners réalisés à l'APHM sont obtenus en utilisant un protocole « low-dose » selon une acquisition cranio-caudale.

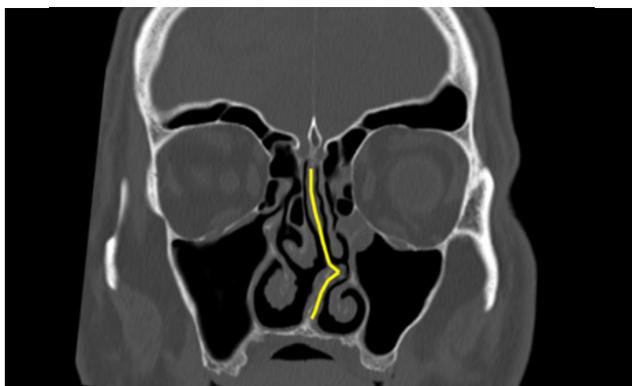


Figure 2. Scanner en coupe coronale et en fenêtre osseuse ; les zones noires correspondent aux parties fluide (l'air) ; les zones blanches correspondent aux parties osseuses ; les zones grises correspondent aux parties molles (muqueuses, cartilages et tissus mous). En jaune, on peut voir que le patient est atteint d'une déviation septale (ici côté gauche)

Une fois le scanner réalisé, il faut définir la surface tridimensionnelle séparant le milieu fluide du milieu solide. La génération du modèle surfacique est réalisée grâce au logiciel de segmentation semi-automatique d'images ITK-SNAP® qui permet de superviser le processus de segmentation. La segmentation repose sur une détermination du seuil séparant au mieux les cavités aériques naso-sinusiennes des structures ostéo-cartilagineuses et des parties molles adjacentes. Cette étape est primordiale afin de coller au plus près à la vraie géométrie des voies respiratoires, et délicate : si le seuil choisi est trop bas, la segmentation risque d'englober les régions voisines présentant un niveau de gris inclus dans la plage de seuillage (telle que la muqueuse ou le cartilage) et si le seuil est trop haut, certaines régions étroites dans lesquelles l'air circule apparaîtront non perméables (bouchées) sur notre modèle. Pendant le seuillage, les régions ainsi sélectionnées sont visualisées sur trois coupes (transversale, coronale, sagittale). Cela permet à l'utilisateur d'évaluer la qualité du seuillage sur différentes coupes 2D et de l'adapter de manière dynamique pour reconstruire une géométrie 3D correspondant au domaine que l'on cherche à extraire.

Une extraction 3D du modèle est alors possible au format STL : cela marque la fin de l'étape de CAO.

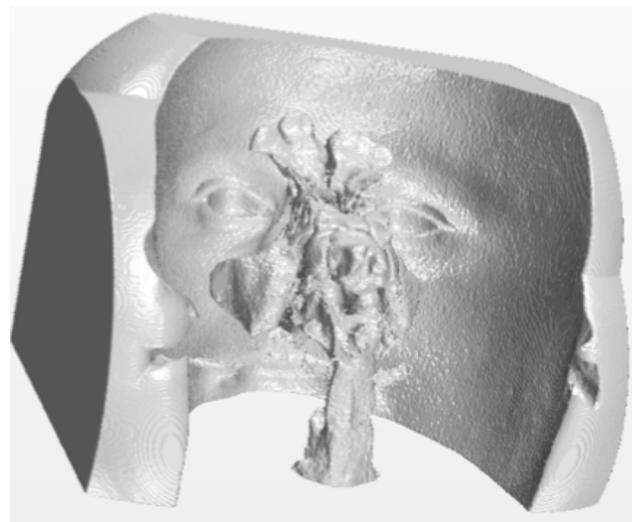


Figure 3. Visualisation des volumes d'air après processus de segmentation tridimensionnel

La surface 3D doit ensuite être retravaillée : il faut éliminer du futur domaine de calcul tous les volumes aériens n'étant pas reliés aux cavités naso-sinusiennes (cellules mastoïdiennes par exemple), il faut lisser les surfaces afin d'améliorer la qualité de l'état de surface

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES ÉCOULEMENTS DANS LES VOIES RESPIRATOIRES SUPÉRIEURES

pour diminuer l'aspect crénelé dû à l'espacement entre les coupes scannographiques (les voxels sont en général de l'ordre de 0,3 à 0,5 mm) ce qui aurait une incidence sur l'écoulement modélisé, et pour finir, il faut créer une surface (sphère) extracorporelle suffisamment loin de l'entrée du nez pour imposer une condition limite ne perturbant pas l'écoulement.

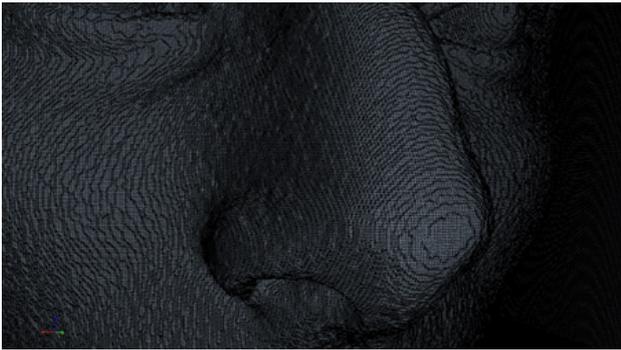


Figure 4. Aspect crénelé de la surface générée par le tomographe

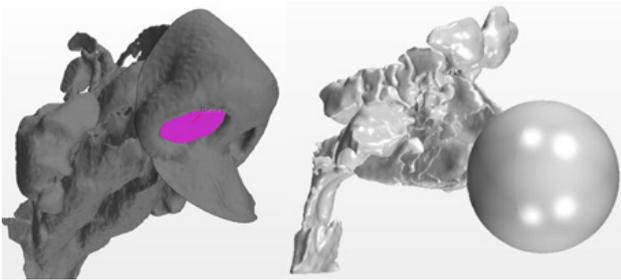


Figure 5. Domaine de calcul de l'air naso-sinusien s'étendant du pharynx à la pointe du nez, avec et sans la sphère

Le domaine de calcul est ensuite maillé dans le volume à l'aide de cellules polyédriques et dans les couches limites à l'aide de cellules prismatiques. La taille du maillage obtenu est de l'ordre de 10 millions de cellules.

L'écoulement est ensuite modélisé par résolution des équations de Navier-Stokes couplées à l'équation de l'énergie, avec un code de type volumes finis. L'écoulement et le conditionnement de l'air sont enfin analysés en post-traitement à l'aide de plusieurs variables : le débit d'air passant par chaque fosse nasale, les résistances nasales – pertes de charge –, les transferts de chaleur (Heat Flux) entre la muqueuse et l'air, le frottement pariétal (Wall Shear Stress), les températures et vitesses en différents points...



Figure 6. Coupe au sein du domaine de calcul après maillage volumique montrant les éléments constitutants

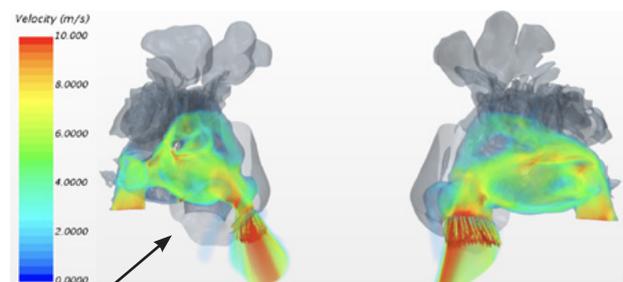


Figure 7. Champ de vitesse à l'expiration (le patient présentait ici une obstruction nasale droite quasi totale : on ne visualise pas d'écoulement au niveau de la fosse nasale droite [voir flèche])

Grâce à ce protocole, il nous est donc possible de caractériser de façon hydrodynamique l'écoulement à travers les voies respiratoires supérieures d'un patient : on peut détecter localement les pertes de charge plus ou moins importantes, les échanges thermiques plus ou moins intenses... mais, à ce stade, nous sommes encore incapables de prédire si le patient en question respire

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ

### MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES ÉCOULEMENTS DANS LES VOIES RESPIRATOIRES SUPÉRIEURES

confortablement ou non. L'aérodynamicien se retrouve donc dans la même situation que le médecin ORL qui dispose de mesures de débits et de pertes de charge issues de différents examens cliniques (rhinomanométrie, rhinométrie acoustique...) et qu'il doit corrélérer au ressenti du patient, à ceci près que l'aérodynamicien peut faire des mesures locales, alors que le médecin n'a accès qu'à des mesures globales. L'évaluation du ressenti subjectif du patient est le travail du clinicien qui, pour se faire, s'appuie sur différents questionnaires (NOSE, EVA, SNOT-22, ENS6Q...).

Nous avons mené une large étude sur plusieurs dizaines de patients atteints d'une obstruction nasale en rapport avec une cause architecturale (déviation septale) pour tenter de corrélérer les grandeurs issues de nos simulations numériques aux évaluations subjectives (6)(7). Il est apparu que le Heat Flux était la meilleure variable CFD en termes de corrélations avec le ressenti du patient ; viennent ensuite le Wall Shear Stress et enfin les débits à travers chaque fosse nasale. Les corrélations entre les résistances nasales (pertes de charge) calculées numériquement et le ressenti du patient sont faibles en l'absence de correction du cycle nasal (en toute rigueur, la géométrie des voies respiratoires supérieures varie légèrement selon un cycle de plusieurs heures). D'autres études doivent encore être menées pour prendre en compte l'hygrométrie. Il est également apparu que les corrélations entre le Heat Flux et le ressenti du patient était bien meilleure que celles entre les examens paracliniques et le ressenti du patient. De plus, grâce à l'analyse par CFD, il est possible de visualiser les zones responsables de l'inconfort du patient. Des études menées sur le syndrome du nez vide retrouvaient des résultats différents.

#### CHIRURGIE VIRTUELLE

Pour aider le chirurgien ORL dans la préparation de son acte chirurgical, nous avons mis au point une technique permettant de faire de la chirurgie virtuelle pré-opératoire (8). La chirurgie virtuelle consiste tout simplement à modifier numériquement l'architecture importée depuis une tomographie et à tester son effet par CFD. L'objectif n'est pas de déterminer la solution optimale du point de vue de ce que pourrait ressentir le patient après l'opération, mais de tester ce que le chirurgien pourrait faire a minima avec son bistouri pour améliorer la vie de son patient, sans pour autant que son geste chirurgical ne soit trop invasif.

Au vu des propriétés anatomiques et physiologiques des constituants du nez, l'étude de la cloison nasale apparaissait comme la plus intéressante car c'est une structure non déformable, sans variation intra-individuelle au cours du temps.

Ainsi, parmi toutes les pathologies nécessitant une intervention chirurgicale, nous avons choisi la déviation septale que l'on peut corriger par une septoplastie. Les déviations septales représentent la cause principale d'obstruction nasale. Une déviation septale, droite et/ou gauche, entraîne une obstruction anatomique au passage de l'air dans les fosses nasales, et donc une sensation d'inconfort respiratoire pour le patient. L'obstruction nasale due à la déviation septale est en général permanente et unilatérale, contrairement à celle due à l'hypertrophie turbinale qui varie souvent au cours du temps.

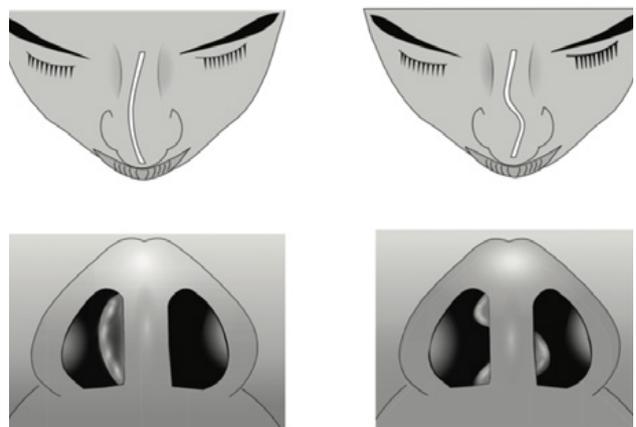


Figure 8. Dessins des différents types de déviations septales (9) ; à gauche, on retrouve les déviations en C, antérieures ; à droite, les déviations septales en S, plus complexes mais dont le retentissement fonctionnel est souvent moins important

La modification (correction) de la géométrie nasale est réalisée 'à la main' en deux étapes : une première modification architecturale avec le logiciel ITK Snap® et un lissage sur le maillage surfacique, avant maillage volumique.

Pour cette étude, nous avons pu bénéficier de quelques cas rares de tomographies pré- et post-opératoires.

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES ÉCOULEMENTS DANS LES VOIES RESPIRATOIRES SUPÉRIEURES

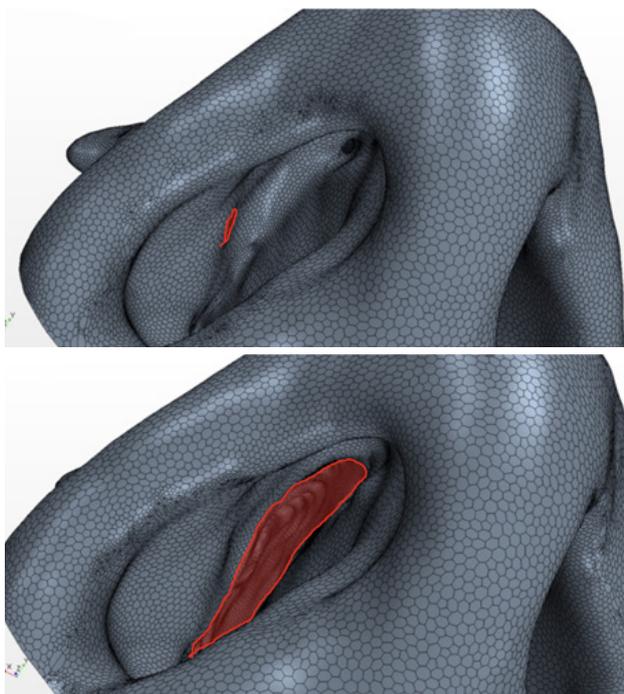


Figure 9. Vue tridimensionnelle antéro-inférieure d'un patient avant (en haut) et après (en bas) chirurgie virtuelle. La section correspondant au passage de l'air est colorée en rouge

Dans un premier temps, nous avons identifié l'origine des gênes respiratoires des patients proposés par une étude CFD réalisée à partir des tomodographies pré-opératoires. Dans un deuxième temps, nous avons évalué les gestes chirurgicaux effectués par les chirurgiens ORL en réalisant une étude CFD à partir des tomodographies réalisées « après chirurgie réelle ».

Afin de déterminer si la chirurgie virtuelle pouvait prédire les résultats post-opératoires, nous avons modifié le modèle pré-opératoire par chirurgie virtuelle afin de coller au mieux avec le modèle « après chirurgie réelle ».

Enfin, dans une dernière étape, nous avons proposé notre propre chirurgie virtuelle que nous avons évaluée par étude CFD et comparée aux résultats « après chirurgie réelle ».

En comparant les modèles chirurgie virtuelle et « après chirurgie réelle », nous n'avons pas trouvé de différence statistiquement significative pour le Heat Flux, le Wall Shear Stress, la perte de charge, les débits et les températures, que ce soit lors de l'inspiration ou de l'expiration, ce qui nous a permis de valider la procédure de chirurgie virtuelle.

A l'inspiration, les variables CFD pré-opératoires étaient significativement différentes des variables CFD post-opératoires (par chirurgie virtuelle ou « après chirurgie réelle ») et correspondaient à l'évaluation clinique des patients, permettant ainsi de bien mettre en évidence l'effet de l'acte chirurgical.

Enfin, nous avons montré une légère différence entre les variables CFD « après chirurgie réelle » et après notre propre chirurgie virtuelle laissant entrevoir une légère amélioration par rapport à la chirurgie réelle, mais sans que l'on puisse bien sûr l'évaluer cliniquement.

### PERSPECTIVES

Nous avons montré qu'il était possible de modéliser numériquement l'écoulement dans les voies respiratoires supérieures et d'apporter ainsi des informations cruciales au médecin ORL lui permettant d'évaluer de façon objective certaines pathologies comme la déviation septale ou le syndrome du nez vide. Nous avons également montré que CFD et chirurgie virtuelle pouvaient devenir des outils indispensables à la préparation de l'acte chirurgical.

Si la pertinence de l'approche par CFD du fonctionnement du nez n'est plus à démontrer, tant l'écho auprès des médecins ORL est grand, le chemin à parcourir pour mettre au point un véritable nez virtuel capable d'aider au diagnostic ou à l'acte chirurgical, manipulable par un médecin ORL non rompu à l'aérodynamique et à la modélisation numérique, et avec un temps de retour compatible avec l'emploi du temps surchargé d'un chirurgien, reste encore long et parsemé de nombreux verrous tant physiologiques que techniques.

La méconnaissance du fonctionnement précis de la muqueuse nasale du point de vue de la régulation en température et en hygrométrie nous conduit à imposer des conditions aux limites qui sont vraisemblablement loin de la réalité et qui très certainement induisent des erreurs dans la modélisation et dans la détermination des grandeurs physiques telles que le flux de chaleur ou le cisaillement en parois.

Pour des raisons d'irradiation, la qualité des scanners réalisés rend souvent difficile l'extraction de la géométrie de l'écoulement, ce qui induit nécessairement des erreurs sur la modélisation numérique. Pour les mêmes raisons, il existe très peu de scanners pré- et post- opératoires

# SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ

## MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES ÉCOULEMENTS DANS LES VOIES RESPIRATOIRES SUPÉRIEURES

permettant une évaluation objective de l'acte chirurgical du point de vue de la mécanique des fluides, en vue du développement d'un outil permettant d'anticiper l'acte chirurgical par chirurgie virtuelle.

La très grande diversité anatomique entre individus nous oblige à simuler chaque cas de façon indépendante (chaque cas représentant des temps CPU de plusieurs centaines d'heures). Enfin, les scanners sont réalisés de façon aléatoire au cours du cycle nasal (de l'ordre de 4 heures) et au cours du cycle respiratoire, et ne sont donc pas nécessairement représentatifs de tous les états du nez qui subit des déformations plus ou moins importantes au cours de ces cycles. Une modélisation de la déformabilité des cavités nasales semble donc nécessaire, pour l'étude de certaines pathologies comme le collapsus de la valve.

Le chemin est encore long mais ô combien exaltant.

### ÉQUIPE

Ce travail est une collaboration forte entre le laboratoire IUSTI et le service d'ORL et Chirurgie Cervico-Faciale du CHU La Conception – APHM : Lionel MEISTER (Ingénieur d'Étude - Calcul Scientifique, CNRS), Pierre PERRIER (Ingénieur de Recherche, CNRS), Jérôme GIORDANO (MdC Aix-Marseille Université), Justin MICHEL (PU-PH Aix-Marseille Université), Thomas RADULESCO (MCU-PH Aix-Marseille Université), Patrick DESSI (PU-PH Aix Marseille Université), Martin PENICAUD (PH à l'Hôpital de la Conception – APHM).

### CONSIDÉRATIONS ÉTHIQUES

Pour tous ces travaux, les patients ont donné leur consentement avant de participer à l'étude, qui a été conduite en accord avec la Déclaration d'Helsinki. Nous avons obtenu l'accord du comité d'éthique de l'APHM (APHM N°2017-14-12-005).

