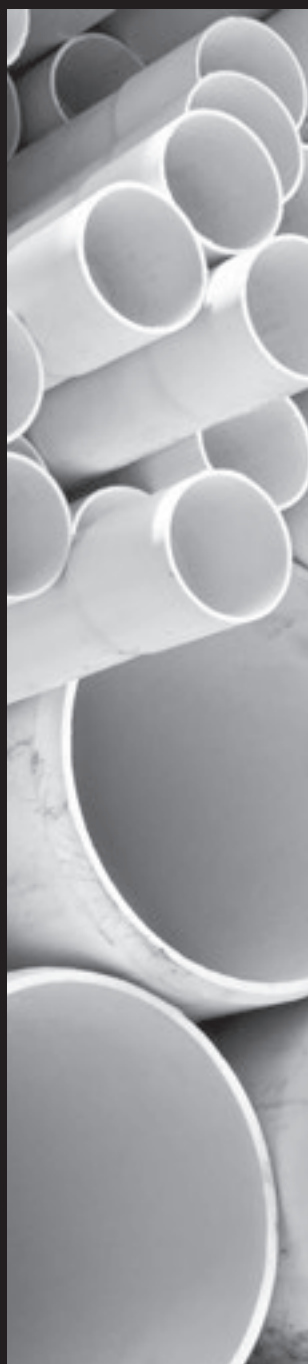
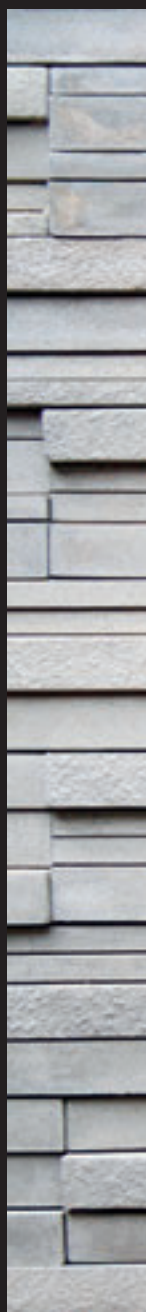


**Les nouveaux
matériaux**

ÉDITORIAL

1

par Philippe Le Gorgeu (78)

L'ASSOCIATION

2

Les nouvelles de l'Association

2

La vie des groupes

3

L'ÉCOLE

6

Mieux connaître l'École

6

Nouvelles de Centrale Lille

8

DOSSIER : LES NOUVEAUX MATÉRIAUX

10

Le Davos des matériaux

10

Nouveaux matériaux pour l'aéronautique

12

De nouvelles matières premières pour l'impression 3D

13

Les matériaux composites à fibres discontinues et leurs avantages

15

En route vers le nano

17

Construction et climat

18

L'acier, un matériau toujours d'avenir

20

Les matériaux à changement de phase pour isoler les bâtiments

21

Danièle Quantin, présidente de Materialia

22

Les terres rares

23

Les matériaux anciens au service de l'innovation durable

25



ISSN 0399.8304
Revue bimestrielle,
éditée par l'association des Centraliens de Lille
566, av. de la République - CS 60012
59043 LILLE CEDEX
Tél. 03 20 51 57 56
contact@centraliens-lille.org
www.centraliens-lille.org

Directeur de la publication : Roland Marcoin
Rédacteur en chef : Roland Marcoin
Commission : Éric Devaux, Hervé Dutheil,
Jocelyne Mongy, Angélique Harant
Secrétaire de la rédaction : Laure Denis
Tél. 03 20 51 06 66
laure.denis@centraliens-lille.org

Dépôt légal : 4^{ème} trimestre 2019
Commission paritaire 0113 G 83185

Publicité :

SEE - 1, voie Félix Éboué
94000 CRÉTEIL - Tél. 01 49 77 67 80

Mise en page :

Francegraphic - 04 77 23 70 80

Impression :

Imprimerie Chirat - 42540 Saint-Just-la-Pendue
Tél. 04 77 63 25 44

ABONNEMENT 2019 (cinq numéros) :
Adhérents : 35 € - Non adhérents : 50 €

Les articles et informations publiés dans L'ingénieur
le sont sous la responsabilité exclusive de leurs auteurs.

Ce numéro a été tiré à 615 exemplaires
et remis à La Poste le 23 décembre 2019.

ÉCONOMIE

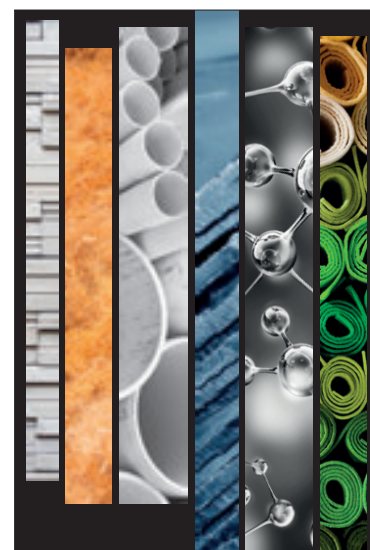
27

Les mécanismes de la titrisation

LA SAGA DES SCIENCES

29

Histoire de la cardiologie



Repères

Le 18 décembre 2019 l'Association comptait 1 814 membres (dont 519 membres juniors) à jour de cotisation. À la même date, L'ingénieur comptait 1 256 abonnés à la revue.

LA TRANSFORMATION PERMANENTE



ES CHERS CAMARADES,

J'avais quitté la présidence de l'association en février 2014 après sept années de mandat, tout en restant membre du conseil d'administration. Je reviens à la tête de celle-ci, suite à la démission de Pascale Auger en octobre 2019. J'agis dans un souci de continuité de fonctionnement de l'Association jusqu'à la prochaine assemblée générale d'avril 2020.

Ces prochaines années, nous devons faire face à de nombreux défis (mais cela n'est pas nouveau et nous avons parfois trop tardé) :

- équilibrer nos ressources et nos dépenses : nous sommes à risque fort pour 2020 et 2021 ;
- combattre l'érosion de nos adhésions ;
- capter nos jeunes promotions dès leur arrivée sur le campus en leur offrant des services adaptés à leurs exigences ;
- adopter des modes de fonctionnement agiles ;
- utiliser intensément les outils de la communication digitale ;
- soutenir très fortement Centrale Lille pour accroître son rayonnement dans une période où les formations de l'enseignement supérieur basées sur l'excellence et la sélection sont remises en cause.

Il y a plusieurs bonnes nouvelles face à ces défis et ce sont des opportunités :

- Centrale Lille se renforce en devenant, en janvier 2020, Centrale Lille Institut, composé de quatre écoles : Centrale Lille, IG2I, ITEEM et, début 2020, l'École nationale supérieure de chimie de Lille (ENSCL) ;
- nos groupes régionaux, internationaux et professionnels sont très actifs et organisent leurs activités systématiquement en commun avec nos associations sœurs des écoles Centrale de province et CentraleSupélec ;
- la communauté des centraliens, c'est plus de 100 000 alumni et c'est une force considérable qui est du même ordre de grandeur que les plus prestigieuses universités anglo-saxonnes.

Les priorités sont claires :

- renforcer nos relations avec l'École et avec les élèves ;
- accueillir fraternellement ENSCL Alumni ;
- renforcer le mentorat des G1 : nous avons environ 100 élèves ingénieurs G1 sur 280 avec un mentor, nous devons viser 80 % de la promotion et idem en G2 et G3 ;
- développer et soutenir les groupes professionnels, régionaux et internationaux dans un esprit inter-centralien. Être le leader dans le nord de la France ;
- valoriser les locaux de notre siège de l'avenue de la République à Lille et en faire une source de revenu ;
- accélérer la transformation digitale et devenir agile en terme de fonctionnement.

Cette situation me renforce dans mes convictions que plus que jamais nous devons nous adapter de façon continue, que chacun doit se mobiliser pour soutenir notre association et participer localement aux nombreuses activités.

Je tenais particulièrement à remercier tous les bénévoles qui, au quotidien, s'impliquent avec dynamisme dans les nombreuses activités au service de tous nos diplômés.

En cette fin d'année, permettez-moi au nom du conseil d'administration et de l'équipe administrative de souhaiter à chacun d'entre vous et à vos proches, de bonnes fêtes de fin d'année et de vous présenter nos meilleurs vœux de bonheur, de santé et de réussite pour 2020.

Philippe Le Gorgeu (78) ■
Président de l'Association

LES ACTUALITÉS DE L'ASSOCIATION

Élection d'un nouveau bureau

Un nouveau bureau a été élu lors du CA électif du 9 novembre suite à la démission de la présidente Pascale Auger (85) le 14 octobre.

- Président : Philippe Le Gorgeu (78) ;
- Trésorier : David Kissenberger (06) ;
- Vice-président administratif et directeur des publications : Roland Marcoin (72) ;
- Secrétaire : Claude Payen (81).

Les autres administrateurs élus gardent leurs attributions et rôles précédents. Un conseil d'administration s'est déroulé le 14 décembre 2019.

Un logo pour la CACS

La Confédération des associations centraliennes et Supélec (CACS) s'est doté d'un nouveau logo ! Auparavant représentée par la bannière des logos des cinq associations, la CACS est maintenant reconnaissable par cette identité avec une étoile à cinq branches qui représente les cinq écoles Centrale dans un design dynamique. Vous pourrez

retrouver ce logo dans les invitations à des événements organisés en commun, dans des publications ou encore sur des outils numériques au bénéfice du réseau centralien. La CACS forme un réseau plus de 100 000 ingénieurs diplômés



des écoles Centrale et Supélec, répartis dans plus de 80 pays. Nous nous donnons pour mission de promouvoir la marque Centrale en France et à l'international et d'offrir à tous les alumni un réseau puissance 5, dynamique et professionnel.

Soutenir les actions du réseau

L'Association a lancé son traditionnel appel à don pour la fin d'année 2019. Quel que soit leur montant, les dons

sont essentiels pour le développement et la pérennité des actions menées par l'Association.

En 2020, des projets importants sont en préparation et vos dons serviront à leur bonne réalisation.

Un des plus important est la refonte complète du site www.centrale-carrieres.com avec la CACS afin d'avoir un site de référence, moderne et dynamique pour consulter et déposer des offres, et d'accéder à l'annuaire commun des centraliens.

Les dons viennent aussi en soutien aux étudiants membres juniors, et vont au profit de la solidarité intergénérationnelle (mobilité internationale, mentorat, rencontre étudiants-diplômés, financement des associations, clubs...) ;

Nous vous invitons à faire un don :

– en ligne, par carte bancaire sur le site de l'Association www.centraliens-lille.org/donation ;

– par courrier : envoyez le bulletin ci-dessous dans une enveloppe sans affranchir à l'adresse suivante : Les Centraliens de Lille - Libre réponse 65 514 - 59043 Lille Cedex.

Merci à tous les fidèles donateurs qui se sont déjà manifestés en cette fin d'année. ■



Bulletin de don

Bulletin à joindre à votre règlement et à envoyer gratuitement à l'adresse libre réponse :
Les Centraliens de Lille - Libre réponse 65 514 - 59 043 Lille

Vos coordonnées

Prénom NOM : _____

Année de promotion : _ _ _ _

Adresse mail : _____

Adresse postale : _____

- ☐ M'envoyer un reçu par mail
- ☐ M'envoyer un reçu par courrier

Votre don

- ☐ 50 euros
- ☐ 100 euros
- ☐ 250 euros
- ☐ 500 euros
- ☐ 1 000 euros
- ☐ Montant libre : _____ euros

LA VIE DES GROUPES

Internationaux et régionaux !

ÉTATS-UNIS

Le marathon de New York.

Le projet de Team CENTRALE Mix Match Move de faire courir des centraliens lors du marathon de New York, événement organisé par Centrale Nantes Alumni en collaboration avec les autres associations centraliennes, a porté haut et fort le label CACS puisque toute la communication avait pour entête le bandeau centralien. Le projet a connu son point culminant le dimanche 3 novembre : 10 coureurs étaient au départ et 10 à l'arrivée de ce marathon mythique et souvent cité comme le plus magique par le cadre, le soutien de toute une ville mais aussi l'un des plus difficiles.

• Plus qu'une course, un projet

Mais le projet n'est pas terminé. En effet, il ne s'agissait pas seulement de faire courir un marathon à des personnes qui y auraient sans doute participé de manière individuelle, mais d'en faire un événement du réseau centralien. Des centaines d'événements de toute sorte où des centraliens sont présents ont lieu dans le monde chaque année : événements professionnels, sportifs, culturels, etc. et ce projet avait pour objectif de travailler sur deux aspects : comment faire un réseau à l'international à l'occasion d'un événement sportif ? Et comment nos associations permettent-elles ces connexions ?

Depuis 2015, des coureurs de toutes les écoles Centrale et Supélec, des diplômés, des étudiants et le personnel des écoles courent ensemble sous le nom d'équipe « CENTRALE » avec



Pique-nique à Central Park avec l'édition du journal contenant les résultats du marathon



Le 3 novembre au soir : ensemble pour fêter le marathon et les médailles lors d'un dîner brésilien.



Remise des t-shirts Centrale Running le 1^{er} novembre lors de l'after-work organisé par les centraliens de New York. De gauche à droite : François Hamy (ECN), Jean-Marie Barth (ECN), Alexis Capelle (ECN), Florent Charrier (ECLy), Marc-Aurèle Taverna (ECM) et son épouse, Pierre Beurrier, Gaël Thomas (ECN), Jean-Philippe Rieuf (ECN). Nota: sont absents sur cette photo Aude Webanck (ECLy) et Grégoire Capelle (ECN).

le désir que ces événements sportifs soient aussi des occasions de développer le réseau. En 2017, nous avons émis deux idées : étendre le concept à d'autres événements sportifs : triathlon, raid, aviron, voile, rugby avec la notion de Mix pour des centraliens de tous âges, toutes écoles, tous pays, étudiants ou diplômés, tous sports confondus ; se choisir une cible forte : faire participer des centraliens sous ce nom d'équipe au marathon de New York en 2019 (deux ans nous

paraissaient nécessaires) et en faire un événement du réseau.

Rapidement, nous avons constitué une petite équipe pour mener ce projet à bien et plus de 100 centraliens, étudiants et diplômés, se sont déclarés intéressés et prêts à s'inscrire immédiatement à ce marathon. Mais la suite a été plus difficile pour différentes raisons : l'organisation du projet, la durée du projet, les trajectoires de chacun au fil de ces deux ans, le coût individuel. C'était peut-être une fausse bonne idée. Nous nous sommes remis en question et, début 2019, nous nous sommes lancés. Chacune des rencontres qui a suivi a été valorisante. Les centraliens se sont montrés divers et riches.

La plupart des participants – coureurs, centraliens new-yorkais ayant aidé à l'organisation ou participé aux différentes rencontres – étaient très loin des associations et souvent non adhérents. Nous avons passé du temps à les traquer en utilisant nos annuaires et LinkedIn. Beaucoup travaillent ou sont étudiants à Columbia et ne se connaissent pas ! Tous ont été très heureux de se voir proches les uns des autres et étonnés de faire partie d'un si beau réseau : « *Ha bon il y a des assos ? C'est génial !* ».

• Les associations doivent aller à la rencontre des centraliens

Le réseau existe et si les associations vont à la rencontre des centraliens là où ils sont, ceux-ci en voient l'intérêt mais ils ne vont pas faire de démarche vers elles. Nous constituons un réseau social qui remplace les contacts habituels impersonnels par des poignées de main bien réelles et utiles chaque jour au regard des préoccupations quotidiennes des centraliens. Le nombre de personnes actives ou proches des associations est aujourd'hui insignifiant vis-à-vis des milliers de centraliens vivant partout dans le monde. C'est aux associations de changer pour les joindre si elles veulent exister.

Au contraire des piles Wonder qui « ne s'usent que si l'on s'en sert », le réseau ne sert que si l'on en use. Ce n'est pas seulement une histoire de communication mais c'est aussi un travail de fond pour nouer un contact après l'autre. Par exemple, j'ai publié les portraits des coureurs et certains ont été immédiatement contactés pour des stages. C'est ce que j'appelle « les effets secondaires non secondaires de Team CENTRALE ».

Une évaluation va être faite auprès des coureurs, de ceux qui ont participé à l'organisation du projet et des centraliens



Jean-Marie à l'arrivée prouve qu'à 67 ans le plaisir de courir est toujours là, surtout après un tel marathon.

qui étaient présents à la soirée centralienne du vendredi 1^{er} novembre pour que nous (associations) en tirions le maximum d'enseignements pour l'animation de nos réseaux en France et à l'étranger.

Un partenariat avec l'association Leucémie Atlantique Espoir Famille (LEAF) qui nous soutient depuis le début du projet, nous a permis de faire participer au sein de notre équipe, Pierre Beurier, 23 ans, concerné par la maladie en 2013 et maintenant en rémission totale.

Les coureurs : Pauline Audinet (ESSEC 15), Jean-Marie Barth (ECN77), Pierre Beurier, Alexis Capelle (ECN97), Grégoire Capelle (ECN17), Florent Charrier (ECLy14), Jean-Philippe Rieuf (ECN88), Marc-Aurèle Taverna (ECM13) et son épouse, Gaël Thomas (ECN08 et Aude Webanck (ECLy14).

François Hamy (ECN) ■

Team CENTRALE Mix Match Move

francoishamy@hotmail.com

Accès au blog pour d'autres photos et information : <http://ny2019centraliens.over-blog.com/>

COORDINATION EST

Visite du site de Bure-sur-Meuse – projet CIGEO.

Par ce beau samedi du 12 octobre, nous nous sommes retrouvés pour la coordination Est, dans une ferme auberge près de Bure-en-Meuse.

Nous avons d'abord fait le point sur les activités des groupes.

L'activité du groupe Alsace a été réduite cette année, du fait de changements dans les différentes associations. Les contacts avec nos homologues de Centrale Paris, Nantes et Supélec sont maintenant établis depuis plusieurs années et le principe de fonctionnement est que chaque association organise un événement dans l'année qui profite à tous. Cela permet ainsi d'avoir un programme étoffé.

Mais, en 2019, de nouveaux présidents se sont mis en place pour les groupes de Centrale Paris et Centrale Nantes, tandis que le président du groupe Supélec cherchait à passer la main sans trouver de remplaçant. De ce fait, la réunion de coordination annuelle qui servait à construire le programme n'a pas eu lieu. Au final, une seule sortie a été organisée : une randonnée en Forêt-Noire le 8 mai 2019.



Le groupe.

Pour l'année à venir, il faudra relancer la coordination. Mais Thomas Fritsch souligne que les habitudes ont la vie dure, à savoir que chaque ingénieur a tendance à privilégier la sortie organisée par SON association.

En ce qui concerne le groupe Nord-Est, les relations avec les associations de Centrale Paris et Centrale Lyon se maintiennent et celles avec Supélec se raffermissent. Nous avons un bon contact avec un correspondant Supélec et nous pouvons espérer avoir la participation d'étudiants Supélec à nos sorties,



Prototype de robot-pousseur de colis (en arrière-plan).



Photo de groupe devant des prototypes de colis de déchets.

car il y a un établissement Supélec à Metz (du moins pour le temps qu'il reste avant la fusion totale avec Centrale Paris). Par contre la relation avec Centrale Nantes est au point mort car notre correspondant désigné a des obligations professionnelles qui l'empêchent de consacrer du temps aux activités de son groupe. À noter également que les relations avec l'URIS Lorraine sont suivies et que nous invitons les membres de l'URIS à la plupart de nos manifestations.

Le programme des événements s'est déroulé comme prévu : un pot Centraliens/Supélec – étudiants le 24 octobre 2018 à Metz, une visite de l'usine PSA de fabrication de moteurs à Trémery le 15 novembre 2018, le traditionnel repas de Saint-Éloi le 30 novembre 2018 à Metz, un pot afterwork le 16 janvier 2019 à Metz, un pot avec les étudiants Supélec le 6 février 2019 à Metz, un pot afterwork le 20 février 2019 à Metz, une conférence de notre camarade Mathieu Renaud (83) sur le thème « 7 questions à se poser pour transmettre dans les meilleures conditions » le 13 juin 2019 à Nancy.