### BIBLIOGRAPHIE

1. Akerlund A, Millqvist E, Oberg D, Bende M, *Prevalence of upper and lower airway symptoms: the Skövde population-based study*, *Acta Otolaryngol*, 126(5):483-8 (2006).
2. Kimmelman CP, *The problem of nasal obstruction*, *Otolaryngol Clin North Am.*, 22(2):253-64 (1989).
3. Lofaso F, Coste A, d'Ortho MP, Zerah-Lancner F, Delclaux C, Goldenberg F, et al., *Nasal obstruction as a risk factor for sleep apnoea syndrome*, *Eur Respir J.*, 16(4):639-43 (2000).
4. Hallani M, Wheatley JR, Amis TC, *Enforced mouth breathing decreases lung function in mild asthmatics*, *Respirology*, 13(4):553-8 (2008).
5. Balakin BV, Farbu E, Kosinski P, *Aerodynamic evaluation of the empty nose syndrome by means of computational fluid dynamics*, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 20(14):1554-61 (2017).
6. Radulesco T, Meister L, Bouchet G, Varoquaux A, Giordano J, Mancini J, Dessi P, Perrier P, Michel J, *Correlations between Computational Fluid Dynamics and clinical evaluation of nasal airway obstruction due to septal deviation: an observational study*, *Clinical Otolaryngology*, 44:603-611 [DOI: 10.1111/coa.13344] (2019).
7. Radulesco T, Meister L, Bouchet G, Giordano J, Dessi P, Perrier P, Michel J, *Functional relevance of computational fluid dynamics in the field of nasal obstruction: a literature review*, *Clinical Otolaryngology*, 44:801-809 [DOI: 10.1111/coa.13396] (2019).
8. Radulesco T, Meister L, Bouchet G, Giordano J, Dessi P, Perrier P, Michel J, *Computational Fluid Dynamics and septal deviations: virtual surgery can predict postsurgery results. A preliminary study including 2 patients*, *Clinical Otolaryngology*, 45:286-291 [DOI: 10.1111/coa.13495] (2020).
9. Teixeira J, Certal V, Chang ET, Camacho M, *Nasal Septal Deviations: A Systematic Review of Classification Systems*, *Plast. Surg. Int.*, 7089123 (2016). ■

# La reconstruction du tractus de sortie du ventricule droit

par Dominique Charbonnier et Jan Vos, CFS Engineering, EPFL Innovation Park A, Lausanne

Le code de CFD, NSMB (Navier-Stokes Multi-Blocks), utilisé dans cette étude a été développé et employé depuis plus de 25 ans pour des applications dans le domaine de l'aéronautique et de l'aérospatiale, et fait partie des codes de calcul utilisés actuellement par Ariane Group. NSMB est un solveur de volumes finis, basé sur des maillages structurés multi-blocs, initialement développé à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, et à partir de 1993 dans un consortium européen composé de différentes universités, établissements de recherche et industries (dont Airbus France jusqu'en 2003). NSMB inclut une large gamme de modèles de discrétisation spatiale et temporelle, de turbulence, de chimie pour les applications hypersoniques, de fonctionnalités de couplage fluide-structure, ainsi que d'algorithmes de préconditionnement permettant son utilisation pour des écoulements incompressibles. Par conséquent, son application dans le domaine du biomédical, permet d'analyser les écoulements dans le système cardiovasculaire, et d'extraire des données caractéristiques comme la pression pariétale, les contraintes de cisaillements, difficilement accessibles par des mesures expérimentales non intrusives.

Un glossaire est donné à la fin de l'article

## INTRODUCTION

La reconstruction du tractus de sortie ventriculaire droit (noté RVOT - Right Ventricular Outflow Tract), ou tronc pulmonaire (numéroté 4 sur la Figure 1), est une étape importante dans la réparation des défauts conotrunculaires complexes. Bien qu'il existe de nombreuses alternatives pour la reconstruction du RVOT, à ce jour, aucun conduit idéal entre le ventricule droit et l'artère pulmonaire n'a été trouvé. Outre l'homogreffe, la greffe du conduit de la veine jugulaire bovine (Contegra graft, Medtronic Inc., Minneapolis, MN, USA) est à la pointe de la technologie en matière de reconstruction chirurgicale du RVOT. Le greffon Contegra est un conduit prêt à l'emploi, disponible dans une large gamme de tailles et a été considéré comme un excellent substitut à la valve pulmonaire. Cependant, après l'enthousiasme initial, un taux de réintervention élevé à court terme est devenu évident [1]. L'âge, la petite surface corporelle et la petite taille du conduit ont été identifiés comme des facteurs prédictifs [1, 2]. Il est évident que l'âge et la taille du greffon sont en relation inverse et indiquent l'impact de la croissance somatique dans cette pathologie. Pour

éviter ce phénomène, le surdimensionnement des greffes a été préconisé [1, 2]. Cependant, il est évident que la croissance somatique n'est pas la raison principale des taux de réintervention relativement élevés [3, 4]. La dégénérescence et la détérioration structurelle de la valve implantée, une sténose de l'artère pulmonaire et une anastomose distale sont les raisons les plus fréquentes de réintervention [4]. En tant que tels, les mécanismes exacts et les détails de la défaillance du conduit ne sont pas clairs. Il semble également que l'hyperplasie de l'intima, conséquence d'une hémodyalyse locale, soit l'un des éléments les plus importants de cette pathologie [5-7]. Malgré le fait que des éléments hémodynamiques locaux puissent déclencher l'activation d'un processus pro-athérogène dans la paroi vasculaire, il n'y a pas eu à ce jour d'évaluation des conditions de pression locale et de contrainte de cisaillement dans les RVOT surdimensionnés.

Notre modèle hémodynamique RVOT de 12 mm a identifié le profil de pression et de contrainte de cisaillement susceptible de provoquer un remodelage endothélial au niveau de la bifurcation des artères pulmonaires [8].

Comme le surdimensionnement du RVOT avec des conduits à valve est bien établi dans la reconstruction du défaut conotrunculaire, le but de cette étude est de fournir un RVOT de 12 mm (surdimensionné de 4, 6 et 8 mm) pour identifier les conditions hémodynamiques locales qui peuvent contribuer à la dégénérescence précoce de la paroi et à la défaillance du conduit. Cette approche peut permettre d'élucider et de prédire le degré optimal de surdimensionnement des conduits dans un RVOT donné.

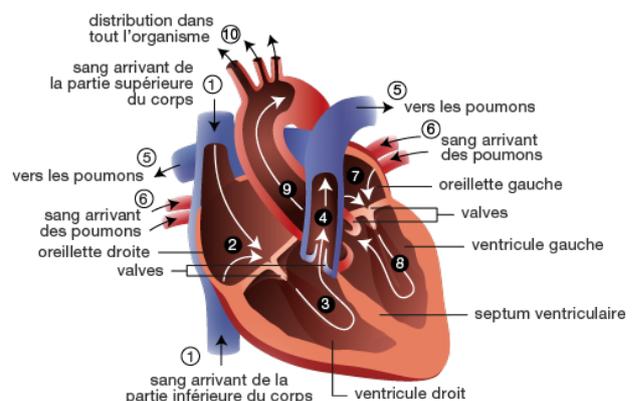


Figure 1. Anatomie du cœur ©CTO-CHUV

MÉTHODOLOGIE

Des simulations numériques de dynamique des fluides (CFD) ont été réalisées pour chaque taille de Contegra (12, 16, 18 et 20 mm), du RVOT jusqu'à la bifurcation de l'artère pulmonaire. L'interprétation géométrique de la RVOT, de la racine pulmonaire et de la bifurcation était basée en partie sur nos résultats précédents [8] et en partie sur les résultats expérimentaux obtenus après l'autopsie [8]. L'écoulement sanguin a été modélisé comme un fluide newtonien avec une viscosité de  $4 \times 10^{-3}$  Pa.s et une densité de 1060 kg/m<sup>3</sup>. Les parois des artères ont été soumises à des conditions de non-glissement. Les conditions de pression atmosphérique (101,325 Pa) ont été fixées dans les deux régions de sortie des artères. À l'entrée de l'artère pulmonaire, diverses conditions limites ont été appliquées selon le cas considéré. Un profil plat à vitesse constante avec une valve pulmonaire ouverte a été appliqué en fonction des débits mesurés expérimentalement de 1.5, 2.0 et 2.5 l/min. Le solveur CFD Navier-Stokes multi-blocs structurés (NSMB), développé et utilisé à CFS Engineering, est basé sur une méthode de volume fini centré sur la cellule pour résoudre les équations de Navier-Stokes compressibles. La discrétisation spatiale était assurée par un schéma central de quatrième ordre, tandis que la discrétisation temporelle était résolue par un schéma implicite. Le logiciel de génération de maillage ANSYS ICEMCFD a

été utilisé pour générer le maillage structuré multi-blocs nécessaire au solveur NSMB. Une topologie de grille de type O a été appliquée pour affiner le maillage près des parois afin de capter correctement les couches limites laminaires dans ces régions. La grille pour l'artère pulmonaire lisse comprend 19 blocs structurés pour environ 365,000 cellules [8]. Des données expérimentales (par exemple le débit et la pression) ont été utilisées comme conditions limites pour le modèle CFD. Le modèle CFD permet d'évaluer les profils de pression, de vitesse et de contrainte de cisaillement, et les valeurs de la position sous-valvulaire dans le RVOT ont été comparées à celles de la sortie des artères pulmonaires gauche et droite pour trois profils de vitesse d'entrée différents [8]. Le profil de vitesse, le profil de contrainte de cisaillement et le débit ont été moyennés temporellement et dans une section transversale du RVOT, de la région infravalvulaire, de la région supervalvulaire, de l'artère pulmonaire, de la bifurcation et des deux artères pulmonaires pour les trois débits et pour les quatre géométries surdimensionnées.

RÉSULTATS

Profils de vitesse

Les profils de vitesse locaux sont présentés Figure 2. La moyenne de ces zones de vitesse a été calculée au centre du modèle RVOT. La gamme de vitesse était dans

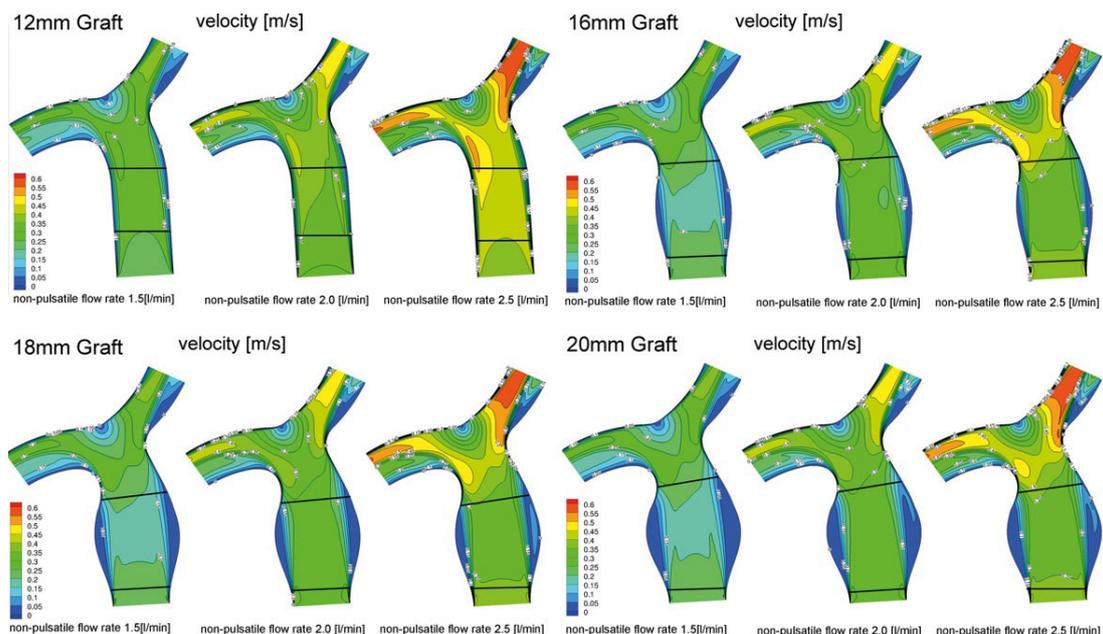


Figure 2. Profils de vitesse pour quatre géométries RVOT à trois différents débits non pulsatiles. Les zones de faible vitesse sont marquées en bleu, et se situent entre 0 et 0,15 m/s. Les valeurs de vitesse modérément élevées sont comprises entre 0,2 et 0,4 m/s et sont marquées en vert. Les zones de vitesse élevée sont marquées en jaune et en rouge et se situent entre 0,45 et 0,6 m/s. La ligne continue indique le site d'anastomose distal et proximal du greffon Contegra.

la gamme modérée, entre 0,2 et 0,4 m/s, indépendamment de la vitesse d'entrée du RVOT jusqu'à la bifurcation dans les quatre tailles de greffe. Il est à noter que la paroi des côtés gauche et droit des zones de faible vitesse du tronc pulmonaire peut être trouvée indépendamment de la taille du greffon et de la vitesse d'entrée. Cette zone est relativement étroite pour les greffons de 12 et 16 mm, mais est plus évidente dans les diamètres de 18 et 20 mm. Pour les quatre dimensions de greffon, les ostiums des artères pulmonaires gauche et droite ont été soumis à des zones de haute vitesse comprises entre 0,4 et 0,6 m/s et, dans certains cas, à des valeurs plus élevées dans l'artère pulmonaire droite. Une transition rapide entre les zones centrales à grande vitesse et les zones à faible vitesse au niveau de la paroi antérieure des deux artères pulmonaires peut être observée dans les quatre greffes Contegra. Cette constatation peut être due au fait que la courbure de l'artère pulmonaire droite est plus prononcée avec un débit entrant de 2,5 l/min.

La proximité des régions de vitesse faible et modérée à l'intérieur du greffon et au niveau de l'anastomose proximale peut être source de turbulence de l'écoulement. Il en va de même pour la bifurcation et l'ostium des artères pulmonaires, car les trois débits d'entrée dans tous les diamètres de Contegra des régions de faible vitesse sont reliés aux zones de pression modérée et élevée (voir Figure 2).

### Profils de pression

La figure 3 illustre les conditions de pression locales pour les trois valeurs de vitesse des quatre diamètres de greffe. À l'intérieur du greffon Contegra (c'est-à-dire la zone entre l'anastomose distale et proximale), la pression locale a été augmentée par l'augmentation de l'entrée et du diamètre du greffon. Dans le greffon de 12 mm à un débit entrant de 1,5 l/min, la pression était modérément élevée entre 11,2 et 11,3 Pa (pression relative par rapport à la pression moyenne dans le système cardio-vasculaire) et de 11,6 Pa à un débit entrant de 2,5 l/min. Avec la taille plus importante du greffon, la pression était constamment augmentée. Avec un débit d'entrée de 2,0 l/min pour les greffons de 16, 18 et 20 mm, la pression était comprise entre 11,4 Pa et 11,9 Pa et avec un débit d'entrée de 2,5 l/min pour les greffons de 16, 18 et 20 mm, la pression était comprise entre 11,4 Pa et 11,9 Pa (voir Figure 3). Notez que les zones de pression modérément élevée de l'anastomose distale sont reliées aux zones de basse pression de l'artère pulmonaire. Cette constatation est particulièrement importante pour les greffes à haut débit et les greffes de 16, 18 et 20 mm. En outre, une pression élevée a été enregistrée dans les régions de bifurcation, atteignant 12,1 mmHg dans des conditions de débit de 2,5 l/min.

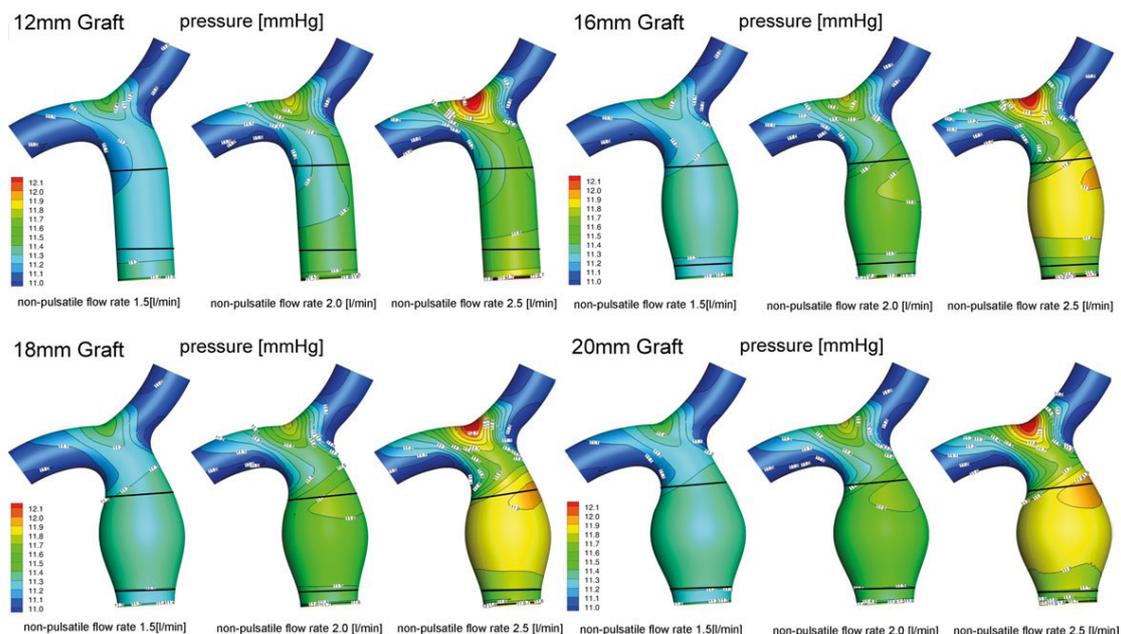


Figure 3. Répartition de la pression dans les quatre géométries à trois débits non pulsatiles. La basse pression est marquée en bleu et se situe entre 11 et 11,3 mmHg. La pression modérée est indiquée en vert et se situe entre 11,4 et 11,8 mmHg. La haute pression est indiquée en rouge et se situe entre 11,9 et 21,1 mmHg. La ligne continue indique le site d'anastomose distal et proximal du greffon Contegra.

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ

### LA RECONSTRUCTION DU TRACTUS DE SORTIE DU VENTRICULE DROIT

Des zones de basse pression ont été observées dans les régions distales des artères pulmonaires gauche et droite, et se situaient entre 11,0 et 11,2 Pa dans les deux artères pulmonaires. Cette constatation unique s'est produite dans les 12 modèles de CFD (voir Figure 3).

#### Profil de contrainte de cisaillement

La répartition locale des régions de contrainte de cisaillement est présentée Figure 4. Dans les quatre tailles d'échantillon, les zones de faible contrainte de cisaillement (plage 0-3,0 Pa) étaient présentes dans la région du greffon Contegra entre l'anastomose distale et proximale. Notamment, une faible contrainte de cisaillement a affecté la paroi du conduit indépendamment du diamètre et de la plage de vitesse d'entrée (voir Figure 4). L'augmentation de la contrainte de cisaillement a été notée entre l'anastomose distale et l'artère pulmonaire libre. Dans cette zone étroite, la contrainte de cisaillement se situait entre 3 et 6,0 Pa en fonction de la vitesse d'écoulement et du diamètre implanté. Dans le greffon de 12,mm dans la gamme de débit de 1,5 l/min dans cette zone, la contrainte de cisaillement se situait entre 0 et 2,0 Pa. Les mêmes plages ont été observées pour les conduits de 16, 18 et 20 mm au même débit d'entrée. Dans la plage de débit entrant de 2,0 l/min, la contrainte de cisaillement dans cette zone était comprise entre 2,0 et 4,0 Pa pour les conduits de 12, 16, 18 et 20 mm. En

revanche, au débit de 2,5 l/min, la contrainte de cisaillement se situait entre 0 et 10 Pa dans la zone située entre l'artère pulmonaire et le site d'anastomose proximal.