Le programme de fin 2019-2020 sera bâti sur la même trame : repas et sorties orga-

nisées par Centrale Lille et Lyon, pots afterwork organisés par Supélec et peut-être en 2020 un événement organisé par URIS Lorraine.

Pour terminer la réunion, nous avons fixé le rendez-vous de la prochaine coordination Est en Alsace au samedi 10 ou 17 octobre 2020 (date à confirmer). Le lieu envisagé serait la ville de Sélestat.

Visite à l'espace projet CIGEO

Après un bon repas, nous nous sommes rendus à l'espace technologique du laboratoire Cigéo.

Celui-ci étudie la faisabilité du stockage sûr des déchets radioactifs hautement radioactifs et à durée de vie longue, dans une couche d'argile épaisse à 500 m sous terre.

Cette exposition permanente, accessible librement, présente :

- la radioactivité ;
- les déchets radioactifs et leur origine ;
- les activités de l'Andra ;
- les différentes problématiques liées au projet Cigéo.

Des maquettes du projet permettent d'imaginer à quoi ressemblera Cigéo, ainsi que le lieu géographique où il se situera. Le concept de réversibilité et les enjeux de la mémoire du site sont également abordés.

Notre excellent guide a su captiver notre attention sur les problématiques techniques, technologiques, mais aussi sociétales et politiques.

Étaient présents (certains accompagnés) :

Christophe Bach (ECLi90), Patrice Berthod (ECLi87), Étienne Carlu (ECLy07), Thomas Fritsch (ECLi94), Christian Grassin (ECLi65), Christian Jelsch (ECP88), Robert Loboda (ECLi76), René Nannarone (ECLi61), Michel Parizel (ECLy79).

Christophe Bach (90) ■



Visuel taille réelle d'une alvéole de stockage qui sera creusée à 500 m de profondeur pour accueillir les déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL).

LES NOUVELLES DE CENTRALE LILLE

La recherche ferroviaire à Centrale Lille

• Une plate-forme unique en France

Après sept années de développement, une plate-forme de test ferroviaire UniRAIL est opérationnelle à Centrale Lille. Retour sur un projet aussi passionnant qu'exigeant.

UniRAIL est une plate-forme expérimentale unique en France, destinée au contrôle de véhicules autonomes et de systèmes de transport guidés comme le ferroviaire. C'est l'aboutissement d'un travail collectif, le fruit du rassemblement de compétences affirmées dans le contrôle et la signalisation ferroviaire du futur, l'histoire d'un équipement qui ne naît pas d'un jour à l'autre et dont l'évidence s'imposera au fil des usages qui en seront faits. « Des ingénieurs, des étudiants se sont investis dans le développement de cette plateforme. Le fait qu'UniRAIL soit enfin opérationnel, même s'il peut encore s'enrichir de solutions matérielles et surtout logicielles, constitue un motif de fierté », indique Armand Toguyeni – professeur des universités –, en parlant de cet équipement financé par l'UE, les contrats de plan État-Région (CPER), Centrale Lille et le laboratoire CRISAL, sans oublier la Fondation Centrale Initiatives.

Cet enseignant-chercheur pilote à CRISAL l'équipe Moses (modèles et outils formels pour des systèmes à événements discrets sûrs). Fonctionnant sur le modèle d'une plate-forme ouverte à tous les chercheurs, mais sous conditions, l'équipement se présente comme une maquette avec différents systèmes de contrôle et signalisation utilisés dans le domaine de l'ingénierie des transports ferroviaires, qui relève d'une spécialité centralienne, par ailleurs bien ancrée dans l'écosystème spécifique mis sur pied par la région. Une partie de la stratégie de l'équipe Moses repose ainsi sur sa participation active à l'institut de recherche technologique de cette filière Railenium. Engagés dans six programmes répondant aux enjeux de la filière, les essais, les simulations et la maintenance prédictive sont au centre des préoccupations de cet IRT labellisé en 2011. Moses travaille par exemple sur la surveillance, grâce à de nouveaux outils et au recours à

l'intelligence artificielle, des aiguillages de l'infrastructure ferroviaire.

Armand Toguyeni insiste sur l'aspect inédit d'UniRAIL, « par le très large champ de systèmes de signalisation et circulation qu'il couvre et les solutions développées spécialement qu'il embarque et qui ne sont pas sur le marché ». Les véhicules de trains testés font environ 8 centimètres de largeur, ce qui permet d'y loger des nano-PC. « Ce n'est plus à proprement parler de la simulation mais du test en condition. Après être testée sur la plate-forme, une solution peut être directement éprouvée dans les conditions réelles ». Les chercheurs vont travailler sur le concept de cantonnement dynamique qui intéresse de près la filière. Les systèmes de signalisation ferroviaire, hormis dans le métro, reposent sur le principe de cantonnement (ou block-système), c'est à dire d'un espacement de sécurité, d'une zone clairement délimitée dans laquelle une seule circulation est admise, afin d'empêcher qu'un train en rattrape et percute un autre. S'il est possible de réduire cet intervalle en ajoutant des signaux d'espacement et en réimplantant les autres de façon plus uniforme (redécoupage du block), l'exercice a ses limites. D'où l'intérêt de tester des solutions aptes à dynamiser à terme ce cantonnement, en ajustant la distance de sécurité en fonction de la vitesse des trains qui circulent dans le même sens et sur la même portion.

Les enjeux des recherches effectuées par UniRAIL sont partagés et nourriront les collaborations avec l'équipe Estas du laboratoire IFSTTAR et avec le LAMIH de Valenciennes. Sur sa plate-forme de simulation ERTMS (European Rail Traffic Management System), Estas est en mesure de simuler et tester des problèmes de saturation de nœuds ferroviaires. « UniRAIL

peut apporter des compléments à ce simulateur pour de nombreux aspects. L'idée serait de coupler nos systèmes ». UniRAIL, c'est enfin un formidable outil pédagogique mis à la disposition des étudiants pour mettre en œuvre des solutions simples d'automatisme (courant de recherche sur le train autonome), de réseaux, d'objets connectés ou d'IA.

Charte de déontologie des métiers de la recherche

Dans un contexte de compétition internationale et de naissance d'un marché mondial de l'enseignement supérieur, les écoles d'ingénieurs doivent engager des réflexions et des actions communes. C'est pourquoi la CDEFI (conférence des directeurs des écoles françaises d'ingénieurs) a signé cette année la charte nationale de déontologie des métiers de la recherche qui concerne l'ensemble des femmes et des hommes d'un établissement ou d'un organisme qui contribuent à l'activité de recherche et s'engagent à la respecter. Cette charte a pour objectif d'explicitier les critères d'une démarche scientifique rigoureuse et intègre, applicable notamment dans le cadre de tous les partenariats nationaux et internationaux. Elle se décline selon sept principes : le respect des dispositifs législatifs et réglementaires ; la fiabilité du travail de recherche ; la communication ; la responsabilité dans le travail collectif ; l'impartialité et l'indépendance dans l'évaluation et l'expertise ; les travaux collaboratifs et le cumul d'activités.

La CDEFI souligne l'importance pour ses établissements de l'intégrité scientifique, de la conduite honnête de toute recherche et de la déontologie. Elle adhère non seulement aux valeurs et principes de l'intégrité scientifique, mais s'engage également à les défendre et à promouvoir leur adoption et application. Afin d'affirmer son engagement, Centrale Lille a ratifié la charte et la mettra en œuvre à travers la promotion de bonnes pratiques en recherche et la sensibilisation - et la formation - de son personnel et de ses étudiants.



La chaire internationale CATBIOINNOV

La chaire internationale CATBIOINNOV, portée par Robert Wojcieszak – chargé de recherche CNRS à Centrale Lille et membre de l'équipe VAALBIO de l'unité de catalyse et chimie du solide (UCCS) dirigée par Sébastien Paul –, vise le développement de nouvelles technologies de conversion catalytique de biomasses récoltées dans la région des Hauts-de-France, telles que la betterave, les résidus de blé et de colza ou encore le miscanthus. L'objectif de cette chaire est la production de bio-carburants et de produits chimiques à haute valeur ajoutée à partir de ces ressources renouvelables. Le projet repose sur le concept de bioraffinerie « zéro déchet » et vise le développement de procédés flexibles et modulaires qui valorisent tous les composants de la biomasse. Il s'inscrit dans le projet pilote RECABIO de l'I-SITE université Lille – Nord Europe et est également financé par la métropole européenne de Lille et la région des Hauts-de-France (via le programme du fond européen FEDER). Dans ce cadre, Centrale Lille accueille depuis novembre 2019, pour une durée de trois ans, deux chercheurs brésiliens : Fabio Bellot Noronha et Ivaldo Itabaiana qui développeront une partie de leurs projets à l'UCCS en utilisant notamment le potentiel de la plateforme REALCAT située dans nos locaux. Grâce aux bourses doctorales et post-doctorales accordées au projet CATBIOINNOV, un étudiant en doctorat et trois chercheurs post-doctoraux ont été également engagés depuis le 1^{er} novembre. La durée totale du projet est de 36 mois avec un budget total de plus de 1,5 M€.



Une œuvre d'art parisienne sculptée à Centrale Lille

Les images de la musique, voilà le nom de l'œuvre imaginée par l'artiste Alain Fleischer et réalisée à Centrale Lille au sein de l'atelier AIMER (atelier inter-établissements mutualisé en enseignement et recherche), qui a été inaugurée mardi 26 novembre Place Carmen, devant le conservatoire Georges Bizet à Paris (20^{ème} arrondissement). Ce projet a été développé dans le cadre de l'appel à projets Embellir Paris lancé par la Ville de Paris afin de favoriser les initiatives et les projets d'embellissements de certains espaces parisiens. L'œuvre est une sculpture qui prend la forme de trois totems verticaux en acier corten. Chacun de ces totems est évidé pour visualiser, en empreinte négative, la modulation sonore correspondant aux partitions pour piano, trompette et chant d'un air célèbre de l'opéra Carmen, en hommage au compositeur Georges Bizet (dont le conservatoire porte le nom, place Carmen). À travers ce travail, Alain Fleischer donne une forme physique à la réalité immatérielle des sons et de la musique. Ce projet a été rendu possible par la collaboration avec notre établissement puisque l'œuvre d'art a nécessité près de deux mois de travail dans nos locaux, sculptée avec la découpe jet d'eau puis soudée.

Alain Fleischer a écrit une cinquantaine d'ouvrages publiés à ce jour : romans, recueils de nouvelles et essais, cinéaste (longs métrages de fiction, cinéma expérimental, films documentaires sur l'art). C'est aussi un artiste plasticien avec de nombreuses expositions monographiques en France et dans divers pays étrangers. Il a été lauréat de l'Académie de France à Rome, Villa Médicis. Sur mission du Ministère de la Culture, il a créé Le Fresnoy, studio national des arts contemporains à Tourcoing, dont il est le directeur depuis son ouverture en 1997.

Les 30 ans du laboratoire L2EP

Le laboratoire d'électrotechnique et d'électronique de puissance de Lille (L2EP) a célébré en 2019 ses trente ans d'existence. Un événement a été organisé à Polytech Lille, en présence de toutes les personnes qui l'ont créé, des partenaires institutionnels, académiques et industriels qui lui font confiance, et de ses tutelles qui le soutiennent. En 1989, les forces académiques en génie électrique de la métropole lilloise s'unissent pour former le L2EP et les enseignants chercheurs de l'Institut industriel du Nord (IDN) et de l'université des sciences et technologies de Lille se regroupent. Plus tard, en 1994, les collègues de l'École nationale supérieure des arts et métiers de Lille rejoignent le L2EP, suivis en 1998 par ceux de Hautes études industrielles. Aujourd'hui le L2EP compte une centaine de membres issus de ses quatre tutelles, devenues l'université de Lille, Centrale Lille, A&M sciences et



technologies et Yncréa HdF. Fortement ancré dans le paysage régional, le L2EP est un acteur national important du génie électrique, aussi bien dans le monde académique qu'au niveau industriel, et il a un rayonnement international, notamment via l'organisation de conférences majeures dans le domaine. ■

LE GALA 2019

Un article rédigé par les membres de l'association Gala Centrale Lille

Le samedi 23 novembre dernier eut lieu l'édition 2019 du Gala de l'École Centrale de Lille – une soirée bien particulière dans un lieu d'exception.

Programmé après la remise des diplômes, c'est à l'hostellerie Klok Hof (Courtrai) que se déroula cette année le Gala de Centrale Lille. Réunissant étudiants, direction et diplômés autour d'un dîner, d'animations puis d'une soirée en musique, il s'est agi, une fois de plus, d'un incontournable moment de la vie centralienne.



L'HOSTELLERIE KLOKHOF

Traditionnellement, celui-ci se dessine autour d'un thème qui inspire la communication et la décoration réalisées autour de la soirée. Nous avons cette année choisi **l'Art Pictural** et avons fabriqué en conséquence : des menus et plans de tables sur des chevalets, des panneaux indicateurs en forme de palettes, une affiche et un trombinoscope à l'image de tableaux...



NOTRE AFFICHE

Enfin, le partenariat établi avec la galerie d'art L'ILLU nous a permis d'exposer trente œuvres contemporaines dans la salle en début de soirée.

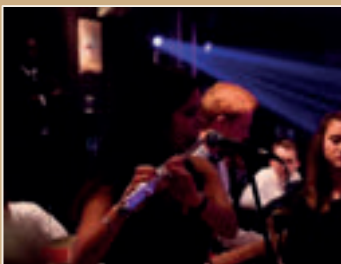
La soirée se déroulant en Belgique, nous avons mis en place un système de navettes gratuit aux départs de Lille et de

la résidence Léonard-de-Vinci : chacune était supervisée par un membre de l'Association afin d'assurer un trajet efficace et agréable pour tous. À leur arrivée était proposé un cocktail apéritif, qui s'ensuivit d'un dîner placé préparé par un traiteur.



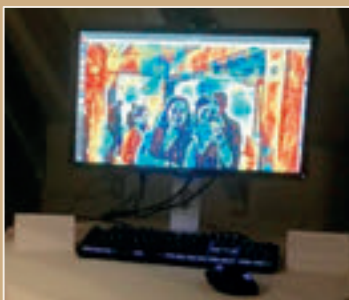
LE MENU PRINCIPAL – FONDANT DE PINTADE AUX GIROLLES

Nous avons pris soin d'élaborer, en plus du menu principal, des repas alternatifs prenant en compte les allergies et régimes alimentaires de chacun !



LE CONCERT DU PLUG'IN

En parallèle du dîner, plusieurs associations et étudiants centraliens proposèrent des prestations qualitatives et originales : concerts réalisés par Centrale Musique ou par le Plug'In, tours de magie présentés par Centrale Magie, projet d'intelligence artificielle...



LE PROJET D'IA

Nous avons également mis en place une tombola dont nous avons révélé les résultats en direct pendant le dessert. Tour à tour, les participants gagnants furent appelés à récupérer leurs lots – enceinte, places dans un spa

privatif, bouteille de vin... obtenus grâce à nos partenaires !

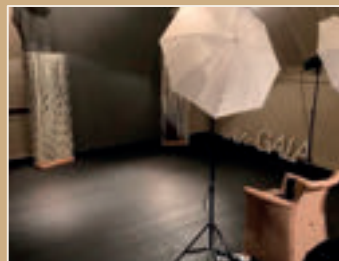
Par ailleurs, M. Bigand nous fit l'honneur d'un discours à l'attention de la promotion diplômée. Sa parole touchante à propos de leurs années centraliennes en émut plus d'un et atteint, en outre, les étudiants de première et deuxième années, qui parvinrent sans doute à se projeter quelques années au-delà de ce moment poignant – au terme de leurs études et au commencement de leur vie active.



L'ETIQUETTE DE CHAMPAGNE PERSONNALISÉE

Après le dîner, la soirée se prolongea en musique avec un DJ professionnel et la possibilité d'acheter, entre autres, des bouteilles de champagne personnalisées pour la promotion 2019.

Les associations centraliennes d'audio-visuel (CLAP et Comm'Flash) étaient également présentes pour immortaliser cette soirée hors du commun. Nous avons, avec leur aide précieuse, élaboré un stand photo à l'étage qui permit de capturer les moments marquants de la soirée, et de la graver dans les souvenirs de tous.



NOTRE STAND PHOTO

Enfin, nous remercions grandement l'ensemble des partenaires cités précédemment ainsi que l'association des centraliens de Lille, qui ont contribué à faire de cette soirée un moment exceptionnel !



LES ÉLÈVES INNOVENT

Projet d'étudiants : SelfHy

Dans le cadre de leur cursus centralien, les étudiants doivent se répartir en groupe de douze et travailler en équipe sur un projet pendant leurs deux premières années. Ces projets peuvent être ceux d'une entreprise privée, d'une association ou encore d'un organisme public.



Notre équipe mixte, composée de futurs ingénieurs, d'élèves en double diplôme avec l'EDHEC et d'un étudiant chilien ayant suivi une formation en génie électrique, présente des compétences pluridisciplinaires. Nous avons été touchés par le dynamisme de l'association ACoPrEV ainsi que par sa volonté de promouvoir l'autoconsommation durable en milieu rural. Nous sommes conscients de l'enjeu d'une telle problématique dans le monde actuel et fiers d'apporter notre contribution à sa résolution.

Les hameaux ruraux de la vallée de la Drôme ont des besoins particuliers. À titre d'exemple, l'élevage de bovins suppose l'utilisation de chambres froides, alimentées en continu pour maintenir la chaîne du froid. La difficulté est d'assurer une alimentation permanente et stable en énergie renouvelable. Or aucune énergie verte n'est parfaite. Ainsi l'énergie solaire, qui pourrait être utilisée, dépend trop de l'ensoleillement. Le choix d'ACoPrEV a été de se tourner vers la combinaison

de deux énergies propres : l'énergie photovoltaïque pour produire de façon autonome de l'hydrogène à l'aide d'un électrolyseur et l'hydrogène qui, stocké dans des bombonnes, sera utilisé à la demande. ACoPrEV travaille avec de nombreux partenaires tels que NovEner, Iterare ou encore le service public des énergies dans la Drôme (SDED).

La première étape de notre projet avait pour but de définir les besoins de l'association. Au vu du manque de visibilité et d'expertise, nos premiers travaux ont consisté à réaliser des missions ponctuelles pour l'avancée globale du projet d'ACoPrEV, telles que la refonte du site web acoprev.fr, la préparation d'un crowdfunding ainsi qu'un recensement des toits exploitables dans la vallée pour l'installation des panneaux solaires. À l'issue de ces minces contributions, nous avons ressenti le besoin de réorienter notre travail. C'est ainsi qu'est né le projet étudiant SelfHy, recentré sur un nouvel objectif : la



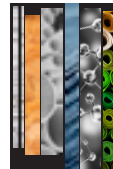
conception d'un prototype de station de production d'hydrogène à partir d'énergie verte. Il servira d'une part à des fins de communication et de sensibilisation auprès des populations concernées, et d'autre part à faire progresser la deuxième phase du projet d'ACoPrEV : la mobilité basée sur l'hydrogène et l'implantation de stations d'hydrogène d'une capacité adaptée à un site rural touristique.

Où en sommes-nous?

Notre projet a été audité en mai (gestion de projet et technique) et nous sommes conscients que les échéances imposées sont proches pour un projet aussi ambitieux. Mais nous sommes déterminés à nous investir encore plus pour le mener à bien. Le dimensionnement touchant à sa fin, il s'agit à présent de concevoir, acheter les composants nécessaires, fabriquer le prototype et le tester jusqu'à l'obtention d'un résultat satisfaisant aux exigences. En parallèle, nous allons continuer à accroître la visibilité d'ACoPrEV – notamment via les réseaux sociaux et l'alimentation du site www.acoprev.fr – et lancer le crowdfunding. Nous aimerions travailler avec des professionnels pouvant nous apporter leur expertise technique et nous aider dans notre démarche.

L'ASSOCIATION ACOPREV (ASSOCIATION COMMUNALE DE PRODUCTION D'ÉNERGIE VERTE)

Elle a été créée en 2017 à l'initiative de Gérard Dellinger (ECLi55) et Alain Vincent, respectivement vice-président et président de l'association. Ils ont constaté que les actions en faveur de la production et de la consommation d'énergie verte étaient bien plus développées dans les villes qu'en milieu rural. C'est pour répondre à ce manque d'initiatives qu'a été créée ACoPrEV. L'association regroupe six communes dans la vallée de Quint (Drôme) autour de la production, de l'utilisation des énergies renouvelables en milieu rural et de la mobilité propre. L'association étant essentiellement axée sur la communication citoyenne et l'explication des projets réalisés, la SAS ACOPREV Centrales villageoises du Val de Quint a été créée en 2018 pour gérer les investissements.



DOSSIER : LES NOUVEAUX MATÉRIAUX

CES DERNIÈRES ANNÉES, les revues centraliennes ont fait paraître des dossiers sur le big data, la blockchain, la voiture autonome, la santé, la silver économie, l'énergie... autant de sujets d'actualité sous-tendus par le développement du numérique, des outils informatiques et de la vitesse de traitement des données. Mais aucun de ces domaines ne pourrait se développer sans les matériels, les outils et les machines qui leur sont dédiés et qui font appel aux nouveaux matériaux ou aux matériaux anciens qui connaissent un nouvel usage grâce à un changement de leur élaboration et de leurs caractéristiques physiques.

Il s'agit – entre autres – des terres rares indispensables à la fabrication des téléphones et ordinateurs, des nanomatériaux pour l'électronique, des céramiques pour le médical et l'aéronautique, des matériaux composites pour le transport aérien et l'aérospatial, des matériaux métalliques et alliages de nouvelle génération, plus résistants et plus légers, pour l'automobile, le

ferroviaire et les avions. C'est ce que vous découvrirez dans les articles qui suivent. La recherche est intense dans tous ces domaines et sans doute n'est-on qu'aux prémices de nouvelles découvertes et de nouvelles applications.

Mais il faut prendre en compte le coût énergétique et environnemental pour parvenir à l'objet fini ainsi que la possibilité de le recycler en fin de vie. On sait désormais que le progrès doit être soutenable et l'économie circulaire. Et c'est alors que l'on voit des matériaux anciens se mettre au service de l'innovation durable.



Roland Marcoin (72) ■
Rédacteur en chef de *L'Ingénieur*



Céline Jacquot ■
Rédactrice en chef adjointe
de la revue *Centraliens*

LE DAVOS DES MATÉRIAUX

Interview de Victoire de Margerie.

Lancé en 2015 par Victoire de Margerie et Philippe Varin, le World Materials Forum prend place chaque année à Nancy, réunissant des patrons d'entreprises de toutes tailles venant du monde entier pour débattre avec les plus grands professionnels, politiques et représentants d'ONG. Victoire de Margerie est également présidente de la start-up de deep-tech Rondol Industrie et administratrice des groupes Arkema, Babcock et Eurazeo. Elle nous explique les tenants et aboutissants de cet événement devenu une référence dans le monde des matériaux et du développement durable.

• **D'où est venue l'idée du WMF ?**

Victoire de Margerie : De plusieurs discussions avec Philippe Varin – ancien président du directoire de PSA Peugeot Citroën, aujourd'hui président de France Industrie et du conseil d'administration d'Orano –, durant lesquelles nous nous inquiétions de la polarisation des positions vis-à-vis des matériaux. D'un côté on trouvait les partisans d'un retour en arrière général, considérant par exemple qu'il faut bannir tous les emballages en plastique, malgré le rôle majeur qu'ils jouent dans la lutte contre la malnutrition. Et de l'autre ceux pour qui le rejet de mon-

tagnes d'emballages dans la mer ne pose aucun problème. Nous étions - et sommes toujours - pour notre part persuadés qu'il est possible de créer des solutions gagnant-gagnant, qui permettent au maximum de gens d'accéder aux avantages de la classe moyenne tout en étant respectueux de l'environnement. Nous sommes partis du principe que c'était possible, et c'est ainsi que nous avons créé le forum. Et André Rossinot nous a proposé le site de Nancy, qui s'est révélé idéal.

• **À quel public vous adressez-vous ?**

V.M. : Au départ, nous avons réuni une dizaine de grands patrons mondiaux pour réfléchir au pro-

blème, définir les priorités... Aujourd'hui, le WMF réunit des industriels producteurs de matériaux, des utilisateurs, des start-up, des organisations non gouvernementales, des politiques, des centres de recherche... Avec une ambition : utiliser les matériaux de manière plus intelligente, en moindre quantité et plus longtemps.

• **Quelles réalisations le forum a-t-il à son actif ?**

V.M. : Dès le départ nous avons voulu lancer des actions phares qui permettraient d'obtenir des résultats rapides. Nous avons ainsi créé en 2016 un indice de criticité des matériaux (criticality assessment). C'est un indice fondé sur plusieurs critères, technologiques,

économiques, géopolitiques... définissant pour chaque élément de la table périodique un niveau de criticité. À titre d'exemple, le plus haut niveau est actuellement atteint par le cobalt : c'est un matériau crucial pour la sécurité des batteries électriques, il ne reste que 70 ans de réserve au mieux, et au moins 60 % des ressources minières sont en république démocratique du Congo,



Victoire de Margerie.

LE FORUM EN QUELQUES CHIFFRES

5 éditions et 1 300 participants venus de 30 pays depuis 2015 ; 80 patrons de multinationales et 280 membres de comités exécutifs ; 200 patrons de start-up ; 200 institutions publiques ; 400 chercheurs et experts.



pays à la stabilité non garantie. Cet indice est établi tous les ans par le WMF, le bureau de recherches géologiques et minières, CRU et McKinsey et est devenu une véritable référence dans l'industrie.

Nos séances plénières thématiques – recyclage des plastiques, gestion de l'eau, batteries électriques, etc. – aboutissent toujours à des propositions d'action ou à des engagements concrets. En 2019, les grands groupes – Arkema, BASF, BMW, Faurecia, JX Nippon Mining & Metals, Renault, Solvay, Suez, Umicore... –, startups et professionnels présents se sont ainsi engagés à réduire de deux tiers les pertes d'eau au niveau mondial en réduisant de 50 % les coûts d'énergie associés d'ici à 2030, à diviser par deux (de 30 à 15 minutes) le temps de charge jusqu'à 80 % des nouvelles batteries pour véhicules électriques d'ici à 2030, à augmenter de 40 % (de 700 à 1 000 Wh/L) la densité énergétique des nouvelles batteries au niveau cellule, à collecter et recycler ou réutiliser 80 % des batteries de véhicules électriques et de téléphones portables d'ici à 2035.

• **Depuis 2017, vous avez mis l'accent sur les indicateurs clés de performance, ou KPI...**

V.M. : Nous avons tous les ans une séance plénière sur le sujet qui permet à de grands acteurs industriels de venir présenter les critères qu'ils suivent et les actions qu'ils ont mises en place pour améliorer la performance : Airbus avec le *Buy to Fly* ou l'optimisation du temps d'utilisation des avions, PSA avec l'incorporation de matériaux recyclés dans la fabrication de nouvelles voitures, Mitsubishi avec moitié moins de consommation d'énergie et de déchets de production grâce à la coulée continue de l'acier.

• **Il y a également un concours annuel de start-up...**

V.M. : Dès l'origine nous envisagions le forum comme un nouveau « Davos » – dans sa configuration du début, non commerciale, en petit comité et avec un focus sur l'action –, et nous avons donc invité surtout des grands patrons. Or ceux-ci nous ont vanté les mérites de leur R&D, mais en admettant leur manque de réactivité. Nous avons donc lancé ce concours de start-up, qui ont plus de flexibilité et peuvent proposer des solutions rapides que les grands comptes recherchent. On en présélectionne en général une cinquantaine, du monde



Le forum a lieu tous les ans à Nancy, et réunit tous les acteurs du monde des matériaux, producteurs, utilisateurs, chercheurs...

entier, et une quinzaine sont nommées au concours et invitées à tenir un stand pour se présenter aux grands patrons présents lors de l'événement de juin. Le vainqueur emporte un prix de 50 000 euros et une étude de marché. J'appelle d'ailleurs les startups centraliens à candidater, ils

sont toujours les bienvenus. Nous avons également développé une appli qui met en relation les CEO de start-up et de grandes entreprises, afin de fluidifier les relations.

• **Comment s'annonce la prochaine édition ?**

V.M. : Le thème sera : « sûr et rapide » (*sound and fast*) et 80 % des partenaires et intervenants ont déjà répondu. Le programme sera finalisé en décembre, ce qui est très tôt pour ce type d'événement. Puis nous réunirons au téléphone tous les intervenants, dès janvier, pour préparer les tables rondes de juin. Au début, comme d'habitude, personne ne sera d'accord, mais à force de discussions, nous finirons par définir et présenter des solutions « gagnant-gagnant ».

• **Peut-on identifier des tendances dans le domaine des nouveaux matériaux ces dernières années ?**

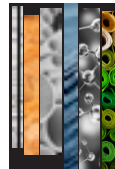
V.M. : Difficile de répondre de manière exhaustive... je citerai le graphène, dont la liste d'applications n'en finit plus d'être mise à jour tant elle s'étend à l'infini, que ce soit en tant que matériau pur ou qu'additif. Et les composites assemblant plusieurs polymères comme les vitrimères, qui permettent de réaliser des matériaux aux caractéristiques physiques inédites. Et l'on peut aussi s'attendre à des percées significatives dans les nouveaux procédés permettant de fabriquer des matériaux classiques : électrolyse de l'aluminium totalement décarbonée, transformation à l'hydrogène du minerai de fer (– 80 % émissions de CO₂), électronique de spin qui permet de diviser par dix la consommation d'électricité pour le stockage des données par exemple.

Propos recueillis par **Julien Meyrat** ■

Nota : Le site du WMF regroupe tous les comptes rendus des séances : worldmaterialsforum.com.

QUELQUES START-UP NOMINÉES AU WMF

- Cuberg (2018, États-Unis) : électrolyte liquide ininflammable pour batteries.
- Imagine (2018, Australie) : formulation à base de graphène pour transformer les textiles en capteurs intelligents afin d'identifier les fuites lors de l'installation de barrages.
- Mallinda (2018, États-Unis) : composites entièrement recyclables à base de vitrimères, permettant des cycles de fabrication d'une minute ou moins.
- Rein4Ced (2018, Belgique) : fibres de carbone et d'acier pour un nouveau composite alliant la légèreté du carbone et la résistance de l'acier.
- Aeronautical Services (2019, Italie) : matériaux nanostructurés pour performances extrêmes dans le domaine du blindage haute température et anti-incendie, l'absorption d'ondes électromagnétiques et l'isolation acoustique.
- Aligned Carbon (2019, États-Unis) : nanotubes de carbone alignés permettant d'intégrer les transistors dans le procédé de fabrication des semi-conducteurs.
- Demeta (2019, France) : nouveau polymère à partir d'un dérivé secondaire sous-exploité de l'industrie pétrolière (dicyclopentadiène) avec une faible empreinte carbone et énergie et des performances supérieures à l'époxy, le polyester ou le polyuréthane.
- Membrasenz (2019, Allemagne) : nouveau matériau composite utilisé pour les membranes de séparation gazeuses, générant 30 % de réduction de coût dans la production d'hydrogène.
- Nawa (2019, France) : nouveau matériau d'électrode pour une batterie emmagasinant l'électricité plus rapidement.



NOUVEAUX MATÉRIAUX POUR L'AÉRONAUTIQUE



Thibaut Caritey (ECM11) est originaire d'un charmant petit village d'irréductibles Frانس-Comtois. Il a commencé sa carrière sur le site d'Airbus Helicopter, pour ensuite s'expatrier 4 ans à Singapour chez Naval Group. Aujourd'hui, basé à Toulouse, il conseille les bureaux d'études aéronautiques dans leur choix de matériaux.

La traque des kilogrammes !

L'industrie aéronautique a toujours été en quête de matériaux innovants afin de réduire la masse des machines volantes. C'est d'autant plus vrai aujourd'hui, avec le développement accéléré des véhicules électriques/hybrides. Chaque kilogramme économisé permet de parcourir davantage de distance avec la même énergie. Autrement dit, c'est aussi moins de kérosène, et donc moins de CO₂ produit, pour le même vol. Sachant que le carburant représente environ 30 % des coûts d'exploitation d'une compagnie aérienne, on comprend facilement pourquoi Airbus et Boeing ont un intérêt économique évident à construire un aéronef le moins gourmand et le plus léger possible.

Parmi les matériaux métalliques les plus utilisés en aéronautique, on trouve les alliages d'aluminium. Avec une densité de 2,7 g/cm³, c'est l'un des alliages métalliques de structures les plus légers qui soit. À titre de comparaison, la densité du titane est de 4,5 et celle de l'acier 8 g/cm³.

Toutefois, il existe des matériaux moins connus du grand public et pourtant encore plus légers que les alliages d'aluminium : les alliages de magnésium. Avec une densité de 1,8 g/cm³, ils offrent des perspectives extrêmement intéressantes pour la conception de nouveaux programmes aéronautiques. De nombreux alliages de magnésium ont été développés depuis les années 30 mais n'ont jamais vraiment réussi à se

démocratiser. Ils ont connu leur âge d'or dans les années 50 puis ont décliné. Les propriétés mécaniques étaient médiocres, avec notamment des faibles performances lors des tests de fluage. De plus, les principales difficultés, qui semblaient insurmontables, étaient alors d'élaborer des alliages résistant à la corrosion et qui puissent passer les tests au feu des autorités de sûreté aérienne. En effet, le magnésium pur sous forme de poudre s'enflamme violemment lors d'une réac-



Rotor de queue de l'hélicoptère Boeing Apache AH64.

tion d'oxydation avec l'oxygène de l'air. Cette réaction exothermique produit une flamme vive qu'on retrouve dans les feux d'artifices ou dans les leurres d'autodéfense des avions militaires pour imiter la signature thermique des moteurs et tromper le tir adverse.

Même si c'est une autre paire de manches que d'enflammer un solide bloc d'alliage de magnésium, les accidents en lien avec ce dernier, bien que rarissimes, marquent les esprits. L'industrie aéronautique se souvient par exemple d'un départ de feu en 1967, sur le SR-71

Blackbird, l'avion de chasse le plus rapide du monde. À la suite de l'explosion des pneus du train d'atterrissage, les roues en magnésium, saturées de chaleur, se sont enflammées et ont propagé les flammes sur le reste de la carlingue.

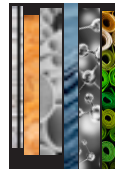
De nouveaux alliages, plus résistants

Ces quinze dernières années, de nombreux travaux de recherche ont permis la genèse de nouveaux alliages de magnésium à hautes performances compatibles avec ces exigences aéronautiques. Aujourd'hui, ils pointent le bout de leur nez et ouvrent de nouvelles perspectives. En particulier, certains alliages, dopés aux terres rares (néodyme, yttrium par exemple), présentent une résistance à la corrosion 10 fois supérieure aux anciennes générations. De plus, lors des tests au feu, ces terres rares semblent créer une couche d'oxyde protectrice qui réduit voire empêche la propagation du feu. Ces alliages ont en plus l'avantage d'avoir une excellente tenue mécanique à des températures jusqu'à 200 °C alors que

même les alliages d'aluminium vont progressivement s'affaiblir au-delà de 150 °C.

Ils permettent désormais de produire des pièces aéronautiques complexes en fonderie au sable ou en usinant un bloc de métal à l'aide de machines à commande numérique à 5 axes. Cela permet un gain de masse significatif de l'ordre de 20 à 30 % comparé aux alliages d'aluminium en conservant des procédés de fabrication traditionnel.

Les principales applications aujourd'hui sont des pièces des moteurs d'avions à réaction ou à pistons ainsi que des carters de boîtes de transmission d'hélicoptères. Demain, de nombreuses pièces en alliages de magnésium équiperont les futurs aéronefs hybrides ou électriques et permettront l'essor de ces nouvelles technologies.



DE NOUVELLES MATIÈRES PREMIÈRES POUR L'IMPRESSION 3D



Guillaume de Calan (ECP08), est le président et directeur commercial de Nanoe, société qu'il a fondée en 2008 pendant sa formation dans la filière Centrale entrepreneur, avec son associé Guillaume Bouchet Doumenq. Il a depuis été lauréat de plusieurs prix de créateur d'entreprise, notamment le concours du ministère de la recherche pour la création d'entreprise innovante (I Lab), et a développé la société pour en faire l'un des leaders européens des matières premières avancées pour les céramiques techniques.



Guillaume Bouchet Doumenq (ECP08) est le cofondateur et directeur technique de Nanoe. Il est l'inventeur principal de la technologie Zetamix. Il a mis au point la formulation des filaments céramiques, formulation qui est maintenant protégée par un brevet.

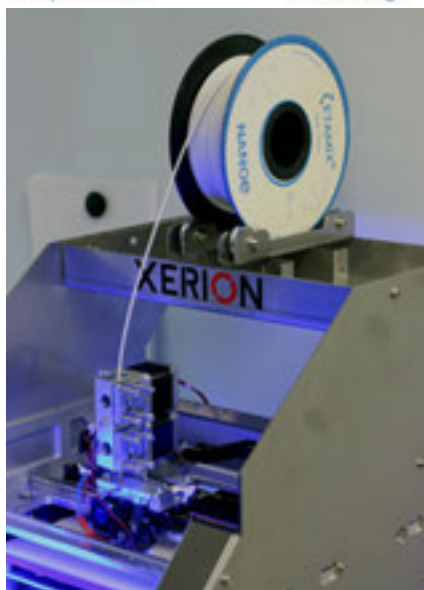
SI L'IMPRESSION 3D métal et céramique connaît un fort développement avec 30 % de croissance annuelle, l'industrie peine encore à l'adopter. En cause, notamment, des coûts d'investissement importants et un design des pièces mal adapté à cette technologie. Pour répondre aux besoins de ce marché, Guillaume de Calan et Guillaume Bouchet Doumenq, cofondateurs de Nanoe, ont développé des solutions d'impression 3D adaptées aux contraintes des industriels.

Le marché de l'impression 3D métal et céramique est en pleine expansion, avec un volume qui devrait atteindre les 3 milliards de dollars en 2025 et une croissance de plus de 30 % par an. L'adoption de cette technologie dans l'industrie connaît néanmoins de nombreux freins : investissement importants, coût des pièces plus élevé que par les procédés traditionnels, design des pièces mal adapté à l'impression 3D, qualification des produits, notamment pour le médical ou l'aéronautique... Un point en particulier bloque l'adoption de ces technologies par les PME et ETI : le niveau d'investissement élevé nécessaire pour se lancer dans l'impression 3D, couplé à un manque d'applications à court terme. En effet, à l'inverse des imprimantes 3D plastique, un système complet d'impression 3D métal ou céramique coûte généralement entre 300 000 et 1 million d'euros.

Des filaments pour l'impression 3D

C'est pour répondre à ce problème que Nanoe a lancé en 2018 une nouvelle technologie d'impression 3D céramique et

métal à partir d'une ligne de filaments constitués de poudres liées par un liant thermoplastique (photo ci-dessous). Ces filaments permettent d'imprimer n'importe quelle pièce d'après un fichier CAO. Cette technologie est la méthode d'impression 3D la plus abordable et la plus développée dans le monde, avec plus de 1 million d'imprimantes déjà installées et plus de 400 000 nouvelles installations par an depuis 2018. Les filaments sont conçus pour être compatibles avec toutes ces imprimantes, avec peu ou pas de modifications nécessaires.



Les filaments céramique développés par Nanoe pour l'impression 3D.

L'impression 3D de matières premières techniques représente un potentiel énorme. La gamme de filaments développée par Nanoe a notamment été pensée pour des applications de prototypage et de fabrication d'outils sur mesure.