Des zones de faible contrainte de cisaillement ont été trouvées à la bifurcation dans les trois débits et dans les quatre diamètres de greffe Contegra (entre 0 et 4,0 Pa). De plus, la paroi antérieure des deux artères pulmonaires était affectée par une faible contrainte de cisaillement (voir Figure 4). L'ostium de l'artère pulmonaire a présenté une répartition différente. Dans le modèle à faible débit, indépendamment du diamètre du greffon, la contrainte de cisaillement se situait entre 0 et 3,0 Pa. Dans le modèle pour 2,0 l/min, la plage était comprise entre 0 et 5,0 Pa. À 2,5 l/min, la plage était comprise entre 0 et 9,0 Pa.

#### DISCUSSION ET LIMITES DE L'ÉTUDE

Un modèle CFD pour le surdimensionnement RVOT a été réalisé afin d'évaluer l'influence de la géométrie de surdimensionnement sur la répartition de la contrainte de cisaillement faible et de la pression élevée. Un RVOT de 12 mm a été choisi pour simuler la circulation du RVOT pédiatrique et pour servir de référence future pour des études plus approfondies de la dynamique hémodynamique du RVOT après un surdimensionnement. En particulier, le greffon de 12 mm a des caractéristiques identiques à celles d'une voie pulmonaire naturelle

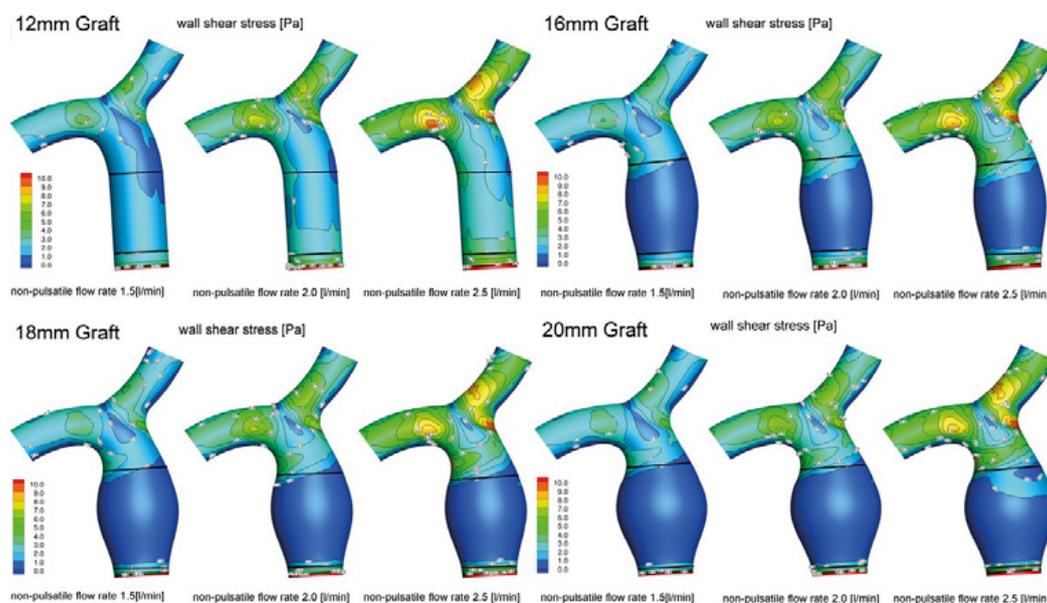


Figure 4. Répartition des contraintes de cisaillement dans la paroi du tractus pulmonaire à trois différents taux d'afflux non pulsatiles, dans quatre géométries. Les faibles contraintes de cisaillement sont marquées en bleu et se situent entre 0 et 2,0 Pa. Une contrainte de cisaillement modérée est marquée en vert et en jaune et se situe entre 3,0 et 7,0 Pa. La contrainte de cisaillement élevée est marquée en rouge et se situe entre 8,0 et 10 Pa. La ligne continue indique le site d'anastomose distal et proximal du greffon Contegra.

[8], et peut donc servir de référence pour comparer les modèles de 16, 18 et 20 mm. Les résultats de la greffe du modèle CFD de 16 mm étaient très similaires à ceux de la greffe de 12 mm, et dans les cas des greffes de 18 et 20 mm, la répartition de la contrainte et de la pression de cisaillement était différente de celle de la greffe de 12 mm. Cette constatation était particulièrement vraie dans des conditions de débit normales et élevées où les zones de faible contrainte de cisaillement et de pression modérément élevée couvrent des zones plus importantes au niveau de l'anastomose distale et de l'ouverture des artères pulmonaires lorsqu'elles sont combinées avec les géométries de 12 et 16 mm. La distribution locale des paramètres mentionnés peut contribuer à une meilleure compréhension du mécanisme de l'hyperplasie néointimale et des changements dégénératifs du RVOT reconstruit. De plus, comme le degré d'expression locale en cas de faible contrainte de cisaillement et de pression élevée dans les quatre géométries montre des distributions différentes, nos résultats peuvent suggérer la taille du greffon utilisé en pratique clinique pour le surdimensionnement, tout en maintenant les paramètres hémodynamiques dans des limites acceptables. Selon le modèle CFD, le surdimensionnement maximal accepté pour un RVOT de 12 mm est l'implantation d'un greffon de 16 mm.

Le modèle CFD développé dans cette étude est basé sur des paramètres réels de pression, d'écoulement et de géométrie naturelle ; il peut donc être considéré comme un outil pour de futures recherches sur l'influence de la dynamique des fluides sur le développement de l'hyperplasie intime après une réparation par RVOT avec un conduit à valve surdimensionné. Nous sommes conscients que le mécanisme de défaillance des conduits à valve est de nature multifactorielle et nos résultats contribueront, nous l'espérons, à une meilleure compréhension de ce phénomène clinique. À notre connaissance, la littérature actuelle ne contient aucun rapport sur les conditions hémodynamiques dans les cas de RVOT surdimensionnés, et nous ne pouvons donc pas établir de comparaisons en observation. D'autres essais cliniques et expérimentaux sont nécessaires pour expliquer pleinement le mécanisme complexe de la dégénérescence des conduits valvulés dans la RVOT.

Bien que les conditions hémodynamiques susceptibles d'entraîner une défaillance précoce du greffon aient été identifiées et que la taille maximale de surdimensionnement ait été déterminée, cette étude présente certaines limites. Tout d'abord, le flux étudié était un flux constant

en régime permanent, et ne correspond donc pas au flux pulsatile présent *in vivo*, et les conditions locales de flux telles que le flux turbulent peuvent ne pas être identifiées. De plus, la valve a été considérée comme étant constamment ouverte, ce qui n'est pas non plus représentatif de la situation *in vivo*. L'effet de l'écoulement pulsatile combiné à une valve mobile peut conduire à de nouvelles connaissances sur la nature hémodynamique de l'artère pulsatile RVOT et de ses branches. En outre, un modèle numérique pulsatile peut nous donner des indications non seulement sur la répartition de la contrainte de cisaillement locale, mais aussi sur la contrainte de cisaillement oscillatoire.

#### RÉFÉRENCES

- [1] Hickey EJ, McCrindle BW, Blackstone EH, Yeh TJr, Pigula F, Clarke D et al. *Jugular venous valved conduit (Contegra) matches allograft performance in infant truncus arteriosus repair.* *Eur J Cardiothorac Surg* 2008;33:890–8.
- [2] Karamlou T, Blackstone EH, Hawkins JA, Jacobs ML, Kanter KR, Brown JW et al. *Can pulmonary conduit dysfunction and failure be reduced in infants and children less than age 2 years at initial implantation?* *J Thorac Cardiovasc Surg* 2006;132:829–38.
- [3] Wells WJ, Arroyo H Jr, Bremner RM, Wood J, Starnes VA. *Homograft conduit failure in infants is not due to somatic outgrowth.* *J Thorac Cardiovasc Surg* 2002;124:88–96.
- [4] Kadner A, Dave H, Stallmach T, Turina M, Pretre R. *Formation of a stenotic fibrotic membrane at the distal anastomosis of bovine jugular vein grafts (Contegra) after right ventricular outflow tract reconstruction.* *J Thorac Cardiovasc Surg* 2004;127:285–6.
- [5] Traub O, Berk BC. *Laminar shear stress: mechanisms by which endothelial cells transduce an atheroprotective force.* *Arterioscler Thromb Vasc Biol* 1998;18:677–85.
- [6] Chatzizisis YS, Coskun AU, Jonas M, Edelman ER, Stone PH, Feldman CL. *Risk stratification of individual coronary lesions using local endothelial shear stress: a new paradigm for managing coronary artery disease.* *Curr Opin Cardiol* 2007;22:552–64.
- [7] Ichikawa Y, Noishiki Y, Kosuge T, Yamamoto K, Kondo J, Matsumoto A. *Use of a bovine jugular vein graft with natural valve for right ventricular outflow tract reconstruction: a one-year animal study.* *J Thorac Cardiovasc Surg* 1997;114:224–33.
- [8] Mosbahi S, Mickaily-Huber E, Charbonnier D, Hullin R, Marco Burki M, Ferrari E et al. *Computational fluid dynamics of the right ventricular outflow tract and of the pulmonary artery; a bench model of flow dynamics.* 2014;4:611–6.

GLOSSAIRE

**défauts conotrunculaires** : malformations du « conus arteriosus », région conique de transition entre le ventricule droit et le tronc pulmonaire, et des grandes artères « truncus arteriosus », tronc ou aorte pulmonaire, qui présentent des alignements et des connexions ventriculo-artérielles anormales.

**croissance somatique** : ensemble des phénomènes physiques qui contribuent à la croissance de l'enfant jusqu'à son adolescence.

**sténose** : rétrécissement d'un canal ou d'un orifice.

**Anastomose** : connexion entre deux structures, organes ou espaces, connexions entre vaisseaux sanguins.

**distale/proximale** : partie d'un organe qui est la plus éloignée/rapprochée d'un organe de référence ou du tronc.

**hyperplasie de l'intima** : épaissement du tissu interne d'un vaisseau sanguin.

**hémodynamique** : qui se rapporte aux conditions mécaniques de circulation du sang (pression, débit, etc.).

**pro-athérogène** : favorise la production d'athérome, plaques constituées de lipides se fixant sur la paroi interne des artères.

**endothélial** : se rapporte à la couche la plus interne des vaisseaux sanguins, celle en contact avec le sang.

**ostium** : ouverture ou court canal vers une cavité ou qui permet la communication entre deux cavités. ■

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ

# Modélisations biomécaniques expérimentales et numériques de techniques chirurgicales innovantes pour la réparation de structures osseuses

par Arnaud Germaneau<sup>1</sup>, Institut Pprime et Tanguy Vendevre<sup>2</sup>, CHU de Poitiers

*Cet article présente des travaux menés au sein de l'équipe Photomechanics & Experimental Mechanics de l'Institut Pprime (UPR 3346, CNRS – Université de Poitiers – ISAE-ENSMA). Historiquement, cette équipe a développé des méthodes de mesures de champs innovantes, par couplages expérimentations/modélisations, adaptées à différents domaines industriels particulièrement à l'aéronautique comme l'illustrent des études de structures menées sur l'A380 durant son lancement [1, 2]. Depuis quelques années, le transfert de cette expérience et de ces développements permet de répondre à des problématiques issues du secteur de la santé et plus spécifiquement au domaine de la biomécanique ostéoarticulaire.*

La prise en charge des traumatismes des structures osseuses, par la réparation de l'homme fracturé est au cœur du métier des chirurgiens orthopédistes. Selon l'indication posée, ils effectuent un geste chirurgical, consistant en une réduction des fragments morcelés

« comminutifs », puis en une stabilisation permettant la consolidation osseuse. Les outils de réduction disponibles pour le chirurgien sont de façon très générale des spatules, des broches, des chasses greffons, des distracteurs, des daviers et l'utilisation du ligamentotaxis (application d'une force de distraction, à l'aide par exemple d'un fixateur externe, afin que les tissus environnants puissent aider ou assurer la réduction de la fracture et le repositionnement des fragments).

Les pratiques cliniques actuelles amènent les chirurgiens à se questionner sur l'optimisation de la prise en charge de fractures notamment avec l'essor de techniques de chirurgie mini-invasive. Partant du postulat qu'un des facteurs majeurs est d'être le moins agressif possible avec les tissus tout en permettant une réduction optimale de la fracture, une des évolutions majeures en traumatologie a été réalisée pour la prise en charge de fracture du rachis il y a 15 ans avec le dévelop-

1. Maître de conférences HDR, Institut Pprime UPR 3346, CNRS – Université de Poitiers – ISAE-ENSMA, France

2. Chirurgien orthopédiste, CHU de Poitiers, Institut Pprime UPR 3346, CNRS – Université de Poitiers – ISAE-ENSMA, France

# SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ

## MODÉLISATIONS BIOMÉCANIQUES EXPÉRIMENTALES ET NUMÉRIQUES DE TECHNIQUES CHIRURGICALES INNOVANTES POUR LA RÉPARATION DE STRUCTURES OSSEUSES

pement de la cyphoplastie. Cette technique, qui permet une chirurgie percutanée, moins délabrante, consiste à utiliser un outil permettant une augmentation osseuse du corps vertébral fracturé et une stabilisation par un comblement avec un matériau d'apport. L'augmentation osseuse est couramment réalisée par le gonflement d'un ballon au sein des structures osseuses fracturées. Cette technique permet, par la mise en place puis le gonflement secondaire d'un ballon, la réduction la plus anatomique possible dans les trois plans de l'espace, en soulevant la zone déprimée. L'augmentation osseuse est généralement suivie par un remplissage de la cavité créée avec du ciment (PMMA, phosphate de calcium, os) permettant d'assurer la stabilisation et la consolidation.

Cette technique a tout d'abord été développée pour la chirurgie rachidienne, puis a été déployée plus récemment aux fractures du plateau tibial [3] donnant lieu à nouvelle technique dénommée 'tubéroplastie'.

Les développements de ces techniques chirurgicales innovantes soulèvent de nombreuses questions fondamentales à clarifier, notamment concernant la stabilisation mécanique et le comblement de la zone fracturaire, devenant ainsi des sujets de recherche majeurs en ingénierie biomécanique. Il est alors indispensable de mener des études biomécaniques afin de démontrer l'apport de ces techniques, l'intérêt ou non d'un comblement ou l'éventuelle nécessité d'une stabilisation associée. En réponse à ces questions, des modélisations expérimentales et numériques sont développées dans le but de cloner les situations rencontrées en clinique sur la base d'approches « in vitro » et « in silico ». Cet article présente des travaux basés sur ces deux approches pour deux sites de fractures fréquemment rencontrées en traumatologie : le rachis et le plateau tibial.

### ANALYSE PAR MODÉLISATION EXPÉRIMENTALE : APPROCHE IN VITRO

Depuis plusieurs années, l'Institut Pprime (UPR 3346 CNRS – Université de Poitiers – ISAE-ENSAM) et l'Unité Rachis et Neurostimulation du CHU de Poitiers travaillent en étroite collaboration sur différentes problématiques liées à la tenue mécanique de systèmes d'ostéosynthèses rachidiens. Pour cela, différents travaux ont été menés sur l'analyse mécanique expérimentale des instrumentations de stabilisation en lien avec le comportement du tissu osseux. L'un des faits marquants concerne la caracté-

risation de la réponse mécanique des techniques de stabilisation de fractures de vertèbres dans la zone thoraco-lombaire (située entre les vertèbres thoracique T10 et lombaire L3) par chirurgie mini-invasive en comparaison avec les techniques de chirurgie classique. Des études expérimentales ont été réalisées sur des segments anatomiques (approche in vitro). Pour rendre cette modélisation expérimentale la plus réaliste possible, il fallait relever certains défis notamment pouvoir fournir aux chirurgiens des situations semblables aux cas cliniques. Deux systèmes mécaniques originaux ont donc été conçus pour reproduire des chargements physiologiques sur des segments anatomiques rachidiens : un premier système permettant de reproduire des chargements de compression en dynamique afin de simuler des fractures provoquées par exemple lors d'une chute ; un second système permettant de reproduire des chargements physiologiques correspondant à des mouvements de flexion/extension, inclinaison latérale ou rotation axiale.

#### *Modélisation de fractures vertébrales en dynamique*

Le système de chargement en compression dynamique devait pouvoir permettre de réaliser des fractures sur segments anatomiques de façon reproductible avec des schémas proches de la réalité et correspondant à des fractures de type 'burst'. Ces fractures correspondent à un éclatement de la vertèbre sans lésion majeure sur les structures adjacentes [4]. Elles sont fréquentes lors de traumatismes chez les adultes jeunes provoquées par exemple lors d'une chute d'un étage, d'accidents de la circulation ou de sports (cheval, vélo, ski, ...).

La colonne vertébrale est constituée de vertèbres rigides jouant un rôle structurel essentiel et de disques souples assurant les mobilités de l'ensemble. D'un point de vue comportement mécanique, lors d'un chargement dynamique, le disque intervertébral présente un comportement dépendant de la vitesse de chargement : il se rigidifie et transmet pratiquement l'ensemble de son énergie à la vertèbre avec une faible déformation. Pour étudier ce type de comportement, nous avons conçu un dispositif sur la base d'un pendule de Charpy générant une énergie maximum de 180 J. Le système a été modifié afin qu'il puisse accueillir des segments pouvant compter jusqu'à sept vertèbres tout en imposant un chargement dynamique purement axial (Figure 1). Les mesures de déformation des vertèbres et des disques pendant l'impact ont été réalisées par suivi de marqueurs avec une

# SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ

## MODÉLISATIONS BIOMÉCANIQUES EXPÉRIMENTALES ET NUMÉRIQUES DE TECHNIQUES CHIRURGICALES INNOVANTES POUR LA RÉPARATION DE STRUCTURES OSSEUSES

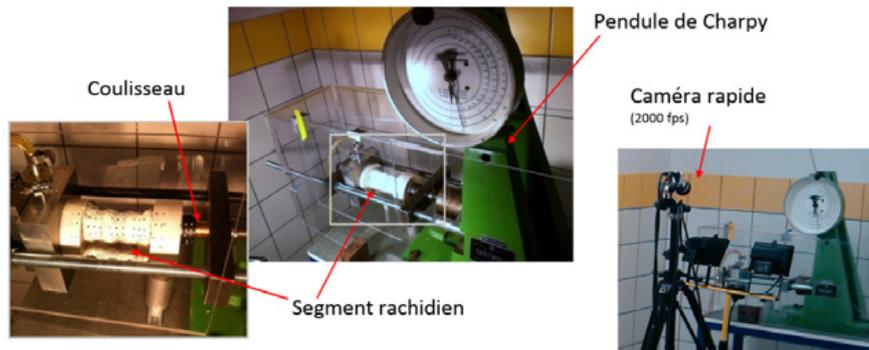


Figure 1. Dispositif de chargement pour réaliser des essais de compression dynamique sur segments rachidiens

caméra rapide (avec une fréquence d'acquisition de 2000 à 4000 images par seconde).