Cette nouvelle technologie pour l'impression 3D métal et céramique possède plusieurs avantages qui la rendent complémentaire à d'autres procédés d'impression 3D : coût d'investissement très faible, large choix de matériaux, possibilité d'imprimer des pièces creuses

à forte complexité et sans supports et des multimatériaux, et rapidité du procédé.

Un procédé en trois étapes

Similaire aux procédés industriels d'injection CIM et MIM (*ceramic injection molding* et *metal injection molding*), le procédé développé par Nanoe compte trois étapes (voir schéma ci-dessus) :

- la pièce est d'abord imprimée sur n'importe quelle imprimante à filaments ;
- elle est ensuite déliantée : par trempage dans un solvant, le liant plastique présent dans la pièce est retiré ;
- enfin la pièce est cuite à haute température afin d'opérer le « frittage », qui la rend plus dense et plus solide. Cette



opération entraîne un retrait de la pièce d'environ 20 %.

À l'issue de ces trois étapes, on obtient donc des pièces totalement métalliques ou céramiques, et ayant des propriétés très proches des matériaux obtenus par procédé traditionnel.

Un large choix de matériaux

Les premiers filaments disponibles sont fabriqués en utilisant les matières premières de Nanoe : alumine et zirconium principalement. Cependant, un des principaux avantages de cette technologie est sa capacité à imprimer un large choix de matériaux, céramique ou métal. L'entreprise a donc très rapidement lancé le développement d'une large gamme de filaments : en acier 316L, carbure de silicium, carbure de tungstène, inconel, titane, cuivre... Ces nouveaux matériaux seront progressivement mis sur le marché en 2019 et 2020.

Des applications prometteuses

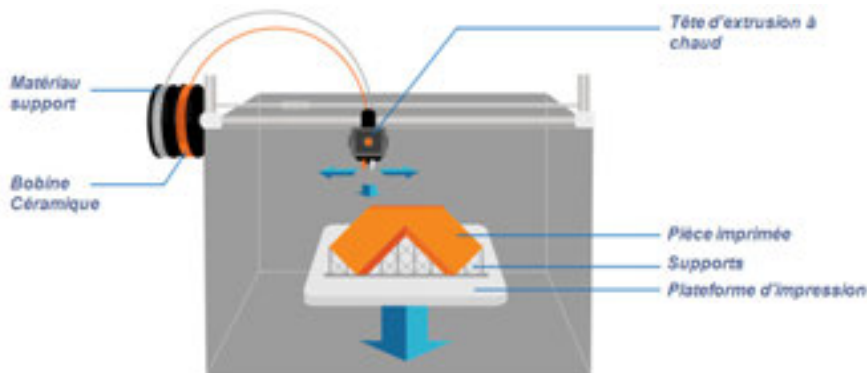
Comme toutes les autres techniques d'impression 3D, cette nouvelle technologie devra passer par des phases de redesign et de validation avant d'être utilisée sur des applications réelles.

Plusieurs secteurs se sont montrés intéressés – aéronautique, spatial, médical, télécommunications – mais les horizons de mise sur le marché restent assez lointains. Aussi, à court terme, Nanoe vise principalement des applications de prototypage et d'outillage rapide. En effet, l'impression 3D de pièces d'usure ou de résistance aux températures semble particulièrement intéressante, typique-



Exemples de pièces imprimées pour les démonstrations aux clients.

ment pour des buses, des brûleurs, des supports de résistance, des matrices d'extrusion ou de pressage, des outils de coupe...



La fabrication des noyaux céramique pour la fonderie à cire perdue offre également à Nanoe des débouchés intéressants. Il en va de même pour la production de pièces allégées aux structures internes optimisées. Ainsi Nanoe a déjà imprimé quelques démonstrateurs avec des structures internes en nid d'abeilles (ou autre remplissage type gyroïde, tétraèdre...) qui permettent de produire des pièces très rigides et à densité très faible, avec des applications dans l'aéronautique, le spatial et la défense.

Impression à la demande

Afin d'aider ses clients à adopter cette technologie, Nanoe a également lancé

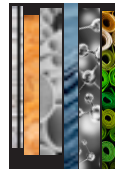
un service d'impression 3D sur mesure, permettant de mener à bien des preuves de concept. Prérequis pour certains de ses clients, ce service permet de valider la compatibilité du procédé avec leurs objectifs en termes de qualité matière, précision dimensionnelle et reproductibilité. Nanoe peut gérer l'ensemble du procédé, en partant d'un fichier 3D jusqu'à la pièce imprimée, déliantée et frittée. Une fois les pièces validées, l'entreprise transfère au client l'ensemble du savoir-faire lié à leur impression.

Forte de ce savoir-faire et sûre du potentiel de cette technologie, Nanoe souhaite la développer en nouant des partenariats avec des fabricants de machines, des utilisateurs finaux, des clients potentiels et ainsi élargir son champ d'application. ■



L'ALLÈGEMENT DE PIÈCES, UNE APPLICATION PROMETTEUSE

L'une des applications les plus prometteuses de l'impression 3D en général reste l'économie de matière et donc l'allègement de pièces pour des domaines comme le spatial, l'aéronautique et le transport en général. En s'affranchissant des règles habituelles de design, et notamment de l'obligation de créer des pièces pouvant ensuite être produites par fonderie ou usinage, les ingénieurs peuvent générer des gains de masse importants en n'utilisant que la matière où elle est utile. Cela a notamment permis le développement de logiciels d'optimisation topologique qui, à partir des contraintes appliquées à la pièce (forces, enveloppe extérieure à respecter, points d'accroche), vont calculer la pièce optimale (schéma). En impression FDM, on utilise aussi plus simplement la possibilité d'imprimer des pièces creuses ou partiellement remplies afin de fabriquer séparément l'enveloppe et le contenu. On peut alors jouer sur le type de remplissage en fonction de l'application : linéaire, en nid d'abeilles, en tétraèdre... On recourt également beaucoup aux remplissages en forme de gyroïdes : un type de motif assez complexe, présentant une forme organique et très utilisée en impression 3D pour effectuer un remplissage des pièces avec de bonnes propriétés mécaniques. C'est aussi une forme assez optimale pour le design d'échangeurs thermiques passifs.



LES MATÉRIAUX COMPOSITES À FIBRES DISCONTINUES ET LEURS AVANTAGES



Joël Henry (ECLy14) a effectué sa dernière année d'étude en échange à l'Imperial College de Londres. Il a par la suite passé un doctorat dans le département d'ingénierie mécanique, où il a développé de nouveaux matériaux composites bio-inspirés, ainsi que des modèles analytiques pour prédire leurs performances. Il a récemment rejoint une startup (Monolith AI) basée à Londres, spécialisée dans l'utilisation de l'intelligence artificielle pour améliorer la conception technique pour diverses applications.

inconvenient aboutit à un surdimensionnement des pièces en composite et limite les applications dans des secteurs nécessitant une forte ténacité, comme par exemple le bord d'attaque des ailes du Boeing 787, qui est encore fait en aluminium.

Vers de nouveaux matériaux composites

• Composites à fibres discontinues

Les matériaux composites à fibres courtes (inspirés de la nature) répondent à ce manque de ténacité en permettant une déformation plus ductile avec plus de cisaillement dans la matrice. En effet, l'introduction de discontinuités dans le matériau permet d'initier l'endommagement de la matrice sur l'ensemble du matériau et non plus à l'endroit le plus faible uniquement. Dans la nacre par exemple, l'ajout de 5 % de matière organique dans 95 % de plaquettes minérales rigides permet de multiplier par 3 000 la ténacité du matériau, tout en conservant une rigidité et une résistance raisonnable¹.

Les discontinuités créées par les fibres discontinues accroissent les différents modes de défaillance possibles – illustrés par la figure 2 – soit par rupture cohésive : le chargement en tension des fibres génère de forts cisaillements dans les régions entre les fibres, ce qui génère une fracture à l'intérieur de la matrice (figure 2.1), soit par rupture adhésive : il peut arriver que l'interface fibre/matrice se rompe lorsque l'adhésion entre la matrice et les fibres est plus faible que la cohésion de la matrice (figure 2.2), soit par arrachement : les discontinuités permettent également aux fibres de sortir de la matrice qui les entoure. La friction générée lors de ce processus est un autre moyen de dissiper de l'énergie de façon continue avant la rupture finale (figure 2.3).

Les discontinuités permettent de dissiper plus d'énergie lors de la rupture, ce qui la rend plus prévisible et moins catastrophique. De plus, le décalage en

LES MATÉRIAUX COMPOSITES sont constitués de plusieurs matériaux non-miscibles aux propriétés complémentaires. Cette combinaison permet en général de produire des matériaux qui disposent de propriétés qu'aucun des composants initiaux ne possède. Un matériau composite est en générale composé d'inclusions rigide (fibres...) enveloppées dans une matrice plus ductile (résine, polymère).

Le concept existe depuis longtemps avec, par exemple, les cabanes en paille et terre séchée, mais même bien avant elles, avec des matériaux naturels tels que le bois, les toiles d'araignée ou encore les os. Plus récemment, dans la deuxième moitié du xx^e siècle, les polymères renforcés de fibres de carbone (PFRC) ont émergé comme des nouveaux concurrents des matériaux traditionnels (acier, aluminium...) dans de nombreux secteurs, comme l'automobile ou l'aéronautique. L'utilisation des PFRC, encore pratiquement inexistante il y a un demi-siècle, a rapidement augmenté et contribue maintenant à plus de la moitié de la masse des derniers avions civils, comme par exemple l'Airbus A350.

La réussite des matériaux composites est principalement due à leurs propriétés mécaniques hors du commun, incluant une résistance ainsi qu'une rigidité très élevées (les fibres de carbone peuvent avoir un module d'Young jusqu'à quatre fois celui d'un acier conventionnel et environ dix fois celui de l'aluminium). De plus, la densité des fibres ainsi que celle de la matrice sont très faibles : les matériaux composites sont environ deux fois plus légers que l'aluminium et cinq fois plus légers que l'acier. Cette combinaison de hautes propriétés

mécaniques et de faible densité rend les matériaux composites très populaires et explique leur succès pour les applications à toutes sortes de structures.

Limitation des composites conventionnels

Cependant, l'un des désavantages principaux des matériaux composites est leur fragilité et leur faible ténacité, dues au fait que l'endommagement d'un composite a tendance à être localisé à un seul endroit dans le matériau, ce qui déclenche une fracture fragile et catastrophique du matériau. Cet

UTILISATION DES COMPOSITES

Le transport aérien et l'aérospatial font partie des principaux secteurs utilisant les avantages des matériaux composites car ceux-ci participent à l'optimisation de la réduction de la masse de la structure (avion, fusée...).

Dans l'automobile, les voitures de course et les voitures réalisées en peu d'exemplaires utilisent également abondamment les composites, afin de maximiser les performances des voitures. Dans les voitures de série, leur utilisation est moins fréquente, mais est en pleine croissance, grâce à la réduction des coûts de production.

Les composites sont également utilisés dans le domaine de l'énergie (éolienne) et des sports et loisirs (ski, vélo, raquettes...) où leur légèreté permet l'obtention de meilleures performances et un meilleur confort.

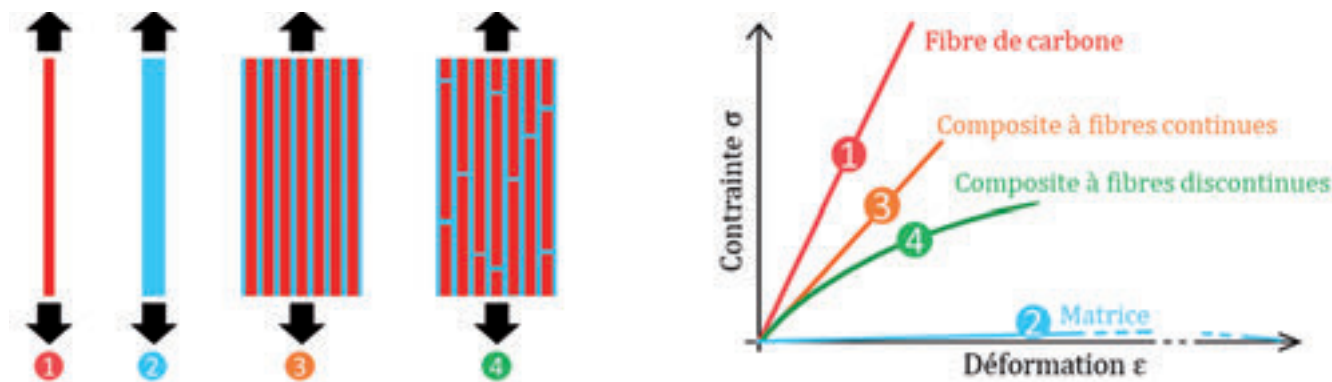


Figure 1 : réponse mécanique en tension des différentes parties d'un composite et de différents composites.

cisaillement généré dans la matrice permet au matériau de se déformer davantage, ce qui le rend moins fragile. Grâce aux discontinuités, les possibilités de design, déjà vastes pour les composites conventionnels, deviennent pratiquement

propriétés mécaniques plus élevées que la simple combinaison des deux fibres, et ces effets sont renforcés avec l'utilisation des fibres courtes³. De plus, l'introduction de fibres moins chères peut permettre de réduire le coût du matériau.

• Composites forgés (TBDC : Tow Based Discontinuous Composites)

Les matériaux composites forgés constituent une classe grandissante de matériaux à haute performance dont la méthode de fabrication, utilisant un moule similaire à l'emboutissage et à très hautes pression et température, permet de créer des géométries inexplorées jusqu'à présent avec les méthodes de production conventionnelles comme par exemple des bras de suspension⁵. De plus, le temps de production est réduit de plusieurs heures à environ trois minutes seulement, grave à un cycle à haute pression et haute température. Enfin, la forte fraction volumique des fibres ainsi que la nature aléatoire de la microstructure permettent au matériau de présenter de très bonnes propriétés mécaniques. Par exemple, l'aspect aléatoire du matériau empêche l'apparition de « routes » pour la propagation de fissures, ce qui rend le matériau plus tenace que des matériaux plus structurés, comme les composites tissés par exemple, où une fissure peut plus facilement se propager dans les directions du tissage. Cela permet l'utilisation du composite dans des parties qui jusqu'alors étaient fabriquées en métal comme les châssis.

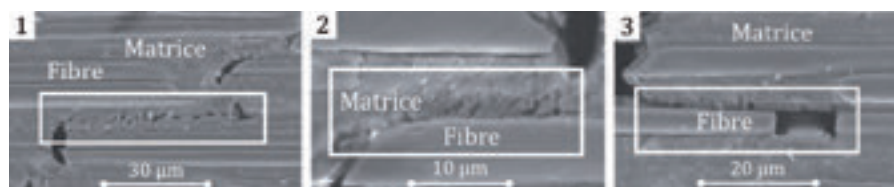


Figure 2 : différents modes de défaillance possibles observés avant la rupture finale d'un composite. 1 : fracture de la matrice, 2 : Décollage de l'interface fibre-matrice, 3 : fracture / arrachement des fibres².

illimitées. La présence de fibres courtes permet également une meilleure facilité d'utilisation, car cela permet aux fibres de circuler plus librement durant la cuisson du composite. Enfin, les matériaux composites recyclés ont par nature des fibres discontinues.

• Composites hiérarchiques

Un composite hiérarchique est un matériau dans lequel les inclusions sont elles-mêmes un matériau composite constitué d'inclusions de taille plus petite (voir figure 3). La nature est pleine de composites présentant différents niveaux



Figure 3. À gauche : représentation d'un composite discontinu hiérarchique avec trois niveaux hiérarchiques. Au milieu : composite hiérarchique à deux niveaux. L'énergie est dissipée de façon stable dans toute la structure (fissures au premier niveau hiérarchique), avant la rupture du composite. À droite : zoom sur une des fissures dans la matrice (au deuxième niveau hiérarchique)⁴.

Il existe plusieurs types de matériaux composites discontinus : hybrides, hiérarchiques, composites forgés..., rapidement décrits ci-dessous.

• Composites hybrides

L'hybridation consiste à combiner différents types de fibres dans un matériau (par exemple : fibres de carbone et fibres de verre, ou deux types de fibres de carbone différentes). Des effets de synergie, appelés effet hybrides, permettent d'obtenir des

hiérarchiques. Par exemple, on en compte environ trois ou quatre dans la nacre, et sept dans les os. Ces niveaux hiérarchiques sont partiellement responsables de la forte ténacité de ces matériaux, ce qui a poussé les chercheurs à essayer d'appliquer ce concept aux composites synthétiques. La présence de niveaux hiérarchiques a permis de créer des composites où l'endommagement n'est plus localisé à un seul endroit, mais dans toute la structure comme le montre la figure 3.

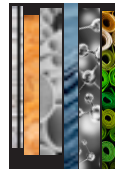
1 - F. Barthelat and D. Zhu, « A novel biomimetic material duplicating the structure and mechanics of natural nacre », Journal of Materials Research, vol. 26, no. 10, pp. 1203-1215, 2011.

2 - J. Henry, S. Pimenta, « Increasing damage tolerance in composites using hierarchical brick-and-mortar microstructures », Journal of the Mechanics and Physics of Solids, vol. 118, pp. 322-340, 2018.

3 - J. Henry, S. Pimenta, « Modelling hybrid effects on the stiffness of aligned discontinuous composites with hybrid fibre-types », Composites Science and Technology, vol. 152, pp. 275-289, 2017.

4 - J. Henry, Designing and modelling bio-inspired discontinuous composites, PhD thesis, Imperial College London, 2018.

5 - P. Feraboli, F. Gasco, and B. Wade. Lamborghini « forged composite » technology for the suspension arms of the sexto elemento. In Proc. 26th ATC of the ASC, Montreal, Quebec, Canada, 26 - 28 September 2011.



EN ROUTE VERS LE NANO

Les nanomatériaux : quelles applications et pour quand ?



Alice Pazat (ECM13 et double diplôme KTH (Stockholm) dans le domaine des polymères), a réalisé une thèse en contrat industriel CIFRE avec le laboratoire de recherches et de contrôle du caoutchouc et des plastiques (LRCCP) sur la préparation de nanocomposites performants élastomère-graphène modifiés chimiquement. Elle a ensuite apporté son expertise en matière de R&D aux clients d'Innovatech Conseil pour les accompagner dans la rédaction de leurs dossiers scientifiques pour le crédit impôt recherche. Désormais, elle met à profit son savoir-faire dans le domaine des oléfines et polymères au sein d'INEOS en tant qu'ingénieur optimisation.

CONNUS DES LABORATOIRES de recherche depuis de très longues années, les nanomatériaux sont des matériaux dont une des dimensions au moins est de taille nanométrique (1-100 nm). Leur intérêt réside principalement dans leur petite taille et dans les propriétés potentielles que des arrangements d'atomes organisés en structures aussi fines peuvent présenter. Parmi ces nanomatériaux à fort potentiel, on peut citer notamment les nanotubes de carbone, le graphène ou encore les nanoargiles.

Cependant ces nanomatériaux sont encore mal connus des industriels, pour lesquels le niveau de maturité des recherches est encore trop faible pour envisager une utilisation à grande échelle. Les coûts de production sont trop élevés, leur manipulation est délicate et leur impact sur la santé et l'environnement encore très peu étudié.

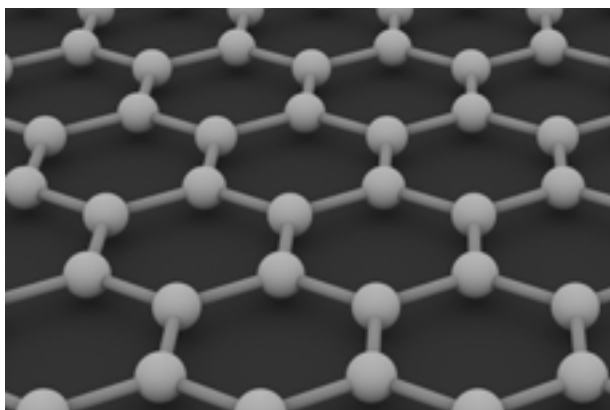
La plupart de ces matériaux représentent néanmoins une grande opportunité pour de nombreux domaines, notamment pour la nanoélectronique. Ainsi, les nanotubes de carbone possèdent par exemple une conductivité électrique très élevée (capacité de transport d'électrons 1 000 fois supérieure à celle du cuivre) avec une très faible dimension qui peut permettre des applications nouvelles, en ligne avec la miniaturisation toujours plus importante des systèmes électroniques.

L'industrie exprime également un fort intérêt pour une utilisation plus large de ces nanomatériaux en tant « qu'additifs » (appelés « charges ») pour les matériaux

conventionnels tels que les polymères (polypropylène, polyuréthane, résines epoxy, etc.) afin d'en améliorer les propriétés.

Parmi les nanomatériaux prometteurs pour ces différentes applications, le graphène (graphite qui serait séparé en couches élémentaires appelées « feuillets », chaque « feuillet » correspondant à du graphène) possède un potentiel intéressant en tant que nanocharge multifonctionnelle, qui pourrait à terme venir suppléer, voire remplacer des charges

des matériaux dans lesquels cette charge est dispersée. Cela permet par exemple de rendre un élastomère conducteur par l'ajout d'un petit pourcentage d'un nanomatériau. On peut également imaginer des films plastiques très fins moins perméables à l'air, des pièces polymères légères pouvant offrir des applications structurales (particulièrement intéressantes dans le domaine de l'aéronautique), des pneumatiques permettant une plus grande dissipation thermique, etc.



Structure d'un feuillet de graphène.

traditionnelles telles que le noir de carbone, très largement utilisé dans les élastomères pour pneumatiques par exemple, en permettant d'obtenir des propriétés largement supérieures, à des taux de charge très faibles (moins de 1 % au lieu de 30 % ou plus). Ainsi, il a été montré dans de nombreuses publications que le graphène permettait d'améliorer les propriétés mécaniques (ex : plus grande résistance à la traction), de conductivité thermique, de conductivité électrique et de diminuer fortement la perméabilité

Le verrou technologique principal à l'essor de ces technologies réside dans la capacité à disperser efficacement ces nanocharges dans des matériaux. En effet, les feuillets de graphène ont une très forte tendance à s'agglomérer pour former des structures proches de celle du graphite, aux propriétés nettement moins impressionnantes que le graphène. Le défi pour les chercheurs et les industriels réside donc essentiellement dans le développement de techniques de dispersion appropriées pour atteindre les propriétés tant espérées.

Un avenir très lointain ?

Bien que la perspective de produire des nanocharges en grande quantité et à de faibles coûts semble aujourd'hui lointaine, il existe déjà de nombreux développements visant à proposer des structures intermédiaires entre les nanocharges et les charges traditionnelles. Par exemple, les « nanoplaquettes de graphite » (« faible »



empilement de feuillets de graphène) tentent de se généraliser, et sont abusivement qualifiées de graphène par les industriels bien que leurs propriétés en soient largement inférieures, et elles se retrouvent déjà dans certains produits tels que les raquettes de tennis.

Néanmoins, l'utilisation de charges réellement nanométriques semble aujourd'hui plutôt réservée à la nanoélectronique « high tech » mais pourrait se généraliser à l'avenir selon l'avancée des études académiques dans ce domaine.

Quelle transition entre la recherche et l'industrie ?

Bien que le monde du nano soit initialement plutôt réservé au monde aca-

démique, les opportunités importantes que représente le développement des nanomatériaux ont rapidement poussé les industriels à se lancer eux aussi dans des grands projets. De plus, étant à la frontière entre de nombreux domaines, les nanomatériaux ont donné lieu à la mise en place de larges programmes de financement, le plus emblématique et ambitieux étant le Flagship Graphène de l'Union Européenne, lancé en 2013 et doté d'un milliard d'euros. L'objectif principal est d'encourager la recherche académique et les transferts de technologie vers l'industrie des travaux sur le graphène, nanomatériau isolé pour la première fois en 2004 et jugé très prometteur pour de nombreux domaines. Des programmes nationaux spécifiques aux nanomatériaux existent également tels que le plan Nano 2022

visant à soutenir la recherche dans le domaine de la nanoélectronique.

Ces financements viennent s'ajouter aux dispositifs existants tels que les projets ANR (agence nationale de la recherche), FUI (fonds unique interministériel) ou encore le CIR (crédit impôt recherche). Ce dernier vise à soutenir l'effort de R&D des entreprises en France, en proposant un crédit d'impôt couvrant jusqu'à 30 % des dépenses de R&D éligibles quel que soit le domaine. Le CIR permet ainsi aux entreprises de se rapprocher des laboratoires académiques et d'accélérer leurs projets de R&D orientés vers l'industrie, notamment dans le domaine des nanomatériaux. ■

(Plus d'informations : <https://www.innovatech-conseil.fr/credit-impot-recherche/>)

CONSTRUCTION ET CLIMAT

Un nouveau matériau pour éviter d'aller droit dans le mur.



Ingénieur aérospatial (Centrale Lyon, Cornell), Stephan Savaraese a commencé à travailler aux États-Unis sur la modélisation numérique de la dynamique des fluides et le calcul haute performance. Après une première carrière d'ingénieur en aérospatial, conseiller scientifique et leader technique en simulation multiphysique, il est devenu expert en solutions d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques (enseignement et recherche) et entrepreneur de la transition environnementale. Il a ainsi fondé trois entreprises et deux associations. Il est co-fondateur de SOP (Saving Our Planet), CCL France et TechnoCarbon et France Country Manager chez Climate Scorecard.

LA PRODUCTION DE BÉTON, d'acier et d'aluminium nécessite aujourd'hui une consommation d'énergie et de charbon importante, rendant le secteur de la construction responsable de 20 % des émissions mondiales de CO₂. D'autres éléments négatifs s'ajoutent à cet impact néfaste pour le climat : ainsi, il s'agit d'un problème écologique global auquel entendent répondre les responsables évoluant dans l'industrie et, en particulier, le BTP. Dans ces secteurs, de plus en plus d'acteurs publics et privés recherchent des substituts à faible empreinte carbone pour le béton, l'acier et l'aluminium en raison

d'un engagement pour le développement durable et/ou d'un objectif de compétitivité face au coût croissant des matériaux, surtout ceux à forte empreinte carbone, soumis à différentes formes de taxe écologiques.

L'objectif climatique de neutralité carbone en 2050 requiert également la carbo-négativité c'est-à-dire capturer du CO₂ pour le stocker de manière durable et stable. En particulier, les produits courants devront être fabriqués grâce à des processus qui extraient le CO₂ de l'atmosphère : les technologies à émissions négatives (TEN).

Autant d'enjeux auxquels TechnoCarbon tend à répondre avec le développement de nouveaux matériaux comme le CarbonFiberStone™ (CFS™). Conçu à partir de fibre de carbone et de pierre, selon la configuration choisie, il s'avère suffisamment solide, flexible, léger et durable pour remplacer béton, acier et aluminium. Il est 5 fois plus durable et résilient que le béton, 4 fois plus résistant aux efforts que l'aluminium ou le béton, 3 fois plus léger que l'acier, 2 fois moins énergivore que les matériaux traditionnels, ne nécessite qu'une seule étape d'installation (structure et



Indestructible en fatigue : aucune fissure à 10 millions de cycles / rupture de la pièce en béton à 3 millions de cycles.

finition incluses) et est garanti 0 corrosion, 0 consommation d'eau et de sable, 0 émission de CO₂ et gaz toxique.

Ce nouveau matériau, deux fois moins consommateur d'énergie, permet d'atteindre, au-delà de la neutralité carbone, la carbo-négativité. CFS® économise ainsi des ressources, évite des émissions de GES et stocke du CO₂ lorsqu'on le produit, par rapport aux matériaux classiques (bois, ciment, métaux). Cette innovation est amenée à bousculer les habitudes en matière de construction et d'architecture pour passer aux bâtiments, aux transports, à l'énergie et à l'économie circulaires, durables et carbo-négatifs.

Composition du CarbonFiberStone

CFS ne repose pas sur un ensemble de tissus imprégnés d'une matrice, mais est un sandwich composite dont les couches polymérisées ne représentent qu'une faible partie de la masse totale. La résine y joue plutôt le rôle de colle que de matrice. En effet, les tissus imprégnés sont inévitables. On distingue les sandwichs composites multicouches des pièces constituées d'un seul bloc de matériau composite fibre-matrice. Ils passent tous par une phase de polymérisation de la résine, qui peut être réalisée à température ambiante par réaction chimique avec un catalyseur lorsque la catalyse est exothermique, ou bien en activant la réaction grâce à cycle thermique lorsqu'une partie du processus de réaction le nécessite. Des matériaux sans résine sont insérés pour

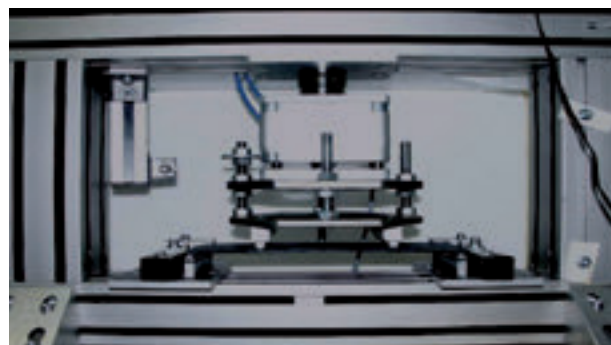
renforcer la structure (inserts métalliques, nid d'abeille) ou inclure certaines fonctions (fixations, armatures, capteurs, fils conducteurs, etc.). CFS fait partie de cette famille de sandwichs multicouches, mais la quantité de résine est réduite, donc elle ne joue pas un rôle important en fonctionnement normal.

Les différentes couches de ce sandwich sont de la pierre naturelle et de la fibre de carbone. C'est le contact direct entre ces deux matériaux qui lui confère ses propriétés uniques. La résine représente moins de 1 % de la masse dans sa version la plus mince (3 mm d'épaisseur) et même moins de 0,1 % de la masse dans les versions plus épaisses. Les propriétés du contact carbone/pierre sont mal connues et feront l'objet d'un programme de recherche. Comme de nombreux

matériaux, CFS n'a pas été découvert par hasard, mais ce qui est surprenant et était difficile, mais pas impossible, à prévoir, c'est que cette interaction soit aussi forte. Ce qui rend CFS unique est la force de l'interaction carbone/minéral et la conservation de la structure naturelle de la pierre. Cette dernière représente un gain énergétique important, puisque nous bénéficions du forgeage naturel des minéraux à grande profondeur, hautes pressions et températures. Du même coup, le procédé de fabrication nécessite des températures et des pressions bien plus basses, moins de 200 °C et 10 bars en autoclave, que celle des matériaux que CFS remplace.

Bilan énergétique et carbone

L'énergie nécessaire à la fabrication est l'électricité. Découpe, cycles thermiques, finition : tout est électrique. Les procédés les plus énergivores (fusion, extrusion, laminage, injection sous pression) sont soigneusement évités. L'utilisation de produits chimiques (solvants, résines) est limitée au strict minimum. La fibre de carbone est encore trop carbonée : de nouveaux



Tests de fatigue sur une plaque mince en CFS : 1 million de cycles à 1 kN.

À PROPOS DE

TechnoCarbon (TechnoCarbon Technologies France SAS - [TechnoCarbon.fr](https://www.technocarbon.fr))

est une société créée en 2018 pour industrialiser et poursuivre le projet d'innovation issu de la rencontre entre les inventeurs de CarbonFiberStone Kolja Kuse et Stephan Savaraese à Bonn en 2017 lors de la COP23. En juin 2019, TechnoCarbon a été lauréat de la promotion Paris&Co Ville Durable 2019 dans les catégories économie circulaire et ville de demain. Cette première reconnaissance du potentiel de TechnoCarbon pour inverser la pollution issue des BTP sera suivie d'accords avec des organisations industrielles, financières et scientifiques pour en accélérer le développement, l'homologation et la commercialisation. TechnoCarbon a été sélectionnée au plan mondial par Cleantech Group parmi les 50 start-up à suivre (50 to Watch) et est finaliste du concours CleanTech Open France 2019.

TECHNO CARBON
TECHNOLOGIES



procédés ont été étudiés et sont expérimentés en ce moment pour la rendre carbo-négative. Lorsque l'électricité consommée est décarbonée, le bilan carbone de CFS devient très bas carbone. C'est pourquoi nos usines ne

seront installées que là où l'électricité décarbonée est abondante et bon marché (soit fournie par le réseau, soit en installations autonomes ou productrices d'énergie dans des régions arides). Les bilans énergétiques, car-

bone, GES, et les normes RSE font partie des objectifs de TechnoCarbon et des estimations ont déjà été réalisées. Elles seront révisées et auditées régulièrement dès l'entrée en production de la première usine. ■

L'ACIER, UN MATÉRIAU TOUJOURS D'AVENIR



Fanny Langevin (ECLi89) a fait l'ensemble de sa carrière chez ArcelorMittal. Après une quinzaine d'année en usine à différents postes de production à Montataire dans l'Oise, elle intègre les équipes européennes de R&D dédiées aux composites puis aux aciers prélaqués. En 2010, elle rejoint l'équipe commerciale de l'agence française pour conseiller les clients sous l'angle technique.

même des peintures entièrement élaborées à base de plantes. D'autres produits à surface fonctionnalisée les rendent anti-taches, prêts à recevoir des traitements complémentaires comme l'émaillage...

Un matériau incontournable

Le secteur automobile continue l'allègement de ses véhicules pour atteindre les engagements de réduction des émissions de CO₂. L'acier y participe par de nouvelles nuances mais aussi par des processus en évolution tels que l'emboutissage à chaud et les flancs raboutés. Ces flancs à épaisseurs et nuances variables seront ensuite emboutis, mettant la « bonne » matière seulement là où c'est nécessaire.

Dans l'emballage, les canettes, boîtes de conserve et autres contenants métalliques sont aussi des condensés de nouveautés. Les aciers à haute résistance et très faible épaisseur (0,13 à 0,10 mm) renforcent les fonds à ouverture rapide. Les revêtements se sont bien sûr adaptés aux réglementations en s'affranchissant du chrome VI et du bisphénol A.

Enfin les énergies renouvelables ne sont pas en reste, des panneaux solaires directement intégrés à la toiture jusqu'aux éoliennes. Ces dernières consomment quelques milliers de tonnes d'acier par unité au niveau des fondations (dans une alternative possible au béton), mais aussi pour la pièce de transition, la tour tubulaire ou la nacelle. L'acier d'hier n'est pas celui de demain mais il est toujours au service de tous. Il est produit en France à hauteur de 1,3 million de tonnes par an, soit 40 kg/s. ■

UN DES MATÉRIAUX ANCIENS les plus indémodables reste et restera sans doute l'acier, éternellement recyclable, léger, résistant et durable. L'acier traverse le temps en regardant vers l'avenir. Nombreux sont les exemples qui montrent comment l'acier continue à se transformer pour participer à notre quotidien. Dans la construction, les poutrelles Jumbo, dont la section peut aller jusqu'à 140 mm d'épaisseur, sont des prouesses technologiques qui poussent les architectes à rêver d'immeubles de plus en plus près des nuages : du Shanghai World Financial Center (492 m) au Burj

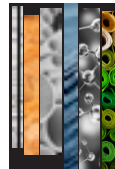
Khalifa à Dubaï (828 m) en passant par le One World Trade Center de New York (526 m). Les compositions et formes de ces poutres permettent des réductions de poids des structures de l'ordre de 24 %.

Les revêtements métalliques à base de zinc et de magnésium augmentent les performances anticorrosion des éléments internes aux bâtiments (gainés d'aération, faux-plafonds, supports de cloison) tout en réduisant l'épaisseur du revêtement.

Bien sûr l'enveloppe de nos bâtiments n'est pas en reste avec des aciers revêtus pour la toiture ou les façades, permettant des couleurs chatoyantes, versatiles ou



Production de tôle en acier prélaqué.



LES MATÉRIAUX À CHANGEMENT DE PHASE POUR ISOLER LES BÂTIMENTS



Yann Randrianarison (ECM18 et double diplômé de la Technical University of Denmark), est spécialisé dans le domaine des énergies renouvelables et économies d'énergie. Il a été vice-président de KSI Junior-Entreprise 2015.

aptitude à stocker beaucoup d'énergie dans un faible volume. Elle permet d'augmenter l'inertie des bâtiments, c'est-à-dire les possibilités de réponses aux sollicitations thermiques intérieures ou extérieures (lissage des pics de température).

Ces matériaux restent aujourd'hui moins diffusés que les solutions d'isolation thermiques plus classiques, comme la laine de verre ou laine de roche. C'est notamment dû à des limites liées à leurs propriétés intrinsèques, comme leur durée de vie et le phénomène de surfusion (le matériau peut rester liquide au-delà de son point de solidification).

Des aspects auxquels de nouveaux matériaux apportent notamment des solutions. Le point avec Yann Randrianarison, double diplômé de la Technical University of Denmark.

AUJOURD'HUI, l'isolation thermique des bâtiments apparaît comme une solution naturelle et intuitive pour garantir le confort des occupants et réduire les factures de chauffage. Le secteur du bâtiment en Europe représente, devant le secteur des transports et de l'industrie, environ 40 % de la consommation d'énergie finale, dont près de la moitié pour le chauffage et la climatisation¹ des maisons individuelles. Il s'agit donc d'un gisement potentiel d'économies d'énergie remarquable, qui se retrouve devant un défi autant qu'une opportunité.

opère un changement de phase en absorbant la chaleur de son environnement, qu'il refroidit en conséquence. Inversement, lorsque le MCP se condense ou se solidifie,



L'isolation thermique de l'habitat au cœur des problématiques d'économies d'énergie.

Les matériaux à changement de phase

Parmi les solutions permettant d'optimiser l'isolation thermique des bâtiments, on trouve les matériaux à changement de phase (MCP ou phase change materials). Ceux-ci fonctionnent sur un principe d'absorption, stockage et relargage de chaleur par changement d'état.

L'idée consiste à exploiter les propriétés physico-chimiques de composés organiques et inorganiques (dits « eutectiques ») afin de réguler les flux de chaleur. Lorsque le MCP passe à l'état gazeux, il

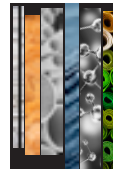
il restitue de la chaleur et réchauffe son environnement.

Ces matériaux présentent de multiples intérêts pour des applications dans le bâtiment car ils rendent possibles le stockage de chaleur et donc la décorrélation temporelle entre besoins de consommation et de production, été comme hiver. On trouve aujourd'hui sur le marché différents produits à base de MCP : cire de paraffine encapsulée dans des polymères au sein de murs ou intégrée dans des plaques de plâtre, enduits pour une utilisation en surface, matériaux de type béton cellulaire, ou encore des panneaux-sandwichs pour les façades. Autre avantage des MCP : leur grande compacité, c'est-à-dire leur

D'autres enjeux dans le bâtiment

De nombreux enjeux transverses gravitent autour de l'usage de nouveaux matériaux dans le bâtiment, notamment liés à la consommation et aux usages. Les solutions devront obligatoirement reposer sur une compréhension clairement identifiée de nos usages réels. Leur emploi devra également s'inscrire dans le cadre réglementaire et normatif : l'arrivée de la RT 2020, qui vise à imposer la construction de bâtiments à énergie positive invite par exemple à se questionner sur le développement de nouveaux matériaux qui pourront effectivement répondre à ces nouvelles attentes. ■

¹ - Tian Z. et al., *Towards adoption of building energy simulation and optimization for passive building design: A survey and a review. Energy and Buildings*, 2018. 158: p. 1306-1316.



Entretien avec

DANIÈLE QUANTIN, PRÉSIDENTE DE MATERIALIA



Danièle Quantin (ECP76) a effectué toute sa carrière dans la sidérurgie, les procédés, produits et solutions clients. Elle a été responsable France et Espagne des centres de recherche d'ArcelorMittal, ainsi que DRH de la R&D du groupe. Elle est présidente depuis fin 2017 du pôle de compétitivité Materialia, basé pour des raisons historiques dans la région Grand Est. Elle est également présidente de la SF2M (Société française de métallurgie et de matériaux).