Ce dispositif a été testé puis validé sur plusieurs séries de segments anatomiques [5, 6]. Les observations et analyses par tomographie RX des segments fracturés ont permis de confirmer la réalisation de manière reproductible des fractures de type 'burst' avec les observations caractéristiques : éclatement du corps vertébral en plusieurs fragments, fracture comminutive du plateau supérieur et recul d'un fragment du mur postérieur dans le canal rachidien (Figure 2-c).

La Figure 2 présente un exemple de séquence d'images acquises durant l'impact et l'évolution des déformations des disques et des corps vertébraux constituant le segment.

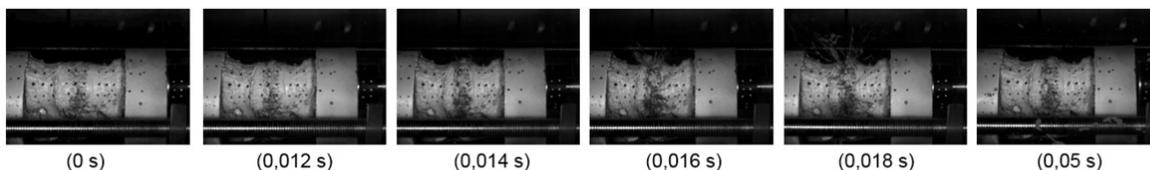
Ce banc de chargement développé permet une analyse fine de la réponse mécanique de segments rachidiens

sous compression dynamique aboutissant à un modèle reproductible de fractures. Il est possible de combiner des chargements de compression et de flexion afin de provoquer d'autres mécanismes de fracture. L'originalité est aussi d'associer ce système avec une analyse optique en dynamique par suivi de marqueurs donnant alors la possibilité d'évaluer les charges et les déformations du segment rachidien durant la phase d'impact et de fracture.

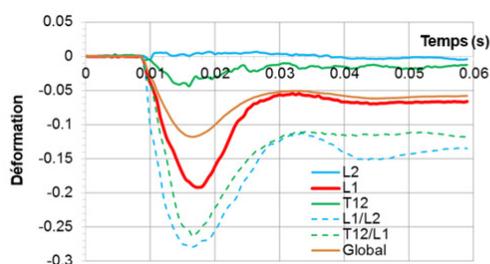
### Modélisation de chargements physiologiques

Le second challenge était de pouvoir étudier la réponse mécanique de différents systèmes de d'instrumentation de segments rachidiens en fonction de différents mouvements physiologiques. Il fallait donc avoir la possibilité de produire des chargements associés aux mouvements de la vie quotidienne, correspondant à des couples allant jusqu'à de 5 N.m à imposer sur les disques

(a) Mesure des déformations durant l'impact par suivi de marqueurs



(b) Déformations sur les disques et les vertèbres



(c) Analyse de la fracture par tomographie RX

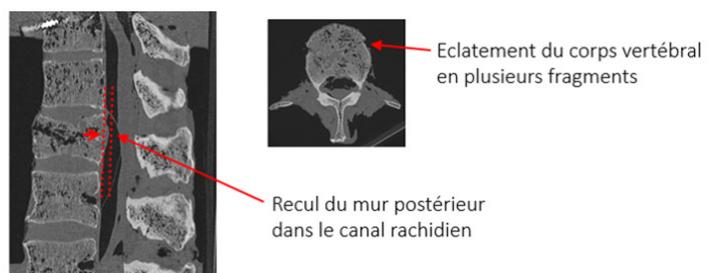


Figure 2. Analyse des effets mécaniques durant l'impact

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ MODÉLISATIONS BIOMÉCANIQUES EXPÉRIMENTALES ET NUMÉRIQUES DE TECHNIQUES CHIRURGICALES INNOVANTES POUR LA RÉPARATION DE STRUCTURES OSSEUSES

intervertebraux. Nous avons donc conçu un dispositif de sollicitations permettant d'imposer des couples purs suivant les trois axes physiologiques (sagittal, frontal et transverse) afin de décomposer complètement les mouvements physiologiques de flexion/extension, inclinaison latérale et rotation axiale.

Dans ce dispositif (Figure 3), l'une des extrémités du segment anatomique est fixée au bâti de la machine et les couples sont transmis à l'autre extrémité par des poulies entraînées par des servomoteurs électriques. Le chargement est contrôlé par des capteurs de couple. Afin d'imposer un couple pur, le mouvement est rendu libre dans toutes les autres directions grâce à la mise en place de liaisons pivots sur roulements et des glissières positionnées suivant les trois axes et guidées par des patins et paliers aérostatiques ce qui permet d'éviter toute force de réaction due au frottement.

Les mesures des déplacements et des rotations de chacune des vertèbres dans l'espace sont réalisées par des méthodes stéréoscopiques telles que le suivi de marqueurs 3D.

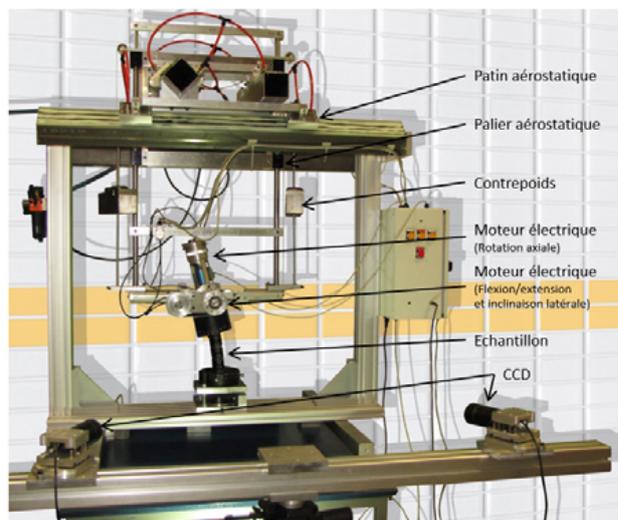


Figure 3. Machine de sollicitations de mouvements physiologiques

Des essais expérimentaux ont été réalisés sur plusieurs séries de segments anatomiques (constitués de 5 vertèbres allant de la vertèbre thoracique T11 à la vertèbre lombaire L3). L'un des enjeux était notamment de pouvoir étudier les effets mécaniques liés à une stabilisation d'une fracture vertébrale par une technique de chirurgie

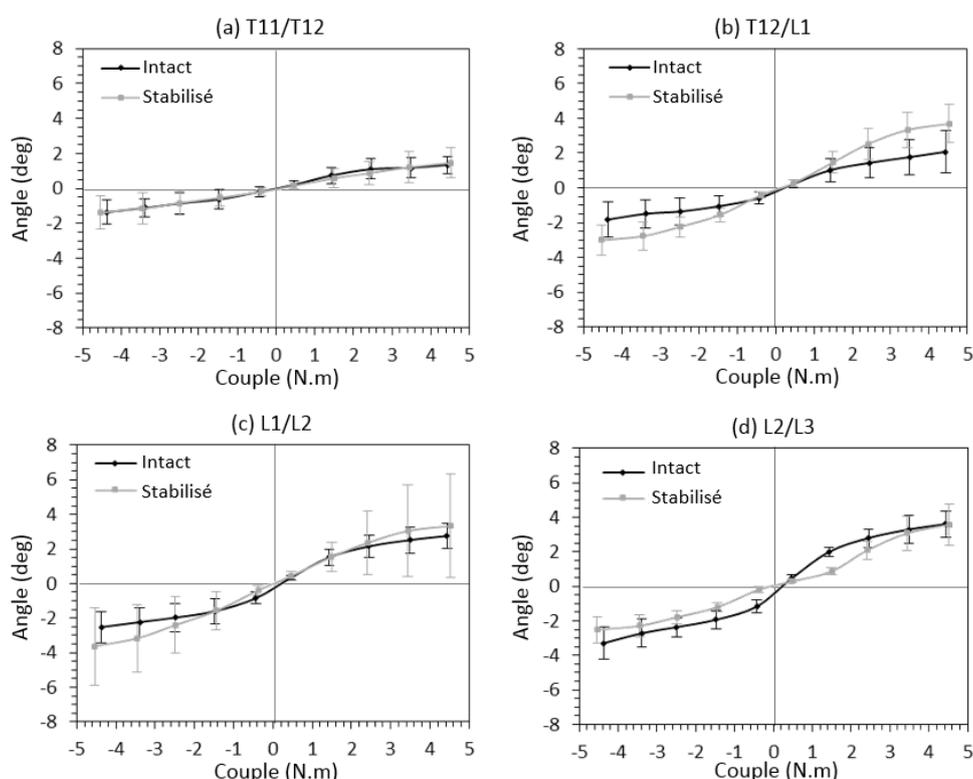


Figure 4. Exemple d'évolution des variations angulaires des segments sains et stabilisés pour des sollicitations en flexion-extension (valeurs moyennes et écarts-types)

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ

### MODÉLISATIONS BIOMÉCANIQUES EXPÉRIMENTALES ET NUMÉRIQUES DE TECHNIQUES CHIRURGICALES INNOVANTES POUR LA RÉPARATION DE STRUCTURES OSSEUSES

mini-invasive telle que la cyphoplastie seule. Pour cela, nous avons en premier lieu caractériser la réponse mécanique des segments sains avant fracture, puis de ces mêmes segments après fracture (fracture produite sur la vertèbre L1) et stabilisation. À titre d'illustration, la Figure 4 montre les variations angulaires des différents étages des segments avant fracture et après stabilisation par cyphoplastie. Les courbes représentent les valeurs moyennes des mobilités calculées sur les segments testés et les barres d'erreur correspondent aux valeurs d'écart-types. Le comportement mécanique en termes de mobilités reste semblable après stabilisation. Une analyse plus complète avec les résultats pour les autres sollicitations peut être retrouvée dans la référence [7].

Ce second banc de chargement permet de reproduire des mouvements physiologiques de flexion-extension, inclinaison latérale et rotation axiale. La réponse mécanique des segments rachidiens peut être testée en fonction des couples purs imposés sans aucune perturbation provenant d'éventuels efforts de réaction. L'utilisation d'un système de mesure de déplacements 3D par stéréo-suivi de marqueurs permet une analyse de la cinématique de chaque élément du rachis en fonction du chargement.

#### ANALYSE PAR MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS PERSONNALISÉE : APPROCHE IN SILICO

In silico est un néologisme d'inspiration latine désignant une recherche ou un essai effectué au moyen de modèles informatiques. Faisant référence au silicium utilisé dans les ordinateurs, cette approche est généralement réalisée en complément des travaux « in vivo » ; « ex vivo » et « in vitro ».

Le couplage de la simulation numérique, modèles in silico, avec le domaine de la biomécanique est un défi scientifique en cours d'évolution. Mais, ce couplage est encore peu exploité en pratique clinique. De ce fait, l'intégration de la simulation numérique aux problématiques médicales est un projet d'avenir.

L'objectif de cette approche est de développer des moyens et outils numériques permettant d'optimiser la réduction de fractures de structures cortico-spongieuses en intégrant les données morphologiques (e.g. issues de l'imagerie) et comportementales spécifiques au patient.

Dans le domaine de la traumatologie, la pertinence,

voire la nécessité, de l'utilisation de la simulation numérique peut se justifier dans de nombreux cas. La mise en relation des données in silico avec les données in vivo et in vitro, permet de créer, d'évaluer et de valider un modèle numérique et de rendre une analyse mécanique complète. L'approche in silico est particulièrement intéressante pour les techniques mini-invasives pour lesquelles le chirurgien n'a pas une visualisation directe des structures osseuses fracturées et donc des effets de son geste lors de la réduction.

Dans le cadre d'un travail sur la tubéroplastie réalisé en partenariat entre le l'Institut Pprime (UPR 3346 CNRS – Université de Poitiers, ISAE-ENSMA), le CHU de Poitiers et la société ANSYS, l'objectif est de proposer une aide numérique au chirurgien grâce à une modélisation numérique personnalisée du patient, permettra d'étudier et anticiper les difficultés et les modalités du geste opératoire.

A partir d'une image issue d'un scanner RX (format DICOM), il est possible de visualiser, segmenter et modéliser le segment fracturé du patient et ainsi fournir une géométrie 3D pour réaliser ensuite une modélisation numérique. Le modèle géométrique peut ensuite être importé pour réaliser des simulations par éléments finis. Des propriétés mécaniques sont alors attribuées localement aux tissus, spécifiquement aux patients, à partir de la densité minérale osseuse identifiée sur les imageries issues du scanner RX. Différentes situations de chargement peuvent être simulées afin de répondre aux différentes questions du chirurgiens.

Le cas clinique présenté dans cet article concerne une jeune adulte ayant subi une fracture du plateau tibial suite à une chute de cheval (fracture avec séparation et enfoncement de fragments, Figure 5). Une chirurgie mini-invasive a été réalisée : la fracture a été réduite par tubéroplastie puis stabilisée par une plaque et des vis positionnées et fixées par voie percutanée. Les questions qui peuvent se poser pour ce genre de cas clinique concernent notamment les possibilités d'une remise en charge précoce de manière à pouvoir anticiper des séances de rééducation et une reprise des activités. C'est pour répondre à ces interrogations que la modélisation par éléments finis personnalisée joue un rôle essentiel. Des situations de chargements de la vie quotidienne peuvent être simulés afin d'analyser les effets mécaniques engendrés dans le foyer de fracture et les éléments de stabilisation.

# SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ

## MODÉLISATIONS BIOMÉCANIQUES EXPÉRIMENTALES ET NUMÉRIQUES DE TECHNIQUES CHIRURGICALES INNOVANTES POUR LA RÉPARATION DE STRUCTURES OSSEUSES

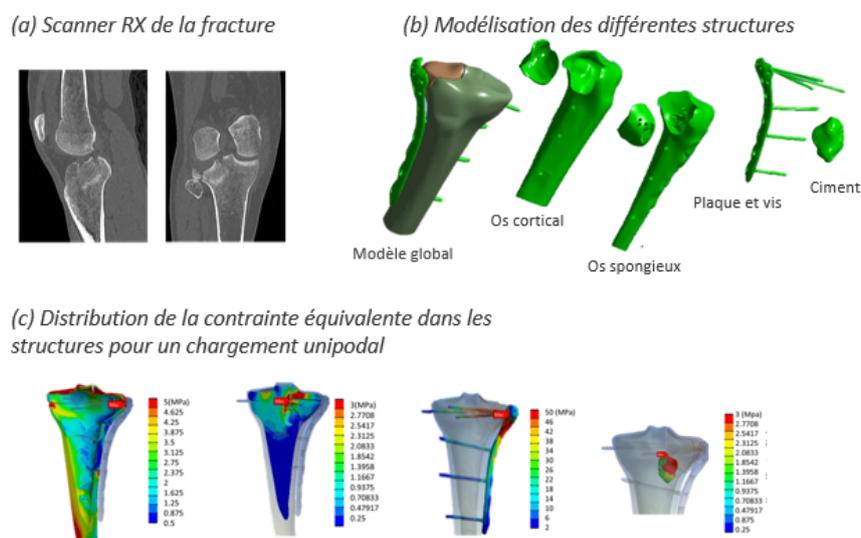


Figure 5. Modélisation personnalisée d'une fracture du plateau tibial

La Figure 5-c présente un exemple de cartographies de contraintes dans les structures osseuses et les systèmes de stabilisation pour différents stades après la chirurgie dans le cas d'un appui unipodal. L'un des enjeux était également de caractériser le rôle important du ciment PMMA dans la stabilisation de la fracture pour une remise en charge précoce. Davantage de résultats et de détails peuvent être retrouvés dans l'article [8].

L'approche *in silico* dans le domaine de la traumatologie semble être un projet d'avenir. Une prise en charge spécifique semble intéressante devant la singularité de chaque fracture et de chaque individu.

Il paraît ainsi indispensable, pour aller plus loin, de coupler les données obtenues par des mesures *in vitro* avec les données *in vivo* cliniques afin de pouvoir valider les données *in silico* et de les rendre exploitables en clinique.

Le développement de ces logiciels de planning fait partie de la thématique du Geste Médico-Chirurgical Assisté par Ordinateur (GMCAO). Le GMCAO est actuellement en développement pour plusieurs applications au carrefour de la médecine, de l'informatique et de la bio-ingénierie, c'est une thématique en plein essor, en réponse à une forte demande médicale.

### BIBLIOGRAPHIE

Germaneau A, Peyruseigt F, Mistou S, et al (2008) *Verification of a spherical plain bearing finite-element model using scattered light photoelasticity tests. Proc Inst Mech Eng*

*Part J J Eng Tribol* 222::647–656

Germaneau A, Peyruseigt F, Mistou S, et al (2010) *3D mechanical analysis of aeronautical plain bearings: Validation of a finite element model from measurement of displacement fields by digital volume correlation and optical scanning tomography. Opt Lasers Eng* 48::676–683

Vendeuvre T, Babusiaux D, Breque C, et al (2013) *Tubero-plasty: Minimally invasive osteosynthesis technique for tibial plateau fractures. Orthop Traumatol Surg Res* 99::S267–S272

Magerl F, Aebi M, Gertzbein SD, et al (1994) *A comprehensive classification of thoracic and lumbar injuries. Eur Spine J Off Publ Eur Spine Soc Eur Spinal Deform Soc Eur Sect Cerv Spine Res Soc* 3::184–201

Germaneau A, Saget M, D'Houtaud S, et al (2014) *A Novel Experimental Strategy for the Production of Thoracolumbar Burst Fractures Coupled with a Biomechanical Analysis by using Non-invasive Optical Methods. Strain* 50::381–388. doi: 10.1111/str.12079

Germaneau A, Vendeuvre T, Saget M, et al (2017) *Development of an experimental model of burst fracture with damage characterization of the vertebral bodies under dynamic conditions. Clin Biomech* 49::139–144. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2017.09.007

Germaneau A, Vendeuvre T, Saget M, et al (2016) *A novel approach for biomechanical spine analysis: Mechanical response of vertebral bone augmentation by kyphoplasty to stabilize thoracolumbar burst fractures. J Mech Behav Biomed Mater* 59::291–303. doi: 10.1016/j.jmbbm.2016.02.002

Belaïd D, Vendeuvre T, Bouchoucha A, et al (2018) *Utility of cement injection to stabilize split-depression tibial plateau fracture by minimally invasive methods: A finite element analysis. Clin Biomech* 56::27–35

# Une valve cardiaque dans le berceau du Rafale

par Philippe Perrier, membre senior de la commission technique Aérodynamique

Au début des années 80, il y a presque 15 ans que le professeur Chris Barnard a réussi la première transplantation cardiaque. La technique opératoire est bien au point et un nombre de plus en plus important de patients ont une vie presque normale avec un cœur greffé. La principale limitation de cette intervention provient de la disponibilité de greffons compatibles avec le receveur. Un cœur totalement artificiel serait une réponse à ce problème et plusieurs projets existent. Le Dr Didier Lapeyre, chirurgien cardiaque lyonnais, est le promoteur d'un de ces projets en France. Un cœur est « simplement » un muscle qui agit comme une pompe à deux corps : pendant la détente du muscle (diastole), le ventricule droit reçoit, à travers l'oreillette droite, le sang veineux chargé de CO<sub>2</sub> puis se contracte (systole) pour l'envoyer dans les poumons. Pendant le même cycle, le ventricule gauche reçoit, à travers l'oreillette gauche, le sang débarrassé de son CO<sub>2</sub> et chargé d'oxygène qui vient des poumons puis le renvoie dans le système artériel par l'aorte. À chaque entrée et sortie de chaque ventricule se situe une valve cardiaque qui fait effet de clapet anti-retour (voir figures 1 et 2).