Pouvez-vous nous présenter Materialia ?

Comme tout pôle de compétitivité, Materialia a pour mission d'aider les entreprises à industrialiser leurs innovations en facilitant les contacts avec les centres de recherches industriels et académiques, les PME, les centres techniques, voire même les organismes de formation. Au sein de cet écosystème, il a donc un rôle à la fois d'animateur et de facilitateur. Nous identifions les bons projets, aidons au montage de leur financement, puis en suivons l'exécution avant d'en faire le bilan : valeur ajoutée, retour sur investissement... Nous jouons également un rôle d'agitateur : pour stimuler l'innovation, la recherche et le développement collaboratif entre les entreprises, Materialia organise des animations (séminaires, conférences, ateliers) sur des thématiques techniques (multimatériaux, écoconception, fabrication additive...) ou plus transversales (financement des projets européens, créativité...).

Quels sont vos domaines stratégiques et vos marchés cibles ?

Materialia travaille dans trois domaines d'activité stratégique – les matériaux, les procédés et les solutions – et sur les thématiques transverses de la transformation numérique et de la transition écologique. Le pôle se concentre sur les marchés du transport, de l'énergie, de l'industrie et de la santé, secteur dans lequel la région Grand Est est en pointe avec BioValley France, pôle de compétitivité santé avec lequel nous menons des projets. Nos travaux portent sur les technologies estimées comme les plus prometteuses : métallurgie, fabrication

additive, nouveaux procédés de fabrication propres et durables, recyclage des matériaux, développement durable, composites, industrie du futur, robotique... Le pôle délivre un label aux projets de R&D collaboratifs industrie-recherche faisant intervenir au moins un acteur du périmètre du pôle sur les thématiques des matériaux et procédés. Cela permet aux projets d'accéder à des financements spécifiques tout en leur apportant un gage de qualité.

Quelles sont les demandes des industriels en matière de nouveaux matériaux ?

Avant toute chose, quand on parle d'un nouveau matériau, il faut savoir à quel stade il en est : la recherche ou l'application. Il se passe beaucoup de temps avant qu'un matériau devienne utilisable et rentable. Récemment, nous avons travaillé sur la labellisation d'un système utilisant du graphène, un matériau dont on parle depuis quarante ans. S'agissant des demandes des industriels, elles ne concernent pas les matériaux à proprement parler mais les solutions impliquant l'utilisation de nouveaux matériaux. Par exemple, comment intégrer des microcapteurs dans des matériaux pour en suivre l'endommagement ou la durée de vie ?

Actuellement le principal défi des industriels est de savoir comment optimiser les solutions au travers d'un choix de matériaux variés. C'est le cas des constructeurs automobiles ou du bâtiment. Se posent alors les questions du recyclable mais aussi du récupérable. Ce qui n'est pas la même chose. Une solution technique est composée d'un ensemble de matériaux qui, en fin de vie, doivent

être identifiables, facilement séparables et triables pour être ensuite réutilisés et recyclés.

Nous recevons de nombreuses demandes très variées concernant la tribologie, les traitements des surfaces, par exemple pour conférer des propriétés antibactériennes, intégrer des capteurs filmogènes. Materialia travaille beaucoup sur les questions de fabrication additive : réalisation de mélanges multimatériaux (insertion par exemple de poudre céramique au milieu de poudre de plastique), leur association dans le corps d'une pièce, par couches ou en accrochant des pièces de matériaux différents. Dans ce domaine, Materialia a mis en place de nombreux projets transversaux. Le dernier en date, un projet européen « IAMRRI » démarré début 2019, implique quatorze pays. Il ne s'agit pas tant d'imaginer de nouvelles techniques de fabrication additive que de réfléchir à la façon dont cela va révolutionner la supply chain et impacter l'environnement.

Quels sont les défis à venir de la filière ?

Le premier défi concerne les coûts d'investissement, de fabrication et de mise en œuvre. Le deuxième porte sur la performance et la durabilité du matériau dans la solution finale. On parle de plus en plus de matériaux intelligents, capables de détecter des anomalies, de

LES CHIFFRES-CLÉS DE MATERIALIA

2005 : année de création ;
310 membres ;

3 collèges : les industriels (entreprises et fédérations d'entreprises), les centres scientifiques (laboratoires, centres techniques, universités et grandes écoles), les collectivités territoriales (communes, agglomération, métropoles) ;

4 domaines d'activité stratégiques : matériaux, procédés, solutions, thématiques transverses (transitions numérique et écologique) ;

515 projets labellisés ;
200 projets financés.



collecter des données permettant d'anticiper la rupture, voire de modifier leurs propriétés physiques (forme, connectivité, couleur, etc.) en réponse à des stimuli. Le dernier point concerne les questions de recyclage et de récupération, un point essentiel compte tenu du coût et de la rareté des matières premières.

Preuve en est avec ce dossier, les jeunes ingénieurs s'intéressent beaucoup à ce domaine. Est-ce un signe positif pour vous ?

Oui, d'autant que les cours sur les matériaux ont souvent disparu des écoles d'ingénieurs généralistes. C'est regrettable dans un pays qui appelle à une réindustrialisation de son territoire. L'innovation, c'est bien, mais il faut des gens capables de travailler sur les matériaux et procédés pour passer de l'idée au concret. C'est un prérequis, sans quoi il est impossible de savoir si un projet est réalisable. Par « réalisable », j'entends aussi « éco-conçu », car on ne peut plus travailler sans intégrer cette dimension du recyclage en fin de vie. Il faut pouvoir couvrir la totalité de la filière, du berceau à la tombe, avant la reprise d'un nouveau cycle.

Propos recueillis par
Céline Jacquot ■
Rédactrice en chef adjointe
de *Centraliens* (Paris)

EXEMPLES DE PROJETS MULTISectoriels SOUTENUS PAR MATERIALIA

Rubatox, un ruban adhésif innovant pour protéger les satellites

Fabriquer un ruban adhésif capable de prévenir les effets d'érosion subis par les satellites dans un environnement extrême tel que l'espace, c'est l'enjeu de ce projet lancé par Axon' Cable, société champenoise leader mondial dans le domaine des connexions et liaisons sur mesure. Materialia a aidé au montage du projet pour trouver les partenaires français et étrangers. Après plus de trois ans de tests, la société a mis au point un film isolant de faible densité entraînant des niveaux d'érosion 100 fois inférieurs au témoin polyimide et plus de 10 fois inférieurs au FEP utilisé dans l'industrie spatiale !



Prototype de ruban adhésif Rubatox.

Rhare : revêtements hybrides alternatifs aux résines fluorées

Projet porté par l'entreprise Fluorotechnique, spécialiste des traitements de surfaces haute performance, et le laboratoire chimie de la matière condensée de Paris. Son objectif : trouver une alternative écoresponsable aux résines fluorées, des revêtements utilisés pour l'aéronautique, le nucléaire, l'armement, la chimie, l'automobile, l'aérospatial... Grâce au soutien de Materialia, le projet a été sélectionné par l'Agence nationale de la recherche. Résultats : un LabCom financé en trois ans à compter du 1^{er} janvier 2018, et une première avancée : la création de revêtements innovants sans microplastique.

R2i2, imaginer la rotule automobile de demain

La société VT2i, équipementier automobile spécialiste des fonctions de liaison au sol, et le laboratoire d'étude des microstructures et de mécanique des matériaux (LEM3) ont initié dès 2015 un partenariat pour concevoir les rotules automobiles du futur. Grâce à ce projet, VT2i développe des éléments de pointe bénéficiant d'un haut niveau de performance et de fiabilité tout en répondant aux contraintes du marché. Cette étude permet également de tester l'intégration de nouveaux matériaux, émergents ou déjà utilisés dans d'autres domaines de l'automobile, permettant d'améliorer les tenues des rotules face à l'environnement routier.

LES TERRES RARES



Ulysse Vassas est étudiant en deuxième année à l'École Centrale de Marseille en énergie durable et vise un diplôme en sciences politiques de l'environnement. Amateur de lectures et films en tout genre, de nature et de voyages, il milite pour une transition durable, écologique et sociale.

réaliser des voitures électriques que de poursuivre une miniaturisation de nos appareils électroniques ? Ces matériaux, ce sont les terres rares.

Derrière cette appellation se trouvent 17 éléments aux propriétés chimiques, magnétiques, physiques extrêmement intéressantes pour le développement des high-techs si bien que leur consommation a explosé ses dernières années. D'autres métaux ne rentrant pas dans cette classification sont tout aussi rares et sont utilisés à une échelle industrielle qui met en danger l'approvisionnement durable de ces ressources.

NUMÉRIQUE et environnement : voilà les enjeux du XXI^e siècle abordés par les médias, discutés par les industriels, les entrepreneurs.

Qu'est-ce qui relie ces domaines ? Quels sont les matériaux communs à la fois à une éolienne et à une batterie de téléphone ? Et qui permettent aussi bien de



Éoliennes offshore.

En ce qui concerne les énergies renouvelables, ces terres rares ne sont pas nécessaires au développement des filières de l'éolien et du photovoltaïque, du moins faiblement, contrairement à ce qu'affirment certains détracteurs. Des métaux comme le néodyme sont nécessaires à la réalisation d'aimants permanents utilisés dans certains rotors d'éoliennes. Pour l'instant ces technologies ne représentent qu'environ 5 % de la puissance éolienne installée mais elles sont prisées pour les coûts de maintenance minimisés particulièrement dans l'éolien offshore, un secteur en pleine croissance. Mais dans 90 % des panneaux photovoltaïques, leur usage est inutile. Seuls les panneaux à couches minces nécessitent de grandes quantités de métaux rares et ce secteur est également en croissance.

Dans le secteur du numérique, on trouve des métaux rares en abondance dans les batteries toujours plus miniaturisées, dans les écrans et dans les lasers. D'autres métaux comme le platine sont indispensables pour réaliser des catalyseurs puissants nécessaires au développement de la filière hydrogène. La majeure partie de ces terres est utilisée pour des alliages métalliques largement présents dans l'industrie.

Pourquoi l'importance de ces ressources est-elle problématique ? Premièrement parce que la production est actuellement en situation de monopole, avec les risques géopolitiques associés : 97 % de ces terres sont actuellement extraites par la Chine alors même que le pays ne possède qu'un tiers des ressources minières. Pourquoi ? Parce que les conditions environnementales d'ex-

traction sont désastreuses. Dégagements de gaz toxiques, eaux acides et déchets radioactifs couplés aux conditions de travail inhumaines pour les mineurs chinois : telles sont les origines des matériaux soutenant notre croissance verte. La mine de Mountain Pass aux États-Unis était historiquement la plus grande productrice. Elle a fermé il y a 20 ans pour des raisons environnementales. La production de ces matériaux nécessaires à notre économie est désormais délocalisée, éloignant avec elle son coût social et environnemental.



Le Cerium (Ce).

Que faire pour réduire les impacts de nos consommations ? La première solution industrielle à développer massivement est le recyclage de ces matériaux. En effet, actuellement, la collecte des appareils usagés en France est inférieure aux objectifs fixés par le pays et les filières de recyclage sont quasi inexistantes particulièrement dans le cas d'alliages complexes. Cependant, le recyclage ne suffit pas à lui seul. Certains usages sont dispersifs donc irrécupérables, dans d'autres les terres rares sont incluses dans des alliages trop complexes pour être extraites. Le recyclage industriel est trop cher pour pouvoir satisfaire de nombreuses autres utilisations. De plus la demande

de métaux rares explose. Pour certains, il est prévu que la demande double ou quadruple (voire soit multipliée par 24 comme par exemple dans le cas du cobalt). Ces données sont à prendre en compte quand on sait qui produit toutes nos ressources et à quel prix.

Ces matériaux ne sont pas nouveaux mais leurs usages le sont. Et c'est eux que nous devons mettre en question si nous voulons réussir une transition durable à l'échelle de la planète. Il faut prendre en compte l'énergie grise de notre consommation et limiter les filières qui ne sont au fond pas nécessaires au bon fonctionnement de notre société mais représentent

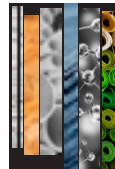
VOICI LA LISTE DES TERRES RARES

Cerium (Ce), dysprosium (Dy), erbium (Er), europium (Eu), gadolinium (Gd), holmium (Ho), lanthanum (La), lutetium (Lu), neodymium (Nd), praseodymium (Pr), prométhium (Pm), samarium (Sm), scandium (Sc), terbium (Tb), thulium (Tm), ytterbium (Yb), yttrium (Y). Leur utilisation concerne les moteurs électriques, les aimants permanents, certaines turbines éoliennes, les disques durs, les portables électroniques, les microphones, les enceintes, les batteries, les lasers, l'imagerie médicale...

une consommation démentielle. Comme le conseille Philippe Bihouix dans son ouvrage, nous pouvons dans nos choix professionnels, industriels et personnels remettre en cause les besoins d'une société ou d'individus, orienter le savoir vers l'économie de ressources et non seulement de moyens, relocaliser, démachiner... C'est de cette façon que nous pouvons aborder les enjeux des matériaux du XXI^e siècle. ■

Ressources :

www.latribune.fr/technos-medias/internet/comment-le-numerique-pollue-dans-l-indifference-generale-801385.html
www.loretargent.info/investissement/ne-pas-investir-terres-rares/16260/
decrypterlenergie.org/la-rarete-de-certains-metaux-peut-elle-freiner-le-developpement-des-energies-renouvelables
www.ecofys.com/files/files/wwf-ecofys-2014-critical-materials-report.pdf
revuelimite.fr/metaux-rares-et-gros-mensonges-la-face-cachee-des-high-tech
 La guerre des métaux rares, Guillaume Pitron, Les Liens qui libèrent, janvier 2018.
 L'âge des low-tech de Philippe Bihouix, Seuil, 2014.



LES MATÉRIAUX ANCIENS AU SERVICE DE L'INNOVATION DURABLE



Philippe Bihouix (ECP96), est l'auteur de *L'Âge des low tech – Vers une civilisation techniquement soutenable* (Seuil, 2014), *Le désastre de l'école numérique, plaidoyer pour une école sans écrans* (avec Karine Mauvilly, Seuil, 2016) et *Le bonheur était pour demain – Les rêveries d'un ingénieur solitaire* (Seuil, 2019).



Laurent Castaignède (ECP93), fondateur du bureau d'études BCO2 Ingénierie (www.bco2.fr), est l'auteur de *Airvore ou la face obscure des transports, chronique d'une pollution annoncée* (Écosociété, 2018).

ET SI LES SOLUTIONS aux désordres environnementaux gisaient dans les matériaux et les usages anciens, autant ou plus que dans l'innovation technologique ? C'est ce que proposent Philippe Bihouix (96) et Laurent Castaignède (93), tous deux apôtres d'une contre-culture allant à l'encontre du messianisme technologique. Un point de vue qui selon ses auteurs paraîtra – volontairement – provocateur à une population d'ingénieurs, orientés vers le progrès technique, formés au développement de nouvelles matières, de nouveaux artefacts et de nouveaux procédés.

Les découvertes récentes ou à venir nous promettent encore de belles surprises : matériaux plus résistants, plus performants, plus légers, plus efficaces, plus « verts » (biodégradables, biosourcés, mieux recyclables, peu polluants, bas carbone...), et même « intelligents » ! De quoi les mettre, *a priori*, au service d'une économie véritablement durable, de la

lutte contre le changement climatique et les pollutions de toute sorte, dans des domaines aussi variés que les transports, le bâtiment, la santé ou la consommation du quotidien. L'histoire montre pourtant que la course en avant technologique ne nous rapproche pas d'un fonctionnement soutenable de nos sociétés. Force est de constater, malheureusement, que les « progrès » ou les découvertes permettent rarement d'abaisser notre empreinte environnementale globale à la hauteur des promesses ou des espoirs suscités. Les bienfaits escomptés des nouvelles technologies déployées sont souvent réduits pour différentes raisons.

La face cachée des nouvelles technologies

Il peut y avoir, d'abord, des effets indésirables, par exemple des coûts environnementaux cachés qui alourdissent le bilan. Pensons par exemple à la question des batteries des véhicules

électriques. Il y a ensuite parfois des difficultés de prise en main ou des modifications intempestives par les usagers : ainsi certains smart buildings ultra-optimisés tournent-ils au cauchemar en phase de maintenance, avec à la clé une dépense énergétique bien supérieure aux estimations des thermiciens, sans parler des occupants qui ajoutent des climatiseurs ou des convecteurs d'appoint ! Dans les transports motorisés comme dans le bâtiment, il y a ainsi un décalage croissant entre émissions théoriques et réelles.

Il y a enfin, surtout, l'effet rebond : à chaque fois qu'une technologie permet un gain d'efficacité technique (donc aussi économique), le volume de la consommation globale augmente, ce qui annihile les gains ou empire la situation. Les nouveaux alliages au rhénium dans les turboréacteurs ont fortement réduit la consommation de carburant des avions... mais aussi permis l'essor de l'aviation low-cost. Les progrès réalisés dans l'architecture et la dépense énergétique des datacenters ont été énormes, mais ont fait chuter le prix de stockage des données numériques, qui doublent tous les 18 à 24 mois. Etc.

Après l'agriculture, le bâti raisonné

Si « solutions » il y a, elles ne seront pas techniques, mais sociotechniques, prenant en compte les usages et le facteur humain. C'est dans ce cadre que la réutilisation de matériaux anciens ou la redécouverte de savoir-faire ancestraux pourrait prendre tout leur sens.





Exemple de chantier de logements collectifs neufs à ossature bois, isolation paille, enduit et cloisons en terre, au cours duquel même les futurs habitants ont pu mettre « la main à la pâte » en collaboration avec les entreprises. Immeuble La Ruche, Bègles (33, Axanis). Crédit photos : © Dauphins Architectes, Faïçal Oudor / Habitat Naturel.

Ainsi dans le domaine du bâtiment, où les préoccupations pour un habitat plus sain, face aux menaces sanitaires et climatiques, questionnent le « tout-béton »¹ et font resurgir, chez les particuliers et les maîtres d'ouvrage soucieux de leur impact environnemental, des projets de murs de terre crue, en ossature bois et en isolation paille... de sérieux concurrents au « béton bas carbone » ou aux derniers « écomatériaux » technologiques proposés par les industriels. Parallèlement, on redécouvre les vertus de la ventilation naturelle et de la gestion du flux hygro-métrique (puits canadiens, ouvrants sur les façades opposées, isolants biosourcés...). Du côté des usages, les matériaux anciens les plus pertinents pourraient bien être... le coton et la laine ! Pourquoi consacrer autant d'énergie à optimiser les enveloppes et les équipements sophistiqués des bâtiments pour garantir une fraîcheur agréable au cœur de l'été et une douceur ouatée en plein hiver, sans se préoccuper de la tenue vestimentaire des occupants ? Il est en effet beaucoup plus simple, et beaucoup moins coûteux (à tous les points de vue), d'isoler ou de rafraîchir les corps que les bâtiments, en ajoutant ou en enlevant des habits. Par exemple, troquer son costume-cravate en été contre une chemise à manches courtes, un bermuda et des chaussures ouvertes permet de réduire l'isolation des corps de 0,4 clo² – soit un écart d'environ 4 °C

sur la température ressentie³. En hiver, le pull-over permettrait de rapprocher la température de consigne des hypothèses des bureaux d'études (19 °C en logement, guère plus en tertiaire...).

Vers un retour aux sources

Dans le domaine de l'urbanisme, la terre végétale pourrait partir à la reconquête de l'asphalte, et la lignine des arbres⁴, partout où il est possible d'en planter, aider à lutter contre les îlots de chaleur urbains. L'énergie captée par la photosynthèse et le rafraîchissement de l'air par évapotranspiration en font des outils très efficaces, outre les autres avantages possibles d'une renaturation (biodiversité, reconnexion de proximité des citoyens à la « nature »...).