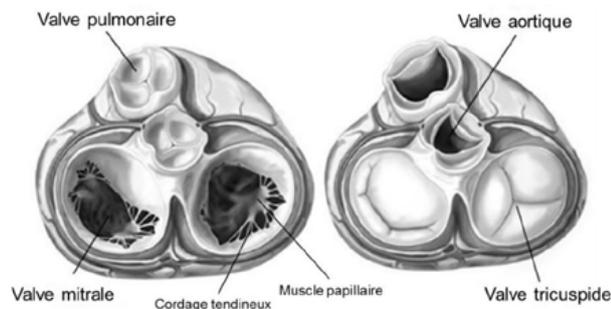


Figure 1. Les 4 valves naturelles. Ventricule gauche : mitrale en entrée et aortique en sortie. Ventricule droit : tricuspide en entrée et pulmonaire en sortie

Le défi d'un cœur artificiel n'est pas seulement d'intégrer une double pompe, avec son alimentation en énergie, dans un volume très réduit et avec des matériaux biocompatibles mais réside également dans le fait que le sang est un fluide complexe, très sensible aux perturbations. Il se compose principalement du plasma qui transporte les globules rouges chargés d'échanger l'oxygène et le CO<sub>2</sub> avec les organes, les globules blancs qui font la chasse aux éléments étrangers et les plaquettes dont le rôle est de colmater les fuites occasionnelles, par exemple à l'occasion d'une blessure, en activant

le phénomène de coagulation. Pour jouer efficacement leur rôle les plaquettes s'activent dès qu'elles perçoivent des sollicitations anormales de l'écoulement. C'est le cas lors d'une blessure et c'est aussi le cas de turbulences anormales. Or les pompes mécaniques et les clapets anti-retour classiques génèrent des niveaux de turbulence qui sont bien au-delà du seuil d'activation des plaquettes. Dans ces conditions, leur activation provoque rapidement des caillots locaux, appelés thrombus, qui vont jusqu'à bloquer les parties mécaniques et dont certaines parties peuvent se détacher et aller obstruer des vaisseaux plus petits en provoquant, par exemple, des accidents vasculaires cérébraux (AVC). Le défi du cœur artificiel est donc aussi un défi de mécanique des fluides.

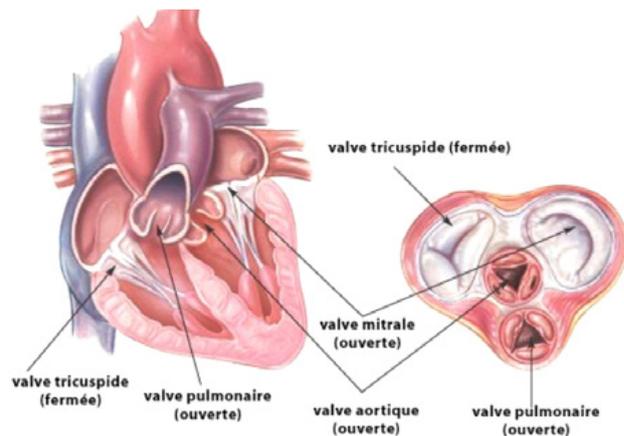


Figure 2. Ventricules et oreillettes

Le début des années 80 est aussi une période de développement exponentiel de l'informatique scientifique avec la puissance des ordinateurs qui double pratiquement tous les 18 mois (loi de Moore). L'industrie aéronautique est pionnière dans ce domaine. Dassault Systèmes vient d'être créée par un petit groupe d'ingénieur du bureau d'études des Avions Marcel Dassault pour développer des outils de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et les aérodynamiciens de Dassault travaillent sur le projet de futur avion de combat ACX, qui deviendra le Rafale, en bénéficiant de moyens de modélisation par ordinateur de plus en plus performants, en particulier dans les domaines de l'aérodynamique (Computational Fluid Dynamics ou CFD) et des calculs de structure. C'est donc naturellement que le Dr Lapeyre s'adresse à Dassault Systèmes pour la conception de son cœur artificiel et aux aérodynamiciens de Dassault pour

étudier et optimiser les écoulements. Un des points critiques se situe au-niveau des valves cardiaques. Une valve naturelle (voir figure 1) est en fait composée d'une très fine membrane dont la base et certaines zones sont fixées aux parois du ventricule. En position ouverte, cette membrane à une forme pratiquement cylindrique et laisse donc passer naturellement le flux sanguin à travers l'orifice. Lorsque le débit diminue, les parois de la membrane se rassemblent au centre et empêchent l'écoulement inverse. Depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle, plusieurs solutions ont été développées pour permettre le remplacement de valves sur certains patients dont les valves présentent, soit une fuite en position fermée (insuffisance), soit un rétrécissement en position ouverte (sténose) nécessitant un effort cardiaque plus important pour le même débit sanguin. Ces valvulopathies existent principalement sur les valves du ventricule gauche, valve mitrale en entrée et valve aortique en sortie. Deux voies ont été explorées en parallèle et coexistent toujours actuellement : des valves mécaniques et des valves tissulaires (voir figure 3).

Dès la fin des années 50, Albert Starr, jeune chirurgien cardiaque américain, rencontre Lowell Edwards, ingénieur en hydraulique à la retraite, et ils mettent au point ensemble une valve mécanique artificielle sur le principe d'une bille sur un siège (figure 3 -C). Cette valve permet effectivement de sauver des patients mais la bille constitue un obstacle important dans l'écoulement qui crée un effet de sténose et génère de fortes turbulences thrombogènes. Un traitement anticoagulant est donc indispensable pour éviter la formation de thrombus. Par la suite, plusieurs générations de valves mécaniques ont été développées avec l'objectif de réduire l'effet de sténose et les turbulences. Les générations successives (voir figure 3) sont une valve consistant en un disque articulé autour d'un axe légèrement décalé par rapport à son diamètre développée par Bjork, chirurgien cardiaque suédois et Shiley, ingénieur américain (figure 3 - B), puis la valve de St-Jude, dite bileaflet constituée de deux demi-disques pivotant autour d'axes parallèles proches du diamètre (figure 3 - A). Des matériaux très bien tolérés par l'organisme ont été trouvés pour ces valves.

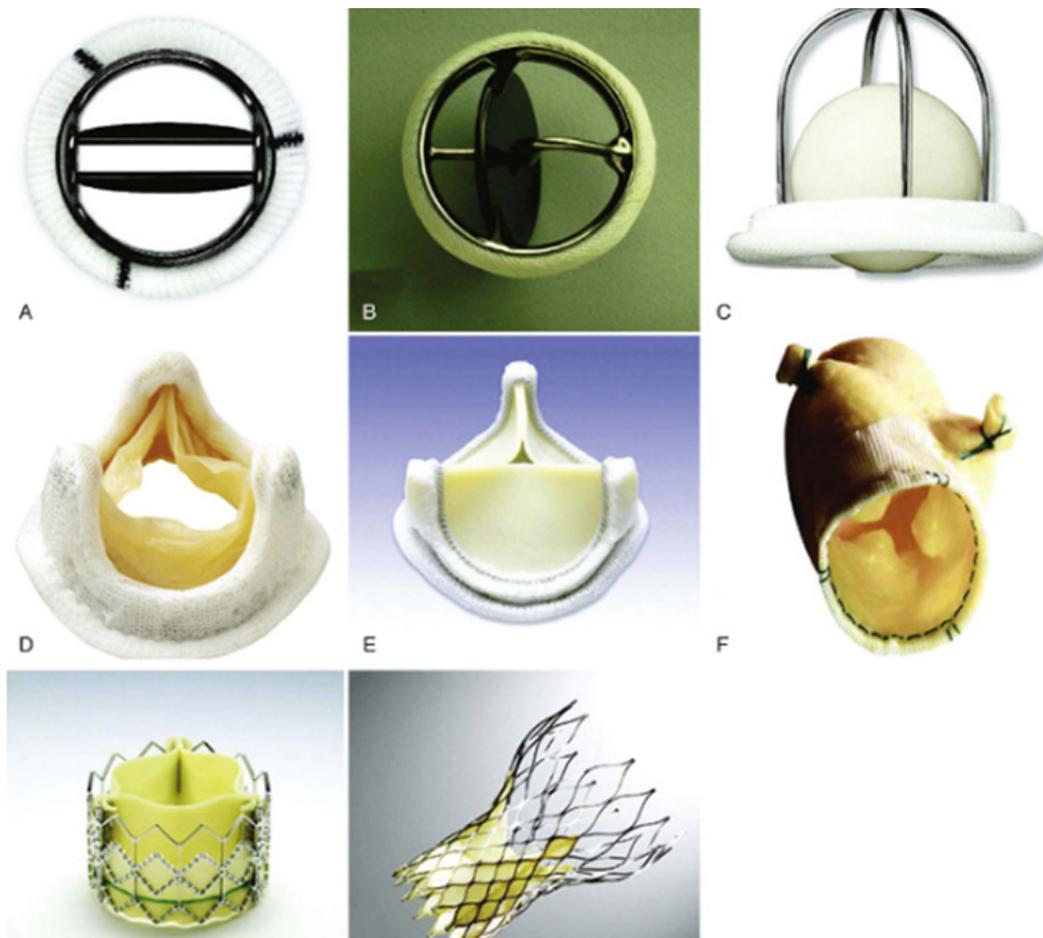


Figure 3. Différents types de valves. Mécaniques : A : St-Jude ; B : Bjork-Shiley ; C : Starr-Edwards. Tissulaires : D : Carpentier ; E : Edwards-Perimount ; F : Porcine

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ UNE VALVE CARDIAQUE DANS LE BERCEAU DU RAFALE

Les anneaux sont en carbone ou en titane et les clapets peuvent être à base de carbone (carbone pyrolytique) ou de matériau plastiques (Delrin, PEEK, etc.). Les problèmes d'usure sont assez bien maîtrisés et elles durent généralement toute la vie du patient... qui peut représenter plusieurs milliards de cycles ! Ces nouvelles générations ont permis de réduire considérablement l'effet de sténose, mais n'ont pas permis de réduire suffisamment les turbulences au point de ne plus nécessiter de traitement anticoagulant. En effet, dans tous les cas les clapets ouverts restent dans la partie centrale du flux, de plus avec un angle suffisant pour permettre leur fermeture à la diastole. Or le traitement anticoagulant représente une contrainte forte pour le patient et des risques hémorragiques importants en cas de blessure ou, par exemple, pour des femmes enceintes, induisant également un risque important de malformation de leur enfant. Il existe aussi des populations pour lesquelles l'astreinte d'un traitement quotidien est difficile à assumer.

Devant les problèmes de thrombogénicité des valves mécaniques, des chirurgiens ont eu l'idée de greffer des valves animales (souvent le porc. Voir figure 3 - F). En fait les valves ne sont pas greffées, car les tissus ne sont pas compatibles, mais traitées de façon à être tolérées par l'organisme. Or ce traitement « tue » le tissu des membranes et ne lui permet pas de se régénérer au cours de la vie. Ces valves se dégradent donc assez rapidement. D'autres solutions imitant la même architecture à base d'autres tissus (péricarde) ou même de matériaux synthétiques (polyuréthane) ont été développées (voir figure 3 - D, E). Mais, à ce jour, la durée de vie moyenne de ce type de valve est de l'ordre de 10 ans, voire beaucoup moins chez des sujets jeunes, ce qui pose naturellement un problème pour les patients dont la durée de vie espérée est très supérieure avec un risque important de ré-opération. En revanche, les valves tissulaires créent très peu de turbulence et ne nécessitent pas de traitement anticoagulant.

En 2019, plus de 500.000 patients dans le monde ont subi un remplacement de valve cardiaque. Le Graal attendu par les chirurgiens depuis plusieurs décennies serait donc de trouver une valve ayant la durabilité des valves mécaniques sans nécessiter de traitement anticoagulant.

Au Salon du Bourget de 1983, Dassault expose une maquette à échelle 1 de son projet d'avion de combat ACX auquel l'auteur a fortement contribué comme responsable de l'optimisation aérodynamique. Alors que la navette spatiale Enterprise est présentée sur le dos de son Boeing

747 modifié, les démonstrations en vol voient rivaliser les dernières générations d'avions de combat : le F16 américain, le Tornado anglais, le Mirage 2000 français, et le SAAB Viggen suédois. L'auteur est alors intrigué par l'architecture originale du système d'inversion de poussée à l'atterrissage (reverse) de ce dernier (voir figure 4) : trois volets triangulaires, parfaitement intégrés dans le canal de postcombustion du moteur, se déploient de façon à obstruer totalement le conduit et orienter le jet moteur vers l'avant par les orifices créés. C'est exactement comme cela que devrait fonctionner une valve cardiaque mécanique idéale !



Figure 4 - Le système de reverse du Viggen déployé à l'atterrissage

De retour au bureau, l'auteur contacte le Dr Lapeyre qui est immédiatement séduit par le concept. La Direction Générale de Dassault autorise à creuser l'idée. Mais l'architecture du Viggen ne peut pas être transposée directement à une valve cardiaque, d'abord parce que le mouvement est commandé par des vérins, ensuite parce que tout axe d'articulation présente des parties confinées qui sont le lieu préféré des plaquettes activées pour initier la formation de thrombus et finir par bloquer totalement l'articulation. Le défi est donc de transposer le concept de trois volets dégageant un très large orifice central en position ouverte sans utiliser d'axe d'articulation classique et dont la fermeture est totalement passive. Après plusieurs mois d'itérations avec l'aide des nouveaux outils de CAO et la réalisation de maquettes à grande échelle, une solution semble se dégager et un

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ UNE VALVE CARDIAQUE DANS LE BERCEAU DU RAFALE

brevet commun Dassault-Lapeyre est déposé en 1985. Mais le Dr Lapeyre n'est pas encore tout à fait satisfait et le travail est poursuivi jusqu'à supprimer totalement toute articulation matérielle (voir figure 5).

L'axe de pivotement des volets est totalement virtuel et leur mouvement est seulement guidé par des surfaces de glissement largement exposées au flux sanguin au cours du cycle et ne présentant aucune zone possible de stagnation, condition indispensable pour éviter le risque de thrombose. De plus, l'excentrement de l'axe virtuel de pivotement des volets permet de les aligner pratiquement avec le flux en position ouverte en réduisant très fortement les turbulences associées et sans risquer qu'ils ne se referment pas (voir figure 6). Cette dernière disposition satisfait pleinement le Dr Lapeyre car toutes ces améliorations par rapport à l'état de l'art ouvrent la voie vers une valve mécanique ne nécessitant pas de traitement anticoagulant. Il est donc décidé de réaliser des prototypes en vue d'essais de durabilité et d'implantations animales. Les matériaux sont choisis pour leur biocompatibilité : le titane, bien connu en aéronautique et dont la biocompatibilité est avérée, pour l'anneau externe et le Delrin pour les 3 volets.

La première implantation sur un veau a lieu début 1990, au Texas Heart Institute à Houston, dont l'équipe de chirurgiens cardiaques est très enthousiaste pour ce nouveau concept. Ce premier veau survit plusieurs mois sans traitement anticoagulant. Il est sacrifié lorsque sa croissance n'est plus compatible avec la taille de la valve qui continue à fonctionner parfaitement. En parallèle, des essais in-vitro, reproduisant en laboratoire les conditions du cycle cardiaque, confirment les excellentes

performances hydrodynamiques et le très faible niveau de turbulence. Ces essais révèlent même une propriété remarquable du concept : la fermeture des volets s'amorce dès la décélération du flux sanguin et lorsque le flux s'inverse, les volets sont presque fermés réduisant ainsi très fortement le taux de reflux. Cette caractéristique est connue sur les valves naturelles et tissulaires mais n'existe sur aucune des valves mécaniques existantes. Ceci s'explique par le fait que la décélération du flux engendre un gradient longitudinal de pression qui n'est pas uniforme mais crée une différence de pression entre la partie centrale de l'écoulement, la plus rapide, et les zones périphériques, plus lentes, situées en particulier derrière les volets. Cette différence de pression permet d'amorcer la fermeture des volets dans le sens «naturel», c'est à dire vers l'intérieur, mais s'oppose plutôt aux volets placés au centre de l'écoulement et qui se ferment vers la périphérie. Ainsi la valve Dassault-Lapeyre a un taux de reflux comparable aux valves tissulaires, 3 ou 4 fois plus faible que celui des autres valves mécaniques. De plus, cet effet joue aussi sur la vitesse de fermeture des volets : plus le reflux à la fermeture est important et plus la vitesse d'impact des volets à la fin de la fermeture est importante. Il en résulte un effet de coup de bélier, très préjudiciable pour les cellules sanguines, qui peut même aller jusqu'à l'apparition locale de bulles de cavitation. Après cette belle démonstration de l'apport des technologies aéronautique à la chirurgie cardiaque, Dassault cède ses droits sur les brevets au Dr Lapeyre pour poursuivre le développement. Celui-ci réalise de nombreuses autres implantations sur des veaux ou des moutons dont certains vivront jusqu'à un près d'un an et demi sans traitement anticoagulant. Ces essais conduisent à de légères améliorations du dessin. Mais le

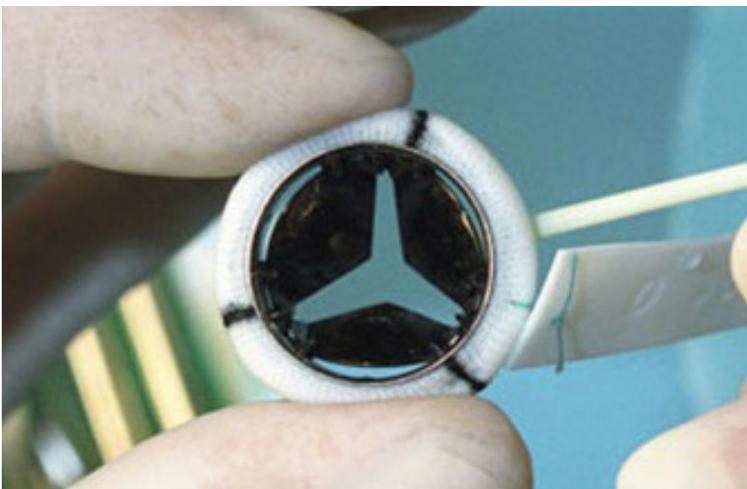


Figure 5. La valve Dassault-Lapeyre

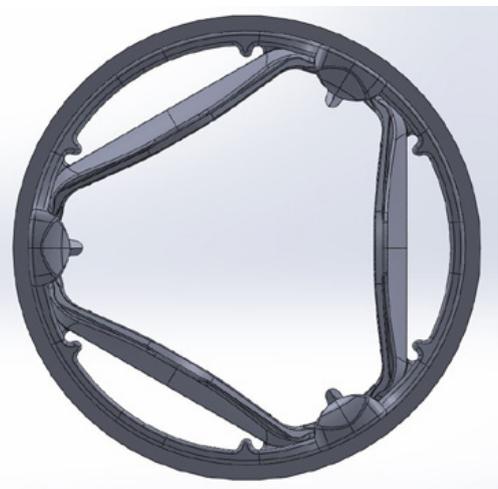


Figure 6. Valve Dassault-Lapeyre en position ouverte

## SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES POUR LA SANTÉ UNE VALVE CARDIAQUE DANS LE BERCEAU DU RAFALE

Delrin n'a pas de qualités suffisantes en terme d'usure et les valves mécaniques alors les plus utilisées (St-Jude) ont des volets en carbone pyrolytique, un matériau très dur en surface et présentant une remarquable neutralité chimique. Une version de la valve Dassault-Lapeyre, rebaptisée Triflo, est réalisée avec des volets en carbone pyrolytique avec des résultats in-vivo très satisfaisants. Mais cette technologie est coûteuse et n'est maîtrisée que par un très petit nombre d'industriels, potentiellement concurrents du projet. La société Novostia SA ([www.novostia.com](http://www.novostia.com)) est créée en 2017 pour finaliser le développement en utilisant pour les volets un nouveau matériau : le PEEK (Polyéther-éther-cétone), très utilisé pour les prothèses orthopédiques. Ce matériau a en outre l'avantage d'avoir une densité bien plus faible que le carbone pyrolytique (1,3 au lieu de 2,2) et réduit donc l'inertie des volets. Cette société, dirigée par Geoffroy Lapeyre, fils du Dr. Lapeyre, est soutenue par des investisseurs privés et a reçu, début 2020, un financement de l'Union européenne dans le cadre du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020. L'auteur lui apporte aujourd'hui ses conseils d'aérodynamicien et de co-inventeur. De nouveaux essais de durabilité sont tout à fait satisfaisants.

En parallèle, les outils de CFD développés pour l'aéronautique ont évolué au rythme de l'informatique et se sont répandus dans tous les secteurs industriels. Ces moyens permettent aujourd'hui au Pr Borajzani, du département Engineering de Texas A&M University ([www.tamu.edu](http://www.tamu.edu)), de réaliser des simulations dynamiques d'un cycle complet de fonctionnement d'une valve avec interaction fluide structure (FSI) (voir figure 7).

Les essais in-vitro ont aussi bénéficié de techniques développées pour les essais en souffleries comme la tomographie par imagerie de vitesses de particules (tomo-PIV). Le Pr Obrist met en œuvre cette technique dans son laboratoire Artorg à Berne ([www.artorg.unibe.ch](http://www.artorg.unibe.ch)) pour mesurer précisément le champ de vitesses au sein d'une valve placée dans un dispositif reproduisant le cycle cardiaque naturel (voir figure 8). Pour la première fois au monde, ces deux techniques ont été appliquées sur la valve Novostia avec la même définition et des conditions de calcul reproduisant exactement celles des essais in-vitro. La comparaison des résultats montre un excellent accord. Comme en aéronautique, l'utilisation conjointe et complémentaire de la modélisation et des essais a permis d'apporter les dernières améliorations de dessin pour atteindre l'objectif d'une valve dans laquelle les cellules sanguines peuvent circuler sans dommage et donc sans aucun besoin de traitement anticoagulant.

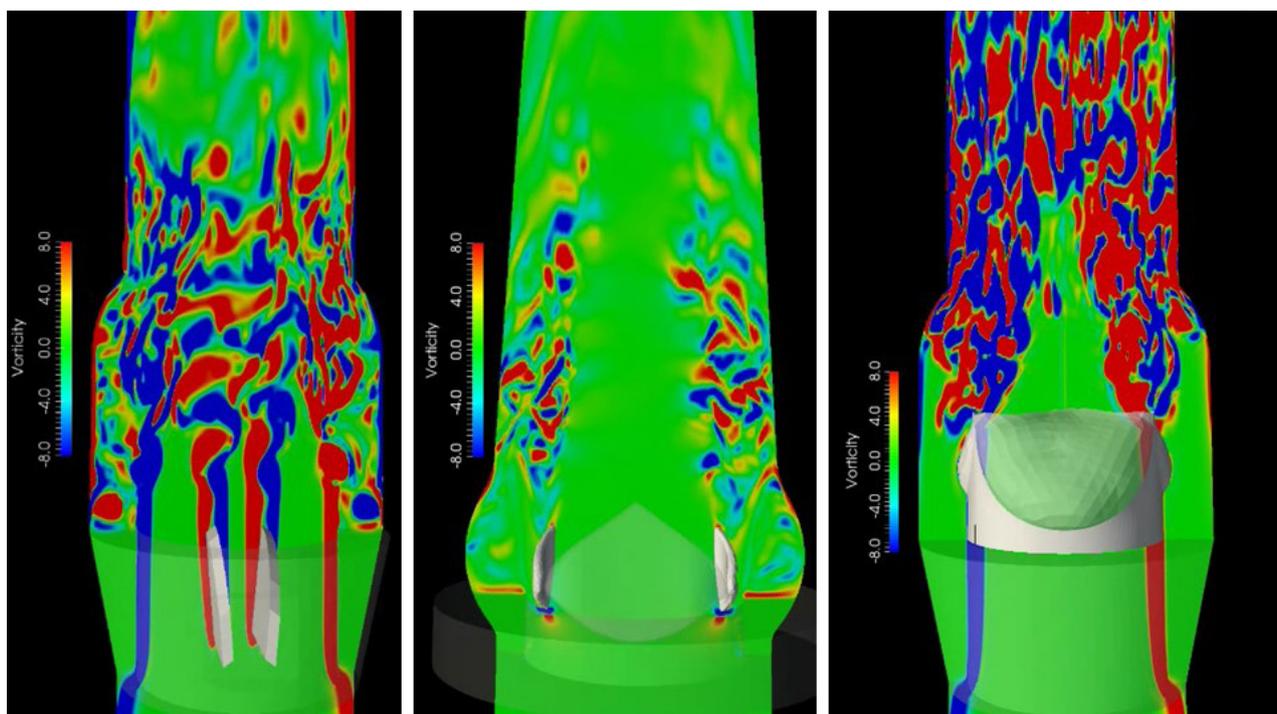


Figure 7. Calculs CFD de vorticité sur 3 types de valves: bi-leaflet à gauche, Triflo au centre, tissulaire à droite (Pr Borajzani, Texas A&M University)



Mean velocity magnitude field  $\|\langle \mathbf{U} \rangle\|$  (upper panels) and RMS velocity fluctuation field  $U_{\text{rms}}$  (lower panels) at peak flow  $t = 0.15$  s in BL (left panels) and TF (right panels) mechanical valve

Figure 8. Comparaison par tomographie PIV des écoulements dans une valve à 2 volets (3 colonnes de gauche) et de la valve Triflo (colonnes de droite). (David Hasler, PhD Dissertation, University of Bern, 2017)

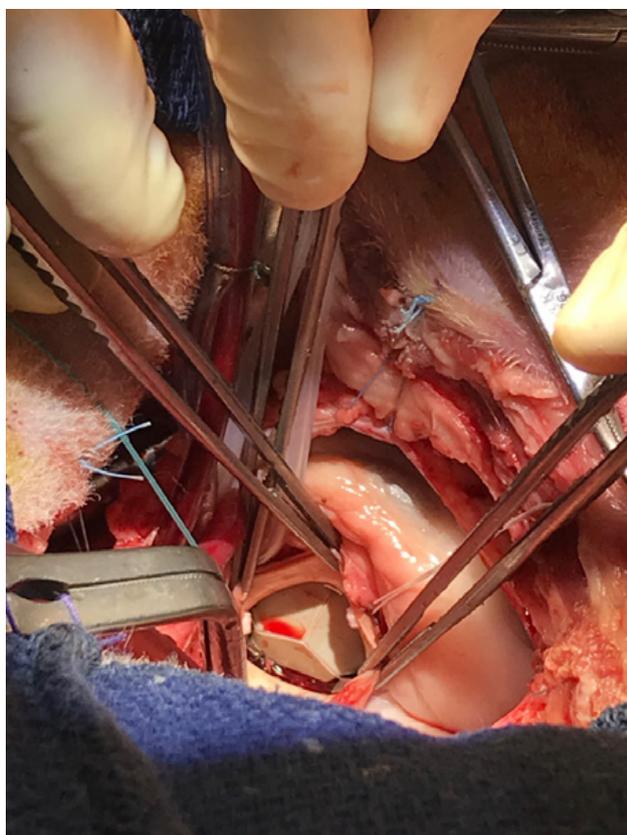


Figure 9. Valve Triflo implantée en position aortique sur un mouton

Des essais précliniques sur des moutons (voir figure 9) sont en cours en vue d'obtenir l'autorisation d'implantation humaine en 2021. C'est alors que l'on pourra vérifier si la valve Novostia est bien le Graal attendu par de nombreux chirurgiens cardiaques et leurs patients. ■

# Télé-échographie avec la station spatiale internationale à l'aide d'un échographe avec sonde motorisée télé-commandée : application aux déserts médicaux

par le professeur Philippe Arbeille, UMPS-CERCOM, Faculté de Médecine de l' Université de Tours, membre 3AF, Didier Chaput, Arielle Depriester, Alain Maillet, Sébastien Barde, Rémi Canton, CADMOS-CNES-MEDES – Toulouse

## OBJECTIFS

Le premier objectif était de démontrer la possibilité de télé-opérer depuis la Terre, l'orientation du transducteur d'une sonde échographique (sonde motorisée) ainsi que l'ajustement des réglages et fonctions (Doppler pulsé et couleur, 3D, RF, etc.) de l'échographe à bord de l'ISS. Plusieurs programmes en vol spatial exigent l'utilisation de l'échographie pour l'exploration des organes et vaisseaux périphériques (artère carotide, veines jugulaire, et tibiale...) et profonds (foie, pancréas, reins, aorte, veine cave, cœur...). Malheureusement, à ce jour l'astronaute doit être entraîné (a) à configurer l'appareil en fonction de l'organe, (b) pour localiser la sonde d'échographie en regard de l'organe, (c) pour orienter la sonde afin d'obtenir une vue parfaite de l'organe en vue axiale ou transverse, (d) pour optimiser l'image en ajustant les réglages de l'échographe (gain, profondeur, etc.), (e) pour activer les diverses fonctions de l'échographe comme le Doppler, temps mouvement, 3D, etc., (f) pour enregistrer les images et vidéos. Pour toutes ces tâches l'astronaute est guidé à la voix par un expert depuis la Terre et, parce que la tâche est compliquée et sa formation pré-vol limitée (peu d'heures d'entraînement) il faut souvent plusieurs minutes pour obtenir la vue échographique attendue. Le principal problème est qu'il est très difficile de guider à distance un sujet non échographiste (astronaute) pour lui faire réaliser une rotation, ou inclinaison de la sonde de quelques degrés (2 -3 degrés). Le problème est identique lorsqu'on veut guider un médecin généraliste d'un site isolé pour qu'il réalise les mêmes manœuvres.

Pour cette raison nous avons conçu un nouveau dispositif grâce auquel la majeure partie des manœuvres (a, c, d, e, f) peut être accomplie directement par l'expert à distance en utilisant la télé-opération donc avec une participation limitée de l'astronaute de l'ISS ou du généraliste d'un centre médical isolé. Ce nouveau système 1) réduira considérablement le temps de formation pour l'astronaute en pré-vol (ou pour le généraliste isolé)

car moins de manœuvres à apprendre, 2) permettra à l'expert de déclencher les fonctions échographiques et les captures de données à des instants plus opportuns et donc d'opérer une meilleure sélection des données collectées, 3) n'exigera pas la présence d'un deuxième opérateur assistant pour gérer les fonctions de l'échographe comme, c'est le cas actuellement.

Dans son application terrienne (dans un site médical isolé) le système permettra au patient de bénéficier au décours de sa consultation clinique d'une échographie à distance et le généraliste pourra immédiatement ajuster ou mettre en place un traitement approprié. À ce jour, les patients de site isolé doivent après la consultation chez le généraliste prendre rendez-vous dans un centre radiologique (pour dans quelques jours), se rendre à ce centre, patienter en salle d'attente (souvent plusieurs heures) puis revenir (environ une semaine après la première visite) consulter chez le généraliste et ajuster la prise en charge médicale.

Le deuxième objectif était donc d'installer l'échographe spatiale dans des sites médicaux isolés et réaliser des échographies à distance sur les patients de ces sites.

## L'ÉCHOGRAPHE SPATIAL

L'échographe a été développé à partir d'un modèle commercial (Orchéolite Sonoscanner, Paris), auquel un ensemble de fonctions a été ajouté (3D, signal radio-fréquence ou RF, élastographie, etc.) et modifié pour que tous ses réglages (gain, profondeur, etc.), fonctions (doppler pulsé ou couleur, 3D, RF, etc) puissent être télé-opérés en utilisant des logiciels spécialement développés par Teamviewer (Göppingen, Allemagne) et Optimalog (Saint-Cyr-sur-Loire, France) (voir Figures 1 et 2)

Au site expert l'échographiste ajuste les réglages de l'image échographique qu'il reçoit du site distant (ISS ou site médical isolé) et active les fonctions (doppler pulsé,

## TÉLÉ-ÉCHOGRAPHIE AVEC LA STATION SPATIALE INTERNATIONALE À L'AIDE D'UN ÉCHOGRAPHE AVEC SONDE MOTORISÉE TÉLÉ-COMMANDÉE : APPLICATION AUX DÉSERTS MÉDICAUX

couleur 3D, RF, etc.) à partir du clavier de son PC. Chaque réglage est identifié par une touche du clavier : <F6> et <F7>, augmente et diminue le gain ultrason, <F4> active la fonction doppler pulsé, (O) active l'échographie 3D... Le design, l'encombrement (40×36×8 cm<sup>3</sup>) ou le poids (6 kg) de l'appareil n'ont pas été modifiés.

Quatre sondes bi-motorisées ont été développées par Vermon (Tours, France) pour cet échographe. Elles sont pourvues de transducteurs motorisés dont l'expert peut modifier l'orientation à distance à l'aide d'une sonde fictive dont les mouvements sont transmis à la sonde distante. La première sonde motorisée (pour organes abdominaux, et fœtaux) comporte un transducteur convexe (3,5-7 MHz) qui permet d'obtenir un champ large pour la visualisation des organes abdominaux et fœtaux (voir Figures 1-3). Un premier moteur permet d'incliner le transducteur de +55° à -55°, un deuxième moteur sert à faire tourner le transducteur sur lui-même de -90° à +90°. La deuxième sonde pour l'investigation d'organes et vaisseaux superficiels comporte un transducteur linéaire (5-17 MHz) qui peut également être incliné de +55 à -55° et tourner sur son axe propre de +90 à -90°. Une troisième sonde bi-motorisée destinée à l'exploration cardiaque et transcrânienne (1,5-3 MHz) est également disponible. Le transducteur de cette sonde peut s'incliner de +/-30° et tourner sur son axe de +90° à -90°. La sonde est en contact avec le thorax grâce à un trépied léger ajustable en hauteur. La quatrième sonde motorisée est une endocavitaire (5-10 Mhz) avec un moteur permettant de faire tourner le transducteur sur son axe propre de +/-90°. Deux sondes 2D classique lineaire haute fréquence (17 MHz), et Phased array pour l'exploration cardiaque sont aussi disponibles.

Les mouvements de la sonde fictive de l'expert (inclinaison, rotation, voir Figure 1) sont reproduits sur les transducteurs des sondes motorisées grâce à un logiciel Optimalog (Saint-Cyr-sur-Loire). Cette sonde fictive est connectée au port USB du PC expert sur lequel sont présentées, via Teamviewer (Gropingen, Allemagne), la vidéo ambiante (astronaute ou patient au site médical isolé) et la vidéo échographique. L'équipement du site expert se limite à un PC (11 pouces) et à la sonde fictive (200 g) connecté par WIFI à un serveur Internet ou à un smart phone qui servira de point d'accès Internet. Aucune alimentation électrique n'est nécessaire; l'équipement expert est complètement itinérant et peut fonctionner de n'importe quel point du globe à condition qu'il y ait un accès Internet (filaire ou smartphone 3G).

### TRANSFERT DE DONNÉES ENTRE L'ISS (UPLOAD/DOWNLOAD) OU UN SITE MÉDICAL ISOLÉ ET L'EXPERT

Une liaison spécifique a été utilisée entre l'ISS et le Centre spatial du CNES à Toulouse, des soft particulièrement protégés, développés par Teamviewer et Optimalog ayant été utilisés pour envoyer les ordres de mouvement aux sondes, contrôler les fonctions de l'échographe et recueillir les vidéos de l'échographe. Les débits montant et descendant étaient de l'ordre de 3-4 Mbits/s avec un délai de 2-3 s. Sur Terre la liaison entre le centre expert et les sites médicaux isolés était un Internet domestique à environ 1 Mbits/s avec un délai de 1 s.

Dès que la communication est établie, l'astronaute ESA (Figure avec Thomas Pesquet) positionne la sonde à l'endroit indiqué oralement par l'expert au sol (Prof. Philippe Arbeille) (voir Figure 4). L'expert utilise des références anatomiques simples pour guider l'astronaute (ligne mammelonnaire, sternum, clavicule, etc.), puis, dès que l'organe/vaisseaux apparaît, l'expert demande à l'astronaute de garder la sonde immobile pendant que, depuis le sol, il oriente le transducteur (en manipulant la sonde fictive de la main gauche) jusqu'à bien voir l'organe, optimise l'image, puis active des fonctions comme le doppler, le 3D et le RF en agissant sur les touches du clavier de sa main droite.

Le scénario était identique lors de la réalisation d'échographies à distance avec un centre médical isolé sur Terre, le généraliste jouant le rôle de l'astronaute de l'ISS. Le généraliste contacte l'expert par téléphone et convient de l'heure pour réaliser l'échographie à distance (en général 30 min à 1 h). Ensuite le généraliste positionne la sonde sur le patient et l'expert gère à distance l'orientation de la sonde, l'image échographique et les fonctions de l'échographe. Le diagnostic est délivré oralement par l'expert pendant la télé-échographie et un rapport anonymisé est envoyé au site isolé dans les 30 min.

L'ensemble des manœuvres étaient réalisé avec un retard de 1 à 3 s avec l'ISS, ce qui impliquait de manœuvrer la sonde fictive à très faible vitesse, afin de ne pas envoyer de nouvelles instructions à la sonde ni à l'échographe avant d'avoir vu l'effet des précédentes manœuvres sur l'image échographique. Pour la majorité des sites médicaux isolés sur Terre le délai n'était que de 1 s ce qui permettait une plus grande rapidité d'exécution des manœuvres de télé-échographie.

## TÉLÉ-ÉCHOGRAPHIE AVEC LA STATION SPATIALE INTERNATIONALE À L'AIDE D'UN ÉCHOGRAPHE AVEC SONDE MOTORISÉE TÉLÉ-COMMANDÉE : APPLICATION AUX DÉSERTS MÉDICAUX

### RÉSULTATS

L'expérience test en vol spatial sur l'ISS s'est déroulée selon le plan prévu. Toutes les fonctions de l'échographe ont pu être activées correctement, et les transducteurs ont également pu être orientés à la convenance de l'expert. Ces manœuvres ont été réalisées avec un délai de 3 s entre l'envoi des instructions à l'échographe ou à la sonde et le retour de l'image échographique modifiée par ces instructions. Ce délai de 3 s peut être réduit à 2 s si l'expert suit l'évolution de l'image sur la vidéo redescendue en NTSC (voir Figure 4). L'échographe Sonoscanner de l'ISS est actuellement utilisé pour plusieurs programmes scientifiques à bord. Dix sessions d'échographie à distance ont déjà été réalisées avec succès avec l'ISS.