Dans le domaine des transports, c'est sans nul doute la fibre musculaire qu'il faut redécouvrir d'urgence avec la marche et le vélo, à assistance électrique si besoin. Certes, dans les pays émergents, les populations nouvellement aisées demeurent avides de passer sur quatre roues, multipliant les embouteillages et augmentant les distances parcourues dans les nouvelles mégapoles. Dans les pays occidentaux qui disposent d'une solide expérience en matière de congestion et d'étalement urbain, les

grandes métropoles saturées déploient au contraire moult efforts pour encourager l'usage de la bicyclette, vecteur de fluidité comme de santé⁵.

Poussons le bouchon un peu plus loin. Pourquoi ne pas redécouvrir la craie⁶ à l'école ? Malgré la fascination exercée par les écrans scintillants, la numérisation de l'école n'a, à ce jour, démontré aucun bénéfice pédagogique, tandis que les conclusions d'études sur les risques psychosociaux, chez les tout-petits en particulier, s'enchaînent. Et que dire de notre engouement pour l'« intelligence » artificielle ? Au-delà des fantasmes ou des effets d'annonce destinés à capter des financements publics ou privés, ou à vendre un peu de temps d'attention médiatique, la matière grise a certainement de beaux jours devant elle. Et pour nos smart cities du futur, nous devrions d'abord compter sur l'intelligence des citoyens, plutôt que sur celle des machines : le bon sens, paysan si besoin, surpassera encore les algorithmes dans de nombreuses applications.

Il ne s'agit pas de renoncer à tout développement technologique. Certains « nouveaux » matériaux peuvent être intéressants, à condition d'analyser leur impact sur le cycle de vie complet, et d'assurer qu'une généralisation est possible sans effet pervers. Mais une autre innovation, centrée sur les usages, est désormais nécessaire : entre low-tech frugale et high-tech souvent insoutenable à grande échelle, notre avenir hésite. ■

1 - La fabrication du ciment représente à elle seule 5 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre.

2 - Abréviation de clothing : unité de calcul de l'isolation des corps par les vêtements. 1 clo ≈ 0,155 °C.m²/W.

3 - Cf. la campagne Cool Biz lancée en 2005 au Japon et 2006 en Corée du Sud, redéfinissant le code vestimentaire pour l'adapter aux saisons, suivie au plus haut niveau (les ministres montrent l'exemple), accompagnée par de grandes marques de vêtements.

4 - Matériau apparu il y a 380 millions d'années (Dévonien).

5 - Effet positif sur la pollution de l'air ambiant, mais aussi la sédentarité qui n'a jamais été aussi grande du fait de l'assistance motorisée à la mobilité (véhicules, escalators, ascenseurs, etc.).

6 - « Seulement » 65 à 90 millions d'années (Crétacé).

LES MÉCANISMES DE LA TITRISATION



Alain Lemasson (68), est le fondateur du site de e-learning infi2000.com, et l'auteur de *Banque Finance Économie pour tous* (deuxième édition) paru en février 2019. Il est contributeur du journal *Les Échos* et conférencier à l'École Centrale de Pékin. a@lemasson.org



Titrisation, ce mot est apparu à plusieurs reprises dans l'actualité de ces dernières années, comme un OVNI quelque peu mystérieux, voire dangereux. On a par exemple accusé la titrisation d'être à l'origine de la crise des subprimes, cette crise fameuse qui a coûté cher aux investisseurs et par ricochet aux finances et à l'économie de nombreux pays. À tort d'ailleurs, car la titrisation n'a pas été plus responsable de la crise en question que l'avion ne l'est des catastrophes aériennes.

Le sujet de la titrisation s'inscrit dans le prolongement de l'introduction aux banques et aux marchés présentée dans le numéro précédent. Un sujet « technique » intéressant à décortiquer du fait de son actualité, mais pas seulement.

La titrisation est en effet une « passerelle » entre les banques et les marchés. L'étude de son mécanisme et l'analyse de sa raison d'être conduisent ainsi à une réflexion plus globale sur le rapport entre ces deux mondes et leurs rôles respectifs dans l'économie.

L'intérêt des banques

La titrisation est un mécanisme conçu il y a longtemps déjà et qui s'opère en deux temps. En premier lieu donc, une banque vend des crédits à une entité intermédiaire, une autre banque ou un fond par exemple. Cette entité intermédiaire émet ensuite des obligations

adossées aux crédits en question. Les acheteurs des obligations sont des investisseurs, c'est-à-dire des banques, des fonds ou même des particuliers.

Étrange *a priori*, ce mécanisme découle par exemple d'une volonté de la banque de changer sa politique commerciale, en passant à un nouveau segment de clientèle. Comme les limites de volume de crédits sont très strictes, la banque va vendre certains crédits existants pour « faire de la place » à de nouveaux crédits.

C'est ce qu'illustre le schéma ci-dessous. Sans être un expert en comptabilité, on comprend que ce qui est figuré ici : le bilan simplifié de la banque, avant et après l'opération. Il suffit de suivre l'évo-

Pour la banque, en revanche, c'est très différent car son rôle se cantonne dès lors à percevoir les paiements de l'emprunteur et à les transmettre à l'entité qui lui a acheté les crédits. Ces crédits lui sont payés cash et surtout, la banque n'est plus en risque, et c'est cela qui compte.

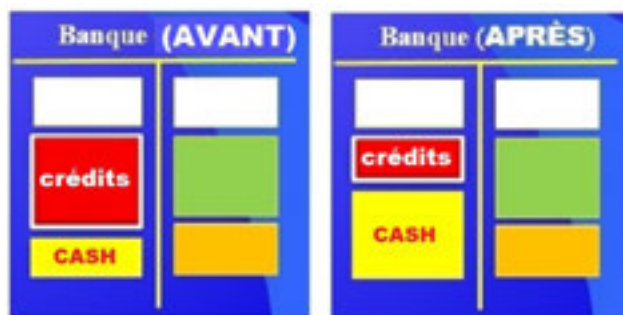
Juridiquement, on parle de cession de créances sans recours. Car c'est bien de cela qu'il s'agit : « vendre » un crédit signifie précisément vendre des créances, une définition un peu abstraite qui invite à réfléchir à la vraie nature du crédit.

Si le total du bilan de la banque n'a pas changé, sa structure n'est plus la même. La banque peut faire de nouveaux crédits ou au contraire décider d'en rester là. Une raison peut être pour elle d'améliorer son ratio fonds propres sur encours, un ratio très important, dont le calcul fait d'ailleurs l'objet de négociations serrées dans les fameux accords de Bâle.

L'intérêt des investisseurs

La deuxième étape de la titrisation concerne le volet « investisseurs ». L'entité qui a acheté les crédits émet alors des obligations vendues aux investisseurs. En fait on parle plutôt de titres, un mot plus général (*security* en anglais).

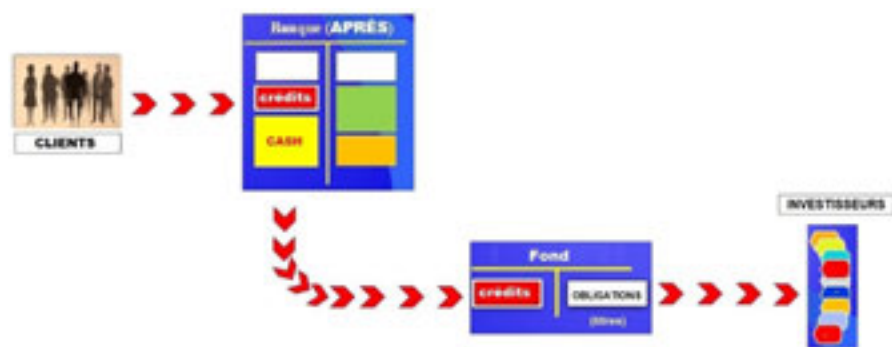
Le remboursement des crédits cédés suit le circuit de principe indiqué page suivante. Dans ce schéma, la banque va



Changement dans la structure de l'actif de la banque.

lution des rectangles rouges et jaunes. Ce que la banque a « perdu » en crédits est en fait exactement compensé par l'augmentation de son cash.

Cette vente est un peu particulière en ce sens que le client emprunteur ne se rend compte de rien. Il continue le remboursement de son crédit en cours comme avant.



Le circuit du remboursement de crédits cédés.

reverser au fond acheteur des crédits les paiements qu'elle reçoit des emprunteurs d'origine – diminués d'une éventuelle commission de gestion. Le fond fait ensuite son affaire de rémunérer les acheteurs d'obligations.

En réalité, les banques de Wall Street ont un peu compliqué le mécanisme, en enchaînant ou combinant les fonds notamment, de manière à présenter aux investisseurs une palette d'investissement diversifiés. Les techniques utilisées, passionnantes à décortiquer, ne sont pas vraiment compliquées à comprendre. Un peu de calcul actuariel et de jargon, tout au plus.

Plus généralement, on peut se demander pourquoi l'idée d'investir dans les crédits a rencontré un tel succès. La réponse est en grande partie dans l'immense appétit des investisseurs. Le FMI estimait l'épargne disponible à environ 70 000 milliards de dollars il y a quelques années !

Des fonds et certaines banques de Wall Street drainent cette épargne gigantesque et la canalisent vers les meilleurs investissements. Tout le monde recherche le placement idéal, en fait le meilleur ratio rendement-risque.

Alors justement l'idée d'investir dans des crédits a germé très tôt. Le bon sens commande en effet qu'il est plus risqué de faire un prêt d'un million à un emprunteur que dix prêts de 100 000. La probabilité de tout perdre est plus forte dans le premier que dans le second. Par ailleurs, les « petits » crédits ont des taux d'intérêt plus élevés que les gros. Acheter des obligations adossées à un paquet de

crédits titrisés, c'est moins de risque et plus de rentabilité.

En fait, contrairement à ce que l'on pourrait penser, la crise des subprimes n'a pas freiné la titrisation et dissuadé les investisseurs, au contraire. Les choses sont reparties de plus belle, avec les corrections nécessaires. Même la BCE encourage les banques européennes dans ce sens, discrètement il est vrai.

Banques et marchés : la complémentarité

Sur un plan macro-économique, le développement de la titrisation pourrait faire penser à une concurrence accrue entre les banques et les marchés. Il s'agit en fait d'une complémentarité.



Financement des entreprises aux États-Unis et en Europe.

Pour le comprendre, il faut avoir à l'esprit que les besoins de financement des entreprises n'ont plus rien de commun avec ce qu'il en était il y a dix ou quinze ans. Les énormes dépenses de R&D aujourd'hui nécessaires ou les coûts de conquête de nouveaux marchés dépassent leurs capacités d'autofinancement.

Face à ces besoins, les moyens des banques sont limités en volume et surtout en risque. Pour des raisons compréhensibles de prudence, il n'est pas question pour elles par exemple de prêter aux start-up, sous peine de mettre en risque,

outre l'argent des actionnaires de la banque, les dépôts des clients.

Les marchés n'ont pas ces contraintes de volume et de risque, car les investisseurs sont les seuls à supporter les conséquences de leurs décisions.

Une deuxième interrogation survient par ailleurs lorsque l'on compare les banques et les marchés européens avec leurs homologues américains. Leurs tailles respectives tout d'abord sont très différentes, reflétant ainsi l'avancée de l'économie américaine et l'importance de son produit national brut.

Plus frappant est le poids des banques dans le financement de l'économie européenne, avec une contribution de 70 %, alors que cette situation est inversée aux États-Unis.

Pourquoi nous n'avons pas de GAFA européennes

Il faut voir que les banques et les marchés fonctionnent comme des pompes qui font circuler l'argent dans l'économie, un peu comme le système cardiaque alimente le corps humain, une réalité médicale fort bien décrite d'ailleurs dans un article publié dans la revue précédente.

L'actualité nous montre chaque jour que l'affrontement entre les grands blocs se fait sur le terrain économique et notamment celui de la finance. Renforcer le système financier européen est nécessaire si nous ne voulons pas perdre du terrain face aux États-

Unis et bientôt à la Chine. Notre retard en la matière est certainement une raison majeure de l'absence de GAFA européennes sur la scène internationale.

Ce retard a des causes multiples, historiques et politiques. La BCE s'emploie à promouvoir la constitution de puissantes banques pan-européennes, qui sont la condition première du développement du marché européen des capitaux. L'adhésion des opinions publiques à ce projet – et donc du parlement européen – est une condition importante de sa réussite. ■

HISTOIRE DE LA CARDIOLOGIE

Découverte des moyens diagnostiques paracliniques



Christian Rey est médecin diplômé de pédiatrie et de cardiologie et professeur de cardiologie université Lille 2. Ancien chef du service des maladies cardiovasculaires infantiles et congénitales de l'hôpital cardiologique du CHRU de Lille. Ancien président de la filiale de cardiologie pédiatrique et congénitale de la société française de cardiologie. Ancien membre du bureau de l'association européenne de cardiologie pédiatrique.

Les rayons électromagnétiques

En 1895 Wilhelm Conrad Röntgen, physicien allemand de l'université de Würzburg a découvert les rayons électromagnétiques ce qui lui a valu en 1901 le prix Nobel de physique. Le 22 décembre 1895 il prend la première radiographie, la main de sa femme Anna Bertha Ludwig Röntgen sur laquelle on devine très bien l'alliance. Le 25 décembre, Röntgen communique à la société médicale de Würzburg « sur une nouvelle espèce de rayons » encore inconnus et qu'ils dénomment rayons « X ». Très rapidement les clichés s'améliorent et la main de Anna Röntgen est encore mieux visible sur la radio faite par Albert von Kolliker prise



Première radiographie de la main de Anna Bertha Ludwig Röntgen.

le 23 janvier 1896. En France la première radiographie thoracique a été réalisée en janvier 1896 ; cette radio est conservée à l'Académie de médecine. Il fallait une pose de 40 minutes. En 1897, Bécclère, à l'hôpital Tenon, ouvre un service de radiologie et débute le premier enseignement mondial de « radiologie médicale ». Il invente le mot « radiodiagnostic ».

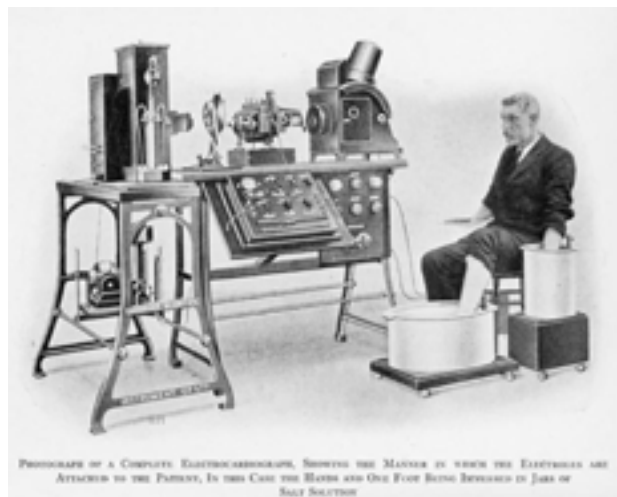
La radiographie était née avec des améliorations rapides dans la technique notamment lors de la Grande Guerre. Cette technique a été particulièrement utile pour localiser les projectiles dans le corps des soldats afin de les extraire.

L'électrocardiogramme

Une autre avancée fut la découverte de l'électrocardiogramme (ECG) précédée des travaux de l'italien Carlo Matteucci en 1842, de l'allemand Emil du Bois-Reymond et du français Lippmann sur l'activité électrique accompagnant la contraction cardiaque. Le physiologiste anglais Augustus Waller enregistre le premier tracé d'électrocardiogramme sur un chien en 1888 puis chez l'homme au St Mary's Hospital de Londres. La rencontre de Waller avec Willem Einthoven né en 1860 à Java dans les Indes néerlandaises fut déterminante. Ce physiologiste

néerlandais utilise en 1901 un galvanomètre à cordes constitué d'une fibre de quartz recouverte d'argent placée entre les deux pôles d'un électro-aimant pour faire un ECG ; le patient met les deux mains et un pied dans une jarre d'eau salée. Einthoven reçu en 1924 le prix Nobel de Médecine.

Pour compléter les explorations électrocardiographiques il faut citer Norman Jefferis Holter né le 1^{er} février 1914 à Helena dans le Montana. Pendant la seconde guerre mondiale, il était physi-



Premier électrocardiogramme (ECG).

cien en chef de la United States Navy et a étudié les caractéristiques des vagues et leur importance pour les opérations militaires amphibies. Après la guerre il s'est intéressé à la physiologie cardiaque et notamment aux problèmes coronaires sans signes cliniques c'est à dire à l'ischémie silencieuse mais détectable sur un électrocardiogramme. Il entrepris avec son ami Joseph Gengerelli de développer un système d'enregistrement du rythme cardiaque en continu. Au début le patient avait un appareil sur le dos et progressivement les appareils se sont perfectionnés et actuellement la personne ne porte qu'une cassette pour son « enregistrement Holter » c'est à dire un enregistrement ambulatoire de l'ECG pendant 24 heures ou plus.

Avec un stéthoscope, une bonne radiographie de thorax et un ECG, grand



Premier enregistrement continu de l'ECG selon méthode Holter.

nombre de diagnostics ont été réalisés avant que d'autres progrès techniques ne voient le jour. Après avoir étudié la morphologie externe du cœur par la radiographie du thorax et le système électrique du cœur avec l'ECG, les explorations endovasculaires et endocavitaires ont permis d'analyser l'intérieur du cœur du vivant des malades : c'est la naissance du cathétérisme et de l'angiographie cardiaque. Les explorations hémodynamiques sont devenues la base du traitement chirurgical avant que l'échocardiographie voie le jour et la base du cathétérisme interventionnel.

Comment est né le cathétérisme cardiaque ?