L'expert au sol a pu examiner des organes et vaisseaux abdominaux (vésicule biliaire, veine porte et sus-hépatique, rein, etc.) ainsi que des organes et vaisseaux superficiels (artère carotide, veine jugulaire, thyroïde, etc.) en mode imagerie, puis en mode temps mouvement, doppler pulsé et couleur, 3D et RF. La reconstruction en 3D et le calcul de l'épaisseur intima-média (en RF) ont également été réalisés depuis le sol et affichés sur l'échographe de l'ISS.

Les images échographiques et autres signaux ultrasonores (doppler, etc.) reçus par l'expert au sol étaient d'excellente qualité et donc utilisables pour un éventuel diagnostic, de même que les images natives redescendues ultérieurement. L'astronaute avait pour rôle de localiser la sonde en regard de l'organe mais n'avait pas besoin d'être formé à l'utilisation de l'échographe ce qui avait réduit considérablement son temps de formation avant le vol et de plus la télé-opération de l'échographe depuis le sol a rendu inutile la participation d'un aide opérateur lors de la télé-échographie en vol.

Sur Terre l'échographe (Sonoscanner) a été testé avec succès sur plusieurs sites médicaux isolés (déserts médicaux) comme la Maison de santé de Richelieu (Indre-et-Loire, 6000 habitants, 65 km de l'expert), la maternité de Ceuta (Enclave espagnole, nord du Maroc), et des essais techniques en liaison satellite ont été réalisés en Guyane (CHR de Cayenne, Centre médical de Maripasoula et dispensaire d'Apatou) (voir Figures 2 et 3). Trois cents patients ont bénéficié d'une échographie à distance avec un échographe identique à celui de l'ISS et une liaison Internet domestique. La plupart des demandes concernaient une recherche de lithiase vésiculaire, de

lithiase rénale, de dilatation pyelo-calicielle, d'appendicite, de kyste ovarien, ou bien de sténose au niveau carotidien ou membre inférieur, de thrombose veineuse, de rupture musculo tendineuse ou d'hématome post traumatique. A Ceuta 15 grossesses ont été examinées par échographies depuis Tours (1800 km) et les principaux paramètres de surveillance fœtale ont pu être mesurés (diamètre bipariétal et abdominal, longueur du fémur), également l'aspect du placenta et le niveau de liquide amniotique étaient évalués. Enfin, au niveau des sites isolés en Guyane, des essais de visualisation d'organes abdominaux et de structures fœtales ont été réalisés en liaison satellite avec un retard de 2-3 s comparable à celui de l'expérience avec l'ISS. Aucune de ces échographies à distance n'excédait 20 minutes.

Finalement l'échographe Sonoscanner conçu pour la station ISS est parfaitement adapté à l'échographie à distance avec des sites médicaux isolés (déserts médicaux) sur Terre.

### FUTURES APPLICATIONS DE LA TÉLÉ-ÉCHOGRAPHIE

Actuellement les territoires d'applications de la télé-échographie se situent sur Terre dans les déserts médicaux, les régions géographiquement isolées (Afrique, Amazonie et autres), les zones interdites pour cause de pollution bactérienne, chimique, nucléaire, les zones de catastrophes naturelles et les véhicules de transport de masse (Navire de croisière, A 380).

Notre échographe télé-opéré est retenu par la NASA pour la surveillance médicale des astronautes 2021-2027.

Ces actes de télé-échographie sont réalisés en quasi temps réel car tous les points du globe sont à une seconde de délai sur Internet (projet financé par le CNES).

### RÉFÉRENCES

- Arbeille, P. et al., 2015. *Tele-Operated Echograph and Probe Transducer For Remote Ultrasound Investigation On Isolated Patient (study on 100 patient)*. *Telemed J E Health*, vol 22 n°7, pp 1-10.
- Arbeille P, Zuj K, Saccomandi A, Andre E, De La Porte C, Georgescu M. *Tele-Operated Echography and Remote Guidance for Performing Tele-Echography on Geographically Isolated Patients*. *J Clin Med*. 2016 Jun 13;5(6). pii: E58. doi: 10.3390/jcm5060058.

## TÉLÉ-ÉCHOGRAPHIE AVEC LA STATION SPATIALE INTERNATIONALE À L'AIDE D'UN ÉCHOGRAPHE AVEC SONDE MOTORISÉE TÉLÉ-COMMANDÉE : APPLICATION AUX DÉSERTS MÉDICAUX

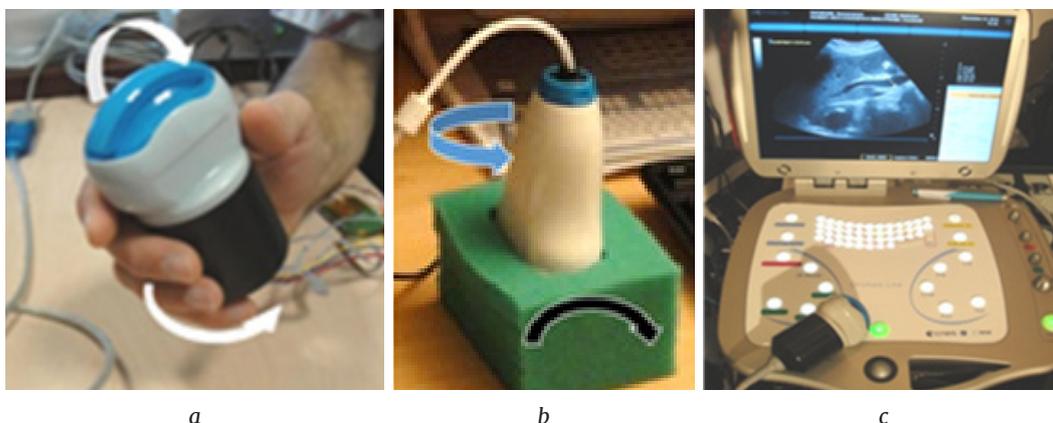


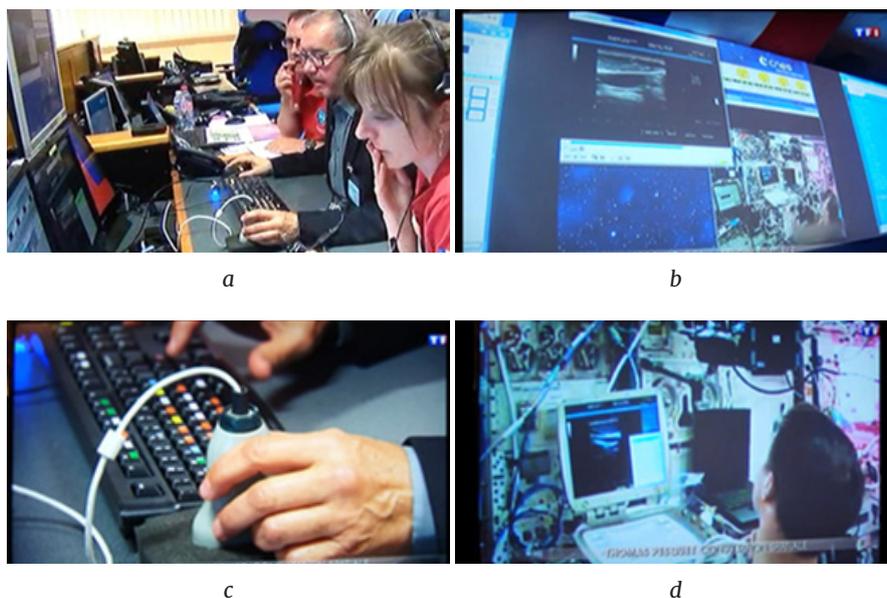
Figure 1. (a) Sonde motorisée (400 cm<sup>3</sup> et 430 g). Le transducteur (3,5 MHz curved array) peut être incliné et tourné (flèches) à distance par l'expert en manipulant (b) la sonde fictive (flèche) (c) L'échographe télé opérable (6 kg) avec la sonde également télé-opérable. (même appareil sur Terre et dans l'ISS)



a - Patient au site isolé

b - Centre expert à l'hôpital universitaire

Figure 2. a) Au site patient l'opérateur non échographiste maintient la sonde motorisée sur le patient b) L'expert active les fonctions de l'échographe et contrôle l'orientation de la sonde sur son écran de la vidéo d'ambiance (patient et opérateur) et la vidéo de l'échographe



a

b

c

d

Figure 3. L'expert oriente la sonde de l'ISS en manœuvrant la sonde fictive (de la main gauche), il commande les fonctions de l'échographe de l'ISS en sélectionnant les touches du clavier (de la main droite) d) L'astronaute en face de l'échographe à bord de l'ISS. c) L'expert oriente la sonde de l'ISS en manœuvrant la sonde fictive (de la main gauche), il commande les fonctions de l'échographe de l'ISS en sélectionnant les touches du clavier (de la main droite) d) L'astronaute en face de l'échographe à bord de l'ISS

**ESPACE**

**TÉLÉ-ÉCHOGRAPHIE AVEC LA STATION SPATIALE INTERNATIONALE À L'AIDE D'UN ÉCHOGRAPHE AVEC SONDE MOTORISÉE TÉLÉ-COMMANDÉE : APPLICATION AUX DÉSERTS MÉDICAUX**

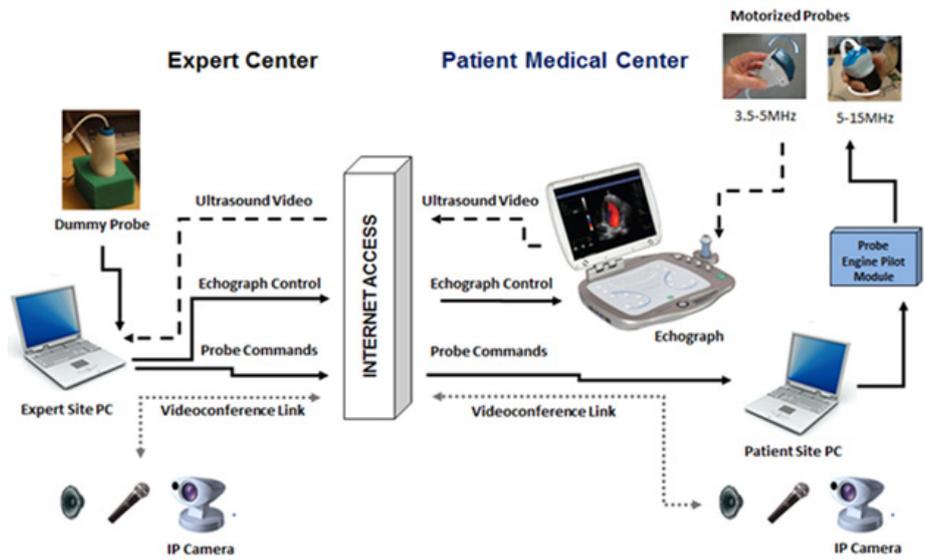


Figure 4. Synoptique du système : site expert (sol) centre patient (ISS, zone rurale). La transmission des ordres de mouvement à la sonde motorisée, le réglage à distance des fonctions de l'échographe et le retour des vidéos à l'expert nécessitent une liaison « rapide » : 1 Mbits/s, images par seconde approximativement 10 f/s, délai 1 à 3 s. L'équipement du site patient (échographe 6 kg + sondes 1,5 kg, alimentation 0,5 kg : total 8 kg)

**Sonde 3D superficielle L.2**

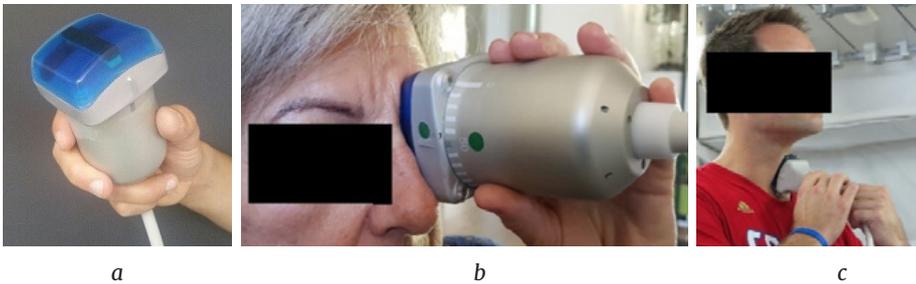


Figure 5. Trois sondes motorisées pour l'échographe: L2 pour organes and vaisseaux superficiels, C2, cardiaque/transcranienne pour le cœur et les vaisseaux intra cérébraux, A2 pour organes abdominaux pelviens et fœtaux

**Sonde transcranienne C2**



d

**Sonde cardiaque C2**



e



f

**Sonde 3D abdominale A2**



g



h

**Echographie Fœtale A2**



i

TÉLÉ-ÉCHOGRAPHIE AVEC LA STATION SPATIALE INTERNATIONALE À L'AIDE D'UN ÉCHOGRAPHE AVEC SONDE MOTORISÉE TÉLÉ-COMMANDÉE : APPLICATION AUX DÉSERTS MÉDICAUX



a - Foie et vesicule biliaire (flèche)



b - Foie et Veine cave inferieure (flèche)



c - Cœur : Ventricule gauche (flèche)



d - Caillot dans une veine du mollet, Phlebite (flèche)

Figure 6. Exemple d'échographie (a) du foie de la vesicule biliaire, (b) veine cave, (c) Ventricule gauche, (d) veine du mollet (phlebite)

# Une opération en apesanteur : opération sous "Zéro G" par le professeur Dominique Martin<sup>1</sup>, CHU de Bordeaux

par Bernard Vivier et Claude Motel, membres émérite 3AF

27 septembre 2006. À bord de l'Airbus « Zéro G » de Novespace, le professeur Dominique Martin réalise en apesanteur, avec son équipe du Centre Hospitalier Universitaire de Bordeaux, l'ablation d'une tumeur graisseuse sur un patient. Cette expérience est une première mondiale sur l'homme en apesanteur. Le patient âgé de 46 ans a subi, sous anesthésie locale, cette opération sur l'avant-bras.

L'intervention a duré 8 minutes, réparties sur 22 paraboles de 22 secondes chacune, au cours d'une séquence de vol de 2 heures. Sans que l'intervention représente un exploit technique, l'équipe médicochirurgicale a surtout démontré la faisabilité de la chirurgie en apesanteur, à condition de concevoir et de réaliser des adaptations précises. C'est ainsi que cette intervention a pu démontrer qu'il était possible d'appliquer dans l'espace, avec des précautions particulières, les techniques chirurgicales terrestres.

Le bloc opératoire comportait tous les dispositifs d'anesthésie et de réanimation actuels, directement installés sous la table d'opération. Il a été conçu et réalisé, avec une résistance à une accélération de 9 g, pour une installation spécifique à bord de l'Airbus « Zéro G ». Il avait auparavant fait l'objet d'une validation après une série de tests réalisés lors de la campagne de vols paraboliques de juin 2005. Afin que les intervenants restent solidaires du sol pendant les phases d'apesanteur, ils étaient attachés au plancher par des harnais d'alpinistes et des cale-pieds. Différents dispositifs ingénieux ont été adaptés pour une utilisation en apesanteur (notamment : attaches agrippantes, aimantation pour les instruments etc.). Auparavant, pendant la campagne de vols 2005, le professeur Martin avait pu tester les principes de l'intervention sur un rat !

Cette « première » ouvre la voie à des projets d'intervention en milieu difficile, particulièrement lors des longs vols spatiaux, y compris en cas d'utilisation de techniques de téléchirurgie. ■



L'Airbus Zero G de Novespace en 2006



Le professeur Martin, lors de la validation de la procédure sur un rat (2005)



L'intervention chirurgicale réalisée en apesanteur en 2006

1. Chef du service de chirurgie plastique et de chirurgie de la main au CHU de Bordeaux

## TECHNIQUES AERONAUTIQUES

L'APPORT DES TECHNIQUES DU SECTEUR AEROSPATIAL  
AU DOMAINE BIO-MEDICALAED  
138  
nouveau

## BUT

Cette formation d'initiation permettra aux auditeurs :

- De découvrir les nombreux domaines de transfert de technologie entre le biomédical et l'aérospatiale
- D'appréhender les principales techniques d'imagerie biomédicales
- De visiter des installations où des méthodes issues de l'aérospatiale sont appliquées au biomédical.

Elle vise surtout à donner des bases essentielles, mais a également pour vocation de s'ouvrir sur un vaste champ de méthodes.

## DURÉE ET EMPLOI DU TEMPS

Le stage dure 5 jours (30 heures) et comporte :

- 3 exposés de cours
- 7 conférences
- Une visite de la plateforme d'imagerie haute résolution de la rétine de l'hôpital des 15-20

## ESPRIT GÉNÉRAL

Ce stage s'appuie sur des cours de base :

- Rappels mathématiques ou physiques
- Notions fondamentales en imagerie

Cette introduction est suivie de conférences sur les techniques d'imagerie ou de synthèse de prothèses, en mettant en lumière le lien avec l'aérospatiale :

- Imagerie de la rétine humaine in-vivo (optique adaptative, OCT, imagerie confocale, imagerie structurée)
  - Imagerie des tissus (cancers de la peau, imagerie obstétrique)
  - Caractérisation chimique et bactériologique in-situ
  - Prothèses et modèles physiologiques : liens avec l'aéronautique
- Chaque intervention sera précédée d'un tutoriel sur les notions de bases nécessaires pour comprendre le séminaire. Elles seront poursuivies par un moment d'échange, où l'intervenant décrira comment se sont opérés les échanges entre biomédical et aérospatiale, et où les participants à la formation pourront les interroger directement sur leur parcours. De plus, une visite de la plateforme d'imagerie haute résolution de la rétine de l'hôpital des 15-20 permettra de voir un exemple vivant d'exploitation clinique de techniques issues de l'aérospatiale.

## PRÉREQUIS

Niveau du stage : Base

Ce stage s'adresse à des ingénieurs généralistes, qui veulent découvrir les transferts entre biomédical et aérospatiale, en particulier les techniques d'imagerie.

## ANIMATEUR

Serge MEIMON :

Maître de Recherches à l'ONERA

## SOMMAIRE

## • Introduction :

- De Galilée aux lauréats du prix Nobel de Chimie de 2014 : télescopes, microscopes et ophtalmoscopes
- Bases d'imagerie optique
- Panorama des méthodes d'imagerie biomédicale (microscopie confocale, plein champ, STED, illumination structurée, non linéaire, Raman)

## • Imagerie de la rétine in vivo :

- Optique adaptative, des étoiles à la rétine + visite du banc d'ophtalmologie de l'ONERA à l'hôpital des quinze-vingt
- LIDARS et OCT

## • Imagerie des tissus :

- SONARS et échographes
- Imagerie polarimétrique, dont le microvasculoscope utilisant un éclairage laser et ses propriétés polarimétriques pour détecter les cancers de la peau

## • Caractérisation chimique et bactériologique in-situ:

- Microscopie Cohérent Anti-Stokes Raman Scattering (CARS), de la biologie aux diagnostics de combustion

## • Prothèses et modèles physiologiques : liens avec l'aéronautique

- Prothèses de valves cardiaques
- Prothèses de trachée humaine
- Aéronautique et ORL : modélisation numérique des écoulements dans les voies respiratoires supérieures

## DATE

à PARIS : du 17 au 21 mai 2021

## PRIX

Nous consulter  
Voir conditions générales

# La Commission technique Médecine

par Philippe Mairet, président

## HISTORIQUE

Il y a plusieurs années de cela, il y avait une Commission « Biologie, médecine aérospatiale ». Cette commission avait pour cadre les sciences de la vie dans l'Espace : effets physiologiques de la gravité, facteur majeur de l'environnement terrestre, physiologie et psychologie spatiales, prévention du mal de l'espace, suivi médical, sélection du personnel spatial, génie biologique et médical spatial.

Elle étudiait les problèmes scientifiques, opérationnels et techniques propre à la médecine et à la physiologie spatiale, assurait une sensibilisation de la communauté scientifique et physiologique aux problèmes spécifiques à l'Espace. Elle diffusait des informations vers les membres de la 3AF et le public. Le Président de cette Commission fut Claude Alexandre Timsit, de Medispace.

Par la suite, elle fut mise en sommeil.

## RÉACTIVATION

Ce n'est que très récemment que la Commission Technique Médecine de la 3AF fut réactivée par décision de 3AF.

Actuellement, elle couvre essentiellement les disciplines relevant des médecine aéronautique, médecine spatiale et biologie spatiale.

Elle est constituée actuellement de trois membres tous intéressés par la Médecine et les Sciences du Vivant, même si aucun d'entre eux est médecin ;

- Madeleine Bourdeaux, Professeur des Universités en retraite, Biophysicienne
- Jean Tensi, Président du Groupe 3AF Poitou, Ingénieur de Recherche en retraite
- Philippe Mairet, Ingénieur, ancien d'Airbus

## DOMAINES D'ACTIVITÉ

La Commission Médecine a mené dans le passé une recherche à caractère bibliographique en médecine aérospatiale (via internet principalement) en support au projet Etudiants intitulé «Aorta in Microgravity» dans le cadre d'Orbit Your Thesis» du Département Education de l'Agence Spatiale Européenne (ESA).

Elle identifie les colloques nationaux ou internationaux déjà planifiés, présentant une(/des) thématique(s) relevant de la médecine aérospatiale, ayant lieu sur le sol français, et nécessitant ou non sponsorship et labellisation de la part de 3AF.

Elle mène une réflexion en amont des activités/travaux des Commissions Espace, Aviation Commerciale, Hélicoptères, et Aviation Légère et Machines Dérivées, notamment sur la thématique des désorientations spatiales, et a des relations avec ces Commissions.

Elle identifie les thématiques visant à l'élaboration de productions intellectuelles en partenariat (ou non) avec des organismes externes à 3AF, car les 3 membres qui la composent actuellement n'ont pas la capacité au global de couvrir la totalité du champ des disciplines qui la définissent.

Ses membres peuvent être amenés à participer éventuellement à des colloques ou congrès («JIMAS» : Journées Internationales de Médecine Aéronautique et du Spatial, etc...).

## FEUILLE DE ROUTE

- En projet (2020 ou 2021) : une conférence du Professeur Philippe Arbeille, membre-correspondant élu en 2019 de l'IAA (International Academy of Astronautics), sur le thème de l'échographie.
- Développement des contacts déjà initiés avec la Soframas et la RAeS (notamment l'Aerospace Medicine Group). ■

## HISTOIRE

# SYSCOMORAM : Système à Commande Modulaire pour Recherche et l'Aide Médicale (1975)

par Bernard Vivier et Claude Motel, membres émérite 3AF

Le cathétérisme cardiaque, l'angiocardigraphie et la coronarographie sont des méthodes invasives permettant de faire le diagnostic et d'évaluer la sévérité de la plupart des cardiopathies.

Leur remarquable développement dans les années 1960 -1970 a permis des progrès décisifs dans la compréhension du fonctionnement du cœur normal et du cœur malade. Pendant près de vingt ans, elles ont été les seules méthodes permettant le diagnostic de certitude et de sévérité des cardiopathies

Dans le cas d'insuffisance cardiaque liée à une anomalie ventriculaire, un diagnostic approfondi doit être établi en observant l'évolution dynamique du volume de ce ventricule.



Le Télémécanique T 1600

Au début des années 1970, ces examens donnaient lieu à des calculs et à des restitutions longs et complexes, sources d'inquiétudes pour le malade et de lenteur d'interprétation pour le corps médical.

Au début des années 1970, la SNIAS (Société Nationale Industrielle Aérospatiale), établissement de Saint-Médard-en-Jalles, utilise pour les besoins opérationnels du système d'armes SSBS (Sol-Sol Balistique Stratégique), implanté au plateau d'Albion (Vaucluse), un tout nouveau calculateur Télémécanique T1600, performant pour l'époque. Il avait également l'avantage de se présenter sous un volume relativement réduit, soit une « baie informatique », à comparer aux salles de calcul alors généralisées.

Des contacts avec le milieu médical, et notamment les équipes du CHU de l'hôpital Pellegrin de Bordeaux, montrent des analogies entre les besoins médicaux et l'utilisation des T1600 sur le système d'armes.

Consciente que ce calculateur peut apporter aux médecins un traitement automatique des images, l'équipe SNIAS, alors dirigée par Jacques Casquevau, se rapproche de l'équipe de cardiologie du professeur Besse au CHU de Bordeaux

Après étude du cahier des charges, le projet présenté par la SNIAS propose, à partir de l'acquisition des images et paramètres mesurés, de déterminer le contour du ventricule en temps réel, permettant la détermination dynamique du volume du ventricule par un traitement informatique. Une avancée considérable pour les équipes médicales.

La collaboration des deux entités aboutit à partir de 1973, et pendant les années suivantes, à la mise au point, puis à l'utilisation opérationnelle, d'un prototype implanté au CHU Pellegrin. Un second exemplaire est installé au CHU de Créteil, puis dans d'autres CHU de France. Ces appareils resteront en fonction et donneront satisfaction pendant deux décennies, les maintenances annuelles étant gérées par une équipe Aérospatiale dédiée.

L'obsolescence des matériels T1600, alliée au développement rapide d'ordinateurs et logiciels dédiés, répondant de mieux en mieux aux besoins médicaux eurent ensuite raison du Syscomoram.

Les performances de cet appareil et les compétences des équipes d'Aérospatiale ont permis de préciser le diagnostic des pathologies d'un grand nombre de malades cardiaques. La réussite technique du projet constitue un exemple concret des « retombées » des technologies spatiales militaires vers le domaine médical, à une époque où le développement des programmes contribuait à la naissance de « savoir-faire » encore mal développés dans les applications civiles. ■

# Les prothèses en titane et l'ONERA

par André Walder, retraité ONERA

## ORIGINE DE L'ÉTUDE

En 1993, l'auteur, alors ingénieur au laboratoire de Métallurgie des poudres de la Direction des Matériaux de l'ONERA, a été contacté par un ancien stagiaire militaire, employé par une société du biomédical (Vygon) qui, connaissant les activités du laboratoire dans le domaine du titane et notamment des poudres, cherchait une aide pour la mise au point d'une prothèse laryngée en titane poreux.

Ce projet faisait suite à la thèse de doctorat du docteur Christian Debry (actuellement Professeur, chef de service en ORL à l'Hôpital Hautepierre de Strasbourg) qui avait montré qu'aucun matériau polymère organique ne pouvait être utilisé pour cette application et que seul le titane convenait. Après des essais préalables de faisabilité, un brevet propriété de l'ONERA, avec comme co-inventeurs Christian Debry et André Walder a été déposé en 1997 en France, puis en Allemagne, Grande-Bretagne et Italie.

## OBJECTIF DE L'ÉTUDE

L'objectif initial était la mise au point d'une prothèse laryngée totale implantable sur des malades ayant subi une ablation du larynx, par exemple à la suite d'un cancer de cet organe, lié à une consommation excessive de tabac et/ou d'alcool.

Elle devait permettre, en jouant le rôle d'un support rigide colonisable par les cellules, de reconstituer l'organe disparu, et de supprimer l'orifice du trachéostome en restaurant les trois fonctions essentielles du larynx : la phonation, la respiration et la déglutition.

On notera qu'en France, à l'époque, le nombre de laryngectomies (ablation du larynx) était compris entre 1 000 et 2 000 par an et que le nombre de laryngectomisés vivants était supérieur à 20 000. Cette proportion était sensiblement la même dans tous les pays industrialisés.

En dehors de cette application, toujours d'actualité, d'autres ont été identifiées, comme des éléments de mandibule et des pièces de thyroplastie (action pour la réhabilitation des cordes vocales).

Les travaux n'ont vraiment commencé qu'en 1997. Ils ont été financés par le Service de santé des armées (pour une durée de 18 mois), puis par la Ligue nationale contre le cancer de la région Alsace (pour 2 ans). À partir de 2002 et pour 3 ans, le financement est assuré par le CHU de Strasbourg et par ESAValorisation.

## TECHNOLOGIE UTILISÉE

Le matériau choisi pour ces implants poreux est le titane non allié (T40), en raison de sa bonne réponse biologique. Il était approvisionné sous forme de barres de diamètre 45 mm. À partir de ce stade les étapes d'élaboration sont les suivantes :

- pulvérisation de la barre de T40 par le procédé à l'électrode tournante, à vitesse de rotation appropriée pour adapter le spectre granulométrique aux tailles de particules souhaitées,
- tamisage des poudres obtenues ; récupération de la fraction 400-500  $\mu\text{m}$ ,
- remplissage des moules de forme en plexiglas (polyméthacrylate de méthyle) et verre pyrex, en fonction des pièces souhaitées, mise en place des électrodes de

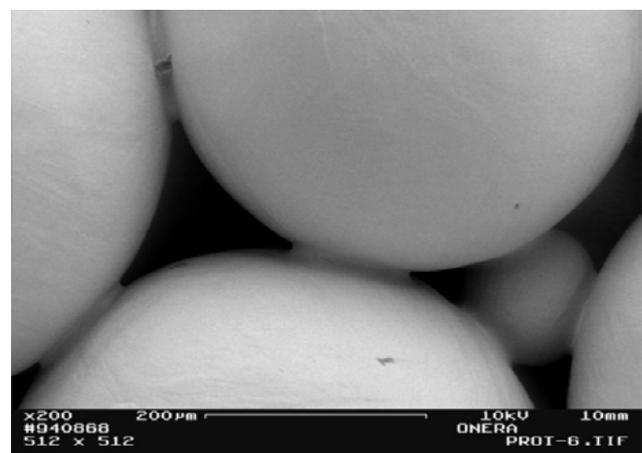
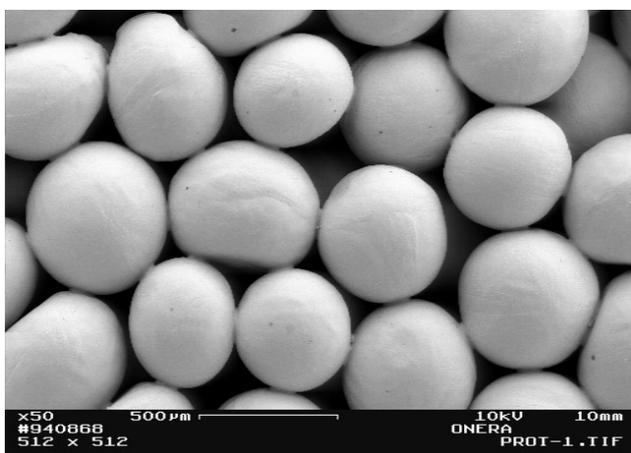


Figure 1. Microphotographies du titane (T40) utilisé

soudage, soudage des particules de poudre entre elles par décharge de condensateurs, éventuellement sous protection d'argon, démoulage des pièces,

- frittage de consolidation à haute température, au minimum 1 250 °C, sous vide poussé, découpe mécanique aux dimensions à l'aide de meules.

Les micrographies de la figure 1, obtenues par microscopie électronique à balayage, montrent l'aspect d'un tel matériau constitué de sphères liées entre elles localement à leurs points de contact. On remarque que les particules sont presque sphériques, sans aspérités de surface.

### IMPLANTATIONS DE TRACHÉES SUR ANIMAUX

Des implantations sur des mini-porcs et surtout sur des rats (environ 150 implantations) ont permis de montrer la validité du concept quant à l'utilisation du titane poreux comme guide de croissance cellulaire.

Un exemple de pièce de trachée implantée sur des rats est présenté sur les photos de la figure 2. Les dimensions de la pièce sont : diamètre extérieur 5 mm, diamètre intérieur 3 mm (épaisseur de paroi 1 mm), longueur 10 mm ; une fente longitudinale de 0,8 mm de large a été usinée pour des raisons de technique opératoire et deux trous de diamètre 1 mm ont été percés à l'opposé de la fente pour permettre la fixation aux tissus par des fils.

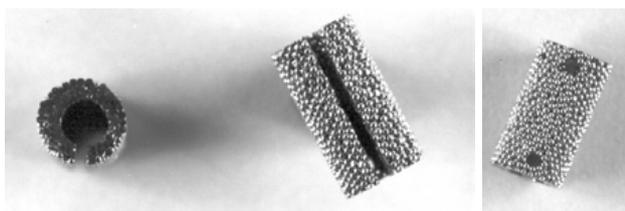


Figure 2. Pièce de trachée implantée sur des rats

### PIÈCES POUR IMPLANTATION CHEZ L'HOMME

**Trachées.** Ces pièces sont une extrapolation de celles réalisées pour les rats. La photo de gauche ci-dessous montre deux pièces de ce type (diamètre intérieur 21 mm, diamètre extérieur 24 mm, épaisseur de paroi 1,5 mm, longueur 80 mm). La photo de droite présente une variante munie d'une collerette en titane massif pour fixation d'un larynx artificiel à l'époque.



Figure 3. Pièces de trachée pour implantation sur l'homme

**Mandibule.** Comme dans le cas des trachées, il est parfois nécessaire de retirer une partie de la mandibule, en raison d'une cancérisation de la langue avec extension à l'os correspondant au menton. À l'époque la seule solution était la pose d'une plaque massive de titane qui pouvait être avantageusement remplacée par une structure poreuse colonisable. Un exemple de pièce réalisée est donné par la photo de la figure 4. Elle a été posée sur une personne ayant subi une ablation de cet organe.



Figure 4. Pièce de mandibule implantée sur l'homme

**Pièces pour thyroplastie.** Elles sont destinées à améliorer le fonctionnement de cordes vocales défectueuses. Ces pièces, de petites dimensions, environ 1 cm, comportent une partie poreuse fixée sur une embase en titane massif (voir figure 5).

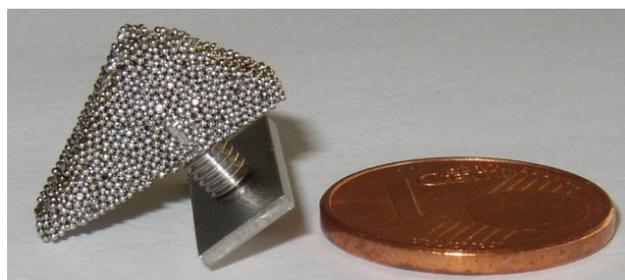


Figure 5. Pièce pour thyroplastie

## HISTOIRE LES PROTHÈSES EN TITANE ET L'ONERA

### CRÉATION D'UNE SOCIÉTÉ

En décembre 2004, une société a été créée, avec le nom de PROTIP (PROthèses en TItane Poreux), qui a existé jusqu'en 2019.

Entre temps de nouvelles technologies sont apparues qui ne nécessitaient pas l'utilisation du titane. En particulier, des polymères de nouvelle génération pouvaient être utilisés avec une mise en œuvre des pièces par le procédé d'impression 3D qui permet de fabriquer une structure couche par couche, avec un polymère, mais aussi avec un métal, en tenant compte de toute la géométrie de la pièce souhaitée.

La première application clinique du larynx artificiel a ainsi été réalisée en 2012 dans le plus prestigieux journal médical au monde (New England Journal of Medicine, Protocol NCT01474005, <http://clinicaltrials.gov/>).

Ainsi, dans un organisme de recherches comme l'ONERA, dont les moyens techniques sont importants ainsi que les connaissances scientifiques et technologiques associées, il est possible de répondre à des demandes dans des secteurs totalement éloignés de ceux traités sur place. Cela montre le potentiel d'un tel organisme et de l'intérêt qu'il y a à diffuser l'information sur ses possibilités techniques liées aux connaissances de son personnel. ■

### IN MÉMORIAM

## Hommage à Jean-Marie Luton, président du CNES et ancien président d'Arianespace

par Jean-Yves Le Gall, président du CNES



C'est avec une immense tristesse qu'avec toute la communauté spatiale, j'ai appris la récente disparition de Jean-Marie Luton, ingénieur et scientifique français, qui a marqué durablement le paysage spatial français et européen.

Jean-Marie Luton avait notamment participé aux négociations importantes et fondatrices ayant mené à la création de l'Agence spatiale européenne (ESA) et à la constitution du tour de table industriel ayant permis la création d'Arianespace.

Je souhaite rappeler ici son parcours exceptionnel qui l'a amené à la tête des trois entités majeures du spatial européen. Né en 1942, il est diplômé de l'École polytechnique (X 1961). Il a commencé sa carrière spatiale en octobre 1965 comme chercheur au Service d'aéronomie du CNRS dirigé par le professeur Jacques Blamont. En 1971, il rejoint le CNES en qualité de conseiller spécial de recherche, puis est ensuite détaché auprès du Ministère du Développement industriel et scientifique afin de participer aux négociations européennes aboutissant à la création de l'ESA en 1975. En 1978, Jean-Marie Luton devient directeur des programmes au CNES. Il sera ensuite président du Comité administratif et financier de l'ESA et représentant du CNES au sein du conseil d'administration d'Arianespace. En 1989, il est nommé directeur général du CNES. En 1990, il devient directeur général de l'ESA. En 1997, Jean-Marie Luton est nommé président d'Arianespace, poste qu'il occupera jusqu'en 2007.

« L'action de Jean-Marie Luton à la tête du CNES, de l'ESA et d'Arianespace a conduit au développement de ces trois entités avec le succès planétaire qu'elles connaissent. Un géant de l'Europe spatiale vient de nous quitter ». ■

## ÉVÉNEMENTS 3AF

# LES PROCHAINS ÉVÉNEMENTS



**COLLOQUE HENRI POTEZ**  
18 SEPTEMBRE 2020 À MÉAULTE



**SPACE PROPULSION**  
5 - 9 OCTOBRE 2020 À ESTORIL, PORTUGAL

7<sup>TH</sup> EDITION OF THE SPACE PROPULSION CONFERENCE



SPACE  
PROPULSION  
2020



5-9 OCTOBER 2020 • ESTORIL, PORTUGAL



**LES ENTRETIENS DE TOULOUSE**  
28 - 29 OCTOBRE 2020 À TOULOUSE



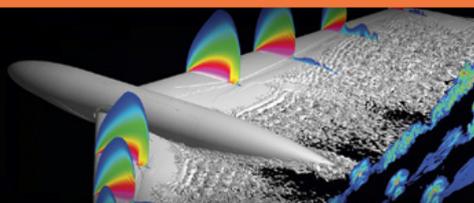
**15<sup>E</sup> FORUM EUROPÉEN IES 2020**  
4 - 5 NOVEMBRE 2020 À PARIS



**AERO 2021**  
12 - 14 AVRIL 2021 À POITIERS



55<sup>th</sup> 3AF International Conference  
**AERO2020+1**  
Poitiers, France - April 12-13-14, 2021



**COLLOQUE ISMAËL BOULLIAU**  
4 JUIN 2021 À LOUDUN



Association Aéronautique  
et Astronautique de France