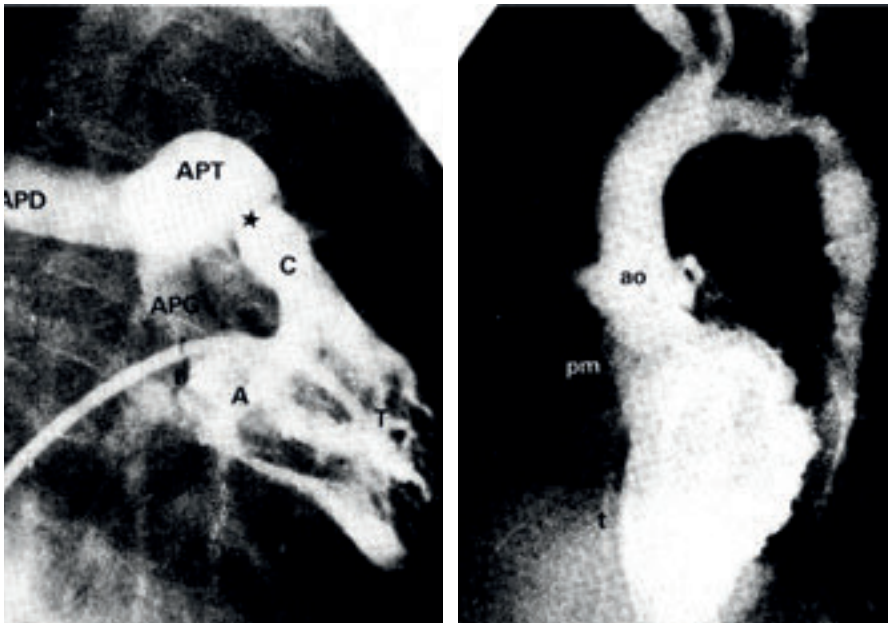
Werner Forssmann né à Berlin en 1904 fut le pionnier ce qui lui valut le prix Nobel de médecine en 1956. Il se souvint des travaux des français Jean-Baptiste Auguste Chauveau (1827-1917), vétérinaire, et Étienne Jules Marey (1830-1904), médecin et physiologiste. Il voulait être polytechnicien mais ses parents ont souhaité qu'il s'inscrive en médecine. Ce fut un savant passionné de physiologie qui inventa les premiers

instruments d'investigation paraclinique en cardiologie. Certains l'ont nommé le « bibeloteur de la cardiologie. » Chauveau rencontra Marey inventeur des premiers instruments d'exploration du cœur ; c'était le spécialiste de l'enregistrement graphique du mouvement. L'appareillage inventé par Marey comporte un capteur, un transporteur qui transmet l'information physiologique et l'inscripteur-enregistreur. Ainsi il met au point le « sphygmographe » pour mesurer la fréquence du pouls sur une plaquette mobile enduite de noir de fumée. Il invente également le sphygmoscope, le manomètre métallique inscripteur pour mesurer la pression artérielle chez l'animal. Avec Chauveau, devenu son ami, ils ont réalisé les premiers enregistrements cardiaques endocavitaires chez le cheval. Ils ont choisi le cheval car c'est un animal imposant avec un grand cœur, au sens propre et figuré et aussi parce que le rythme cardiaque du cheval est lent, 35 à 45 battements par minute. Ils ont ainsi enregistré les pressions dans l'oreillette droite et dans le ventricule droit en introduisant une sonde en gomme dans la veine jugulaire. En 1862, Chauveau et Marey réalisent le cathétérisme simultané du cœur droit par la veine jugulaire et du cœur gauche atteint par la carotide. Ils enregistrent ainsi les pressions dans les cavités droites et gauches sur un enregistreur enduit de noir de fumée qui tourne à une vitesse constante. Les expériences de Chauveau et Marey furent vérifiées par une commission d'enquête désignée par l'Académie des sciences et présidée par Henri Milne-Edwards qui concluait : « ces deux physiologistes ont rendu visibles et faciles à constater des phénomènes dont l'observation était très difficile et leurs expériences nous semblent devoir cesser toute discussion sur ce point de l'histoire de la circulation du sang ». Ceci n'empêcha pas les polémiques jusqu'en 1864 comme après chaque découverte, par exemple la circulation selon Harvey, la circulation extracorporelle... Les travaux de Marey furent reconnus et lui-même a été élu en 1895 président de l'Académie des sciences et en 1900 président de l'Académie de médecine. Cependant, en recherchant bien, on découvre que le pasteur anglais Stephen Hales (1677-1761), passionné de biologie, réalise la première mesure de la pression artérielle chez une jument en abouchant une canule

de cuivre dans l'artère crurale en 1730. Il publie son livre sur l'hydraulique du sang en 1733 *Expériences hydrauliques sur le sang et les vaisseaux sanguins* donc plus d'un siècle avant Chauveau et Marey ; la traduction française a été réalisée en 1744 par François Boissier de Sauvages de Lacroix, conseiller médecin du Roy, professeur royal de médecine en l'université de Montpellier qui dit : « quelle honte pour les médecins, qu'un théologien leur ait enlevé l'honneur de tant de découverte ».

Forssmann a donc eu connaissance des travaux de Chauveau et Marey mais pas de ceux de Hales semble-t-il. Il était résident à l'hôpital d'Eberswalde en Allemagne lorsqu'il réalisa, en 1929, sur lui-même, un cathétérisme veineux en utilisant une sonde urétérale introduite dans une veine du bras, contre l'avis de son chef de service. En novembre 1929 il arriva à l'hôpital de la Charité à Berlin et publia ses travaux dans l'indifférence. On s'aperçut alors que Forssmann n'était pas le premier à avoir réalisé un cathétérisme veineux. En effet Bleichoder, Unger et Loeb avaient déjà publié en 1912 trois articles disant qu'ils avaient introduit une sonde jusque dans l'aisselle et jusque dans la veine cave inférieure à partir de la cuisse pour faire des injections de collargol. Forssmann a eu quelques ennuis et a été expulsé de l'hôpital de Berlin pour retourner à Eberswalde puis s'installa comme urologue en médecine libérale à Berlin.

André-Frédéric Cournand (1895-1988) était un médecin français qui est allé aux États-Unis à New York en 1930 pour effectuer un stage, d'un an à la Columbia University ; à la fin de son stage le patron James A. Miller lui propose de rester dans son service pour travailler avec Dickinson Richards sur le cathétérisme cardiaque ; déjà à cette époque les cerveaux français s'expatriaient car les conditions pour la recherche étaient meilleures qu'en France. Cournand fut naturalisé américain en 1941. En 1942 l'équipe de Cournand et Richards inventent une sonde et publient leur expérience du cathétérisme ventriculaire droit et en 1944 le cathétérisme pulmonaire. Peu de temps après en France, Jean Lenègre et Pierre Maurice à Paris publient également en 1944 leurs résultats de cathétérisme ventriculaire



À gauche, angiographie du ventricule droit et de l'artère pulmonaire de profil chez un enfant. À droite angiographie du ventricule gauche et de l'aorte en oblique chez un enfant.

droit avec des sondes urétérales chez 52 malades. Le cathétérisme permet de mesurer les pressions intracardiaques, de prélever du sang dans les cavités cardiaques droites et l'artère pulmonaire pour mesurer le débit cardiaque en utilisant le principe de Fick. Forssmann, Cournand et Richards ont reçu le prix Nobel de médecine en 1956 pour leurs travaux sur le cathétérisme cardiaque. L'apport du cathétérisme cardiaque modifie la compréhension des cardiopathies de l'adulte et des cardiopathies congénitales qui sont des malformations cardiaques.

L'angiocardographie

Les médecins ont cherché à voir ce qui se passait à l'intérieur du cœur : c'est l'imagerie avec opacification cardiaque par voie endovasculaire, appelée angiocardographie. On injecte un bolus de produit de contraste in vivo dans une veine ou dans le cœur atteint par l'intermédiaire d'un cathéter et on prend des clichés radiographiques ; tout d'abord un seul cliché était pris puis un cliché de face et un de profil et plus tard des clichés successifs séquentiels. Ainsi George P. Robb (1898-1938) et Israel Steinberg (1902-1983) rapportent en 1939 leurs résultats de 238 angiographies chez 127 malades. Cette technique leur a permis de décrire certaines malformations cardiaques congénitales et des

anomalies acquises du cœur droit (oreillette droite, ventricule droit, circulation pulmonaire). En France, les premières angiographies sont réalisées en 1941 et Édouard Donzelot (1884-1960) publie en 1949 l'angiographie dans les cardiopathies congénitales : « *en appliquant l'angiocardographie aux petits congénitaux de Centre des Enfants Bleus, nous savions que la méthode nous apporterait des renseignements précieux, mais nous n'ignorions pas qu'elle n'était pas absolument exempte de risques* ». Plus tard, les images planes ont été remplacées par la cinéangiographie donnant des renseignements morphologiques et dynamiques. L'angiographie coronaire, appelée coronarographie, a vu le jour grâce à Sones en 1958. À partir de 1962, la coronarographie se développe et dès 1967, devient de pratique courante grâce aux cathéters spécifiques de Judkins et Amplatz.

Avec le stéthoscope, l'ECG, la radiographie et le cathétérisme cardiaque et vasculaire couplé à l'angiographie, les chirurgiens peuvent réaliser des interventions sur les vaisseaux et sur le cœur. Cependant avec l'imagerie par ultrasons, il est possible d'envisager une chirurgie cardiaque sans angiographie

Les ultrasons

Une des grandes révolutions dans la cardiologie est l'utilisation des ultrasons.

On sait depuis longtemps que les animaux comme les chauves-souris, les dauphins et les baleines émettent des ultrasons pour localiser des objets. En 1876, Francis Galton, homme de science britannique né près de Birmingham, invente le sifflet à chien qui émet des sons de la classe des ultrasons. Aucun être humain ne peut les entendre contrairement à certains animaux comme les chiens ou les chats, d'où leur utilisation dans le dressage. Paul Langevin, physicien français né à Paris en 1872, met au point en 1917, avec l'ingénieur Constantin Chilowski, l'Asdic (acronyme de Anti-Submarine Detection Investigation Committee), l'ancêtre du sonar, appareil destiné à détecter les sous-marins et les mines en utilisant la réflexion des ondes ultrasonores sur ces objets. Il est aussi utilisé pour la pêche, ainsi qu'en navigation pour mesurer la profondeur des mers et océans. À la fin de la dernière guerre mondiale, le suédois Inge Edler à Lund, avec l'aide du physicien Hellmuth Hertz, commença à étendre le principe



Échocardiographie fœtale montrant les 4 cavités cardiaques : OD=oreillette droite ; VD=ventricule droit ; OG=oreillette gauche VG=ventricule gauche.

des ultrasons à la médecine en appliquant un transducteur sur la poitrine d'un patient. Ses premières publications datent de 1954 mais ce n'est que vers 1970 que des appareils à ultrasons sont au service de la cardiologie. Depuis les techniques ont très vite évolué. L'arrivée de l'échocardiographie et notamment du doppler à codage couleur a été une nouvelle révolution dans la cardiologie. L'échocardiographie donne

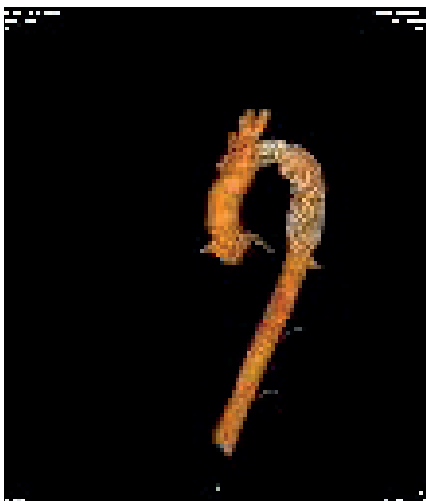


Scanner cardiaque d'un enfant montrant l'oreillette gauche (OG), le ventricule gauche (VG) et l'aorte (AO).

des renseignements morphologiques et dynamiques complémentaires de l'angiographie, qui peuvent dans certains cas être suffisant pour confier le malade au chirurgien. Le dépistage de certaines cardiopathies congénitales est maintenant possible chez le fœtus.

Le scanner

L'arsenal des explorations cardiovasculaires ne s'arrêtent pas là. D'autres imageries cardiaques apparaissent progressivement : le scanner a été mis au point en 1972 par le britannique Godfrey Newbold Hounsfield suite aux travaux de l'américain Allan MacLeod Cormack. Ils requièrent



IRM de l'aorte d'un jeune homme qui a eu une implantation d'une endoprothèse pour corriger une coarctation (rétrécissement d'une partie de l'aorte).

le prix Nobel de médecine en 1979. Le scanner thoracique ou tomodensitométrie est basé sur l'utilisation des rayons X émis à faible dose et consiste à radiographier le thorax en tranches successives d'une épaisseur donnée et à reconstituer l'image en informatique ; on obtient ainsi des images de coupes des différentes structures du thorax, en particulier le cœur et les poumons. Les clichés sont pris habituellement après une injection de produit de contraste. Il est possible ainsi sans cathétérisme cardiaque de visualiser les gros vaisseaux (l'aorte, les

artères pulmonaires, les veines pulmonaires, les veines caves) et d'étudier les artères coronaires (coroscan).

L'IRM

L'imagerie par résonance magnétique, est basée sur la résonance des atomes d'hydrogène sous l'action d'ondes de radiofréquence. La cinéangiographie par résonance magnétique permet d'étudier la fonction cardiaque et les flux circulants à l'intérieur du cœur, la morphologie des structures cardiaques, les volumes des ventricules en systole et en diastole et donc la fraction d'éjection (quantité de sang éjecté dans l'aorte à partir du ventricule gauche), les gros vaisseaux, les artères coronaires avec possibilité d'une reconstruction tridimensionnelle.

Le cathétérisme interventionnel

Le cathétérisme interventionnel consiste à réaliser au cours d'un cathétérisme artériel, veineux ou cardiaque, un acte thérapeutique par voie percutanée. Le but est

de traiter définitivement sans intervention chirurgicale une malformation cardiaque ou une maladie acquise, ou d'améliorer l'état hémodynamique du malade en attendant une intervention chirurgicale, voire de compléter un acte chirurgical. On peut ainsi créer une communication entre les oreillettes chez le nouveau-né dans certaines malformations cardiaques, dilater une valvule sténosée, une artère obstruée (par exemple une artère coronaire), implanter des endoprothèses ou stents dans des artères, fermer des communications anormales artérielles, veineuses ou intracardiaques, remplacer une valvule intracardiaque... Cet acte thérapeutique se réalise chez le nouveau-né, le nourrisson, l'enfant ou l'adulte. Lorsque le cathétérisme interventionnel est impossible il faut donc se résoudre à la chirurgie.

Conclusion

La cardiologie est une des disciplines médicales, si ce n'est la seule, qui a le plus progressé depuis l'antiquité et



Radiographie de profil d'un enfant chez qui une endoprothèse valvulaire pulmonaire a été implantée par cathétérisme

surtout depuis la découverte de la circulation selon Harvey. Grace aux méthodes d'explorations diagnostiques toujours plus ingénieuses et performantes, le diagnostic et le traitement des maladies cardiaques a pris un essor considérable et comme le disait Jean-Paul Binet « la chirurgie mérite d'être contée », mais c'est une autre histoire. ■

Chronique culturelle

À LA MÉMOIRE DE...

Anniversaires de musiciens en 2019.


• Hector Berlioz (1803-1869) - 150^{ème} anniversaire de son décès

Le musicien romantique français par excellence. Il abandonnera très vite les études de médecine imposées par son père, lui-même médecin, pour se consacrer à la musique dont il a eu une première éducation dans sa prime jeunesse. Sa nature passionnée s'enthousiasma pour Gluck et Weber et il étudia la composition, aboutissant à une *Messe solennelle*. De Weber, il écrivit l'orchestration de *L'invitation à la valse*, une réussite exceptionnelle de la répartition des différents timbres des instruments de l'orchestre. En 1830, au concours de Rome lui fut attribué le 1^{er} grand prix, après deux échecs préalables, pour la cantate *La dernière nuit de Sardapale*. Dans cette même année 1830 fut créée la *Symphonie fantastique*, son premier grand succès, en présence de Liszt. C'est aussi la passion qui anima sa vie sentimentale très agitée : il épousa la comédienne Harriet Smithson, inspiratrice de sa *Symphonie fantastique*. Une autre composition importante fut suggérée par Paganini : *Harold en Italie*, pour alto et orchestre. Berlioz obtint à l'étranger encore plus de succès qu'en France, allant diriger ses œuvres à Prague, Budapest et Saint-Petersbourg. De retour à Paris, son talent devient de plus en plus reconnu, avec l'oratorio *L'enfance du Christ*, le *Te Deum*, et les opéras : *Les Troyens*, et *Béatrice et Bénédict*. Visionnaire, excellent écrivain et critique musical, auteur de très nombreuses œuvres, pour orchestre, pour chant, pour piano, Berlioz a été la figure musicale française magistrale romantique de ce milieu du XIX^e siècle. J'ai toujours le souvenir précis de ce film sorti en 1942, au titre évocateur, *La symphonie fantastique*, où le comédien Jean-Louis Barrault incarnait avec réalisme le personnage de Berlioz dans le déroulement de sa vie.



Hector Berlioz (1803-1869)



Jacques Offenbach (1819-1880)

• Jacques Offenbach (1819-1880) - 200^{ème} anniversaire de sa naissance

De son vrai nom Jacob Eberst, d'origine juive, voilà un cadeau qui nous vient d'Allemagne. C'est à Cologne qu'il apprend le

violoncelle dont il devient très jeune un virtuose. Ce premier aspect de sa personnalité m'est sympathique car j'ai joué en concert avec un ami ses *Duos pour*

deux violoncelles Op50-52-54

qu'il a écrits quand il avait

17 ans et qui ne sont

pas faciles, je peux

en témoigner ! En

1834 il est admis au

conservatoire de Paris

et pratique le violoncelle

dans divers théâtres. En 1844, il

se convertit au catholicisme et épouse une française avec laquelle il aura cinq

enfants, et il obtient la nationalité française en

1860. Après quelques tentatives de faire jouer

ses premières opérettes, sans succès, il obtient

la gestion d'un théâtre qu'il appelle *Bouffes-*

Parisiens. C'est là que ses nouvelles opérettes

commencent à obtenir le succès avec des

librettistes de qualité, Jules Moinaux, Henri

Crémieux, Ludovic Halévy et Michel Carré.

Ce ne sont encore que des pièces en un acte :

Les deux aveugles, *Élodie*, *Ba-ta-clan*, *La*

rose de Saint-Flour. Il entreprend ensuite des

pièces de plus grande envergure, c'est alors

La belle Hélène, puis *La vie parisienne*,

La grande duchesse de Gerolstein,

La Périochole. Offenbach devient la

grande vedette adulée du second

empire. Mais la guerre, en 1870,

interrompt cette activité

d'opérettes à grand suc-

cès. En 1872, devenu

directeur du théâtre La

Gaîté Lyrique, il y monte

Madame Favart et *La fille du*

tambour-major. Ces productions

fastueuses ne sont pas rentables,

il doit alors abandonner et vendre

ses biens. Après une tournée aux

États-Unis il revient et reprend un vieux

projet fantastique, *Les contes d'Hoffman*, sur

un livret des frères Barbier. Très malade, il

ne pourra pas terminer cet opéra ultime,

c'est Ernest Guiraud qui s'en charge, et

la « première » est une consécration pos-

thume d'Offenbach. On retient d'Offenbach

ses multiples inventions mélodiques, son

humour, son goût du pastiche de génie,

qualités jamais démodées. Il a aussi écrit

un ballet peu connu, *Papillon*.



Ruggiero Leoncavallo (1857-1919)

• Ruggiero Leoncavallo (1857-1919) - 100^{ème} anniversaire de son décès

C'est un représentant éminent du « vérisme », courant littéraire et musical des années 1890-1900 en Italie.

Il rédigeait lui-même le livret de

ses opéras, inspirés de modèles

littéraires comme *Chatterton* ou

Cesare Borgia. Mais c'est surtout

Paillasse qui lui apporta le succès

et la gloire universelle. Encore de

nos jours, *Paillasse*, en un seul acte, est

représenté dans toutes les salles lyriques

du monde, accompagné de l'œuvre d'un autre

« vériste » : *Mascagni, Cavaleria rusticana*,

opéra également en un seul acte. Des mélo-

dies superbes dans une atmosphère tragique.

Je retiens aussi de Leoncavallo une très jolie

mélodie, *Mattinata* (aubade) dont il a écrit les

paroles et la musique. Il existe une traduction

en français de ce morceau que chantait ma

mère dans ma tendre enfance : « *L'aurore a*

mis sa robe blanche... », et que j'ai joué plus

tard au violoncelle.

• Albert Roussel (1869-1937) - 150^{ème} anniversaire de sa naissance

Issu d'une famille d'industriels de Tour-

coing, il a appris le piano très jeune et n'a

cessé de s'intéresser à la musique alors qu'il

préparait l'École navale. Officier de marine,

une mission en Extrême-Orient lui inspira

des idées de composition musicale. Il

démissionne très tôt de la marine et

se fixe à Paris pour étudier l'harmonie,

l'orgue, la fugue et le contre-

point, sous la direction de Vincent

d'Indy. Ses premières œuvres sont

bien accueillies, notamment un

ballet : *Le festin de l'araignée*, en

1913. Après la guerre, de nom-

breuses compositions sont présentées

avec succès, pour piano, en musique de

chambre (3 trios, 1 quatuor), 4 symphonies,

de la musique vocale sur des poèmes de

Ronsard et Henri de Régnier, et surtout des

ballets : *Bacchus et Ariane*, et *Aeneas*. La

musique de Roussel se classe difficilement

dans un renouveau de classicisme influencé

par l'impressionnisme, le tout imprégné de

sensualité et de mobilité.



Albert Roussel (1869-1937)



ESSILOR

SEEING THE WORLD BETTER

OUR MISSION IS
**LEO'S
VISION.**
IT'S EVERYONE'S
VISION.

WITH THE RIGHT VISION,
WE CAN CHANGE THE WORLD.

This drives our mission: to improve lives by improving sight. It also fuels our ambition to eradicate poor vision everywhere and promotes social and economic development.