



# SYNTHÈSE DE L'ACTIVITÉ DE RECHERCHE DE L'EPF

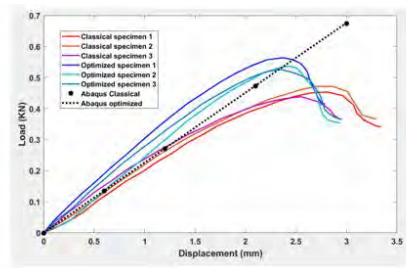
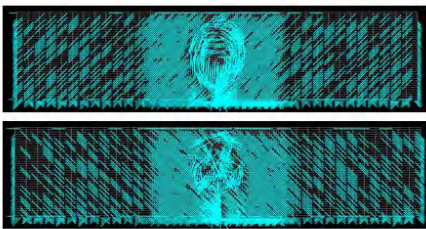
ANNÉE 2019/2020

## Recherche et Innovation – EPF Ecole d'Ingénieurs

Pour développer ses activités de recherche, l'EPF s'est associée à plusieurs laboratoires académiques disciplinaires de renom franciliens et provinciaux. Les Enseignants Chercheurs de l'EPF sont membres de ces laboratoires et assurent, au sein de l'EPF et en étroite collaboration avec des partenaires industriels, le transfert technologique et l'innovation qui résultent de ces travaux. Les actions de recherche s'articulent autour de deux axes : axe 1 Mécanique et Matériaux, axe 2 Energie et Environnement.

### Recherche et Innovation – Campus de Troyes

**Matériaux avancés par Fabrication Additive (axe 1)** Les activités de recherche concernent essentiellement l'amélioration des propriétés mécaniques et la fonctionnalisation des matériaux avancés en adoptant une approche intégrée de l'ingénierie numérique jusqu'au post-traitement de pièces complexes issues de la fabrication additive. Le développement de la plateforme de Fabrication Additive se poursuit avec le renforcement de l'expertise de l'EPF autour d'imprimantes 3D Metal X de Markforged, le retour d'expérience de Julien Gardan qui a bénéficié d'un séjour à l'international aux Etats-Unis à Clarkson University durant 6 mois, la thèse de Marouene Zouaoui co-dirigée au LAMIS par Julien Gardan, Pascal Lafon, Carl Labergere ainsi que Ali Makke et Naman Recho sur le comportement de matériaux pré-structurés par fabrication additive et l'engagement de nouvelles actions autour de l'impression de matériaux fonctionnels auxétiques polymères et métalliques ainsi que l'impression de matériaux biosourcés grâce à l'implication d'Omar Saifouni qui projette de renforcer l'équipe de l'EPF Troyes et du LASMIS dès 2021. La soutenance de la thèse au LASMIS de Quentin Portella co-dirigée par Mahdi Chemkhi et Delphine Reira est prévue pour fin mars 2021 sur l'amélioration des propriétés mécaniques d'un acier 316L obtenu par fabrication additive au travers de post-traitements thermomécaniques. De nouvelles activités ont été engagées par Abdelatif Merabtine, Julien Gardan, Mahdi Chemkhi, Vincent Basecq et Julien Kauffmann sur le stockage d'énergie par impression 3D de mousses bi-matières au sein de structures complexes alliant du cuivre et des matériaux à changement de phase. Ces travaux sont menés en étroite collaboration avec les équipes de l'EPF des campus de Sceaux et Montpellier, que ce soit pour la caractérisation des matériaux à des échelles nano-scopiques en collaboration avec Joseph Mara-Djouda au LMT ou avec Cédric Zaccardi qui contribue au développement d'un ensemble de production par fabrication additive de pièces métalliques qui équipera la future plateforme mécanique ERMESS de Cachan et est actuellement évaluée sur le campus de Sceaux. Par ailleurs, Mahdi Chemkhi a été invité à une conférence en tant que « keynote speaker » lors du workshop international en Australie à l'Université de Sydney (11-12 février 2019) et il a été également désigné président « chairman » de la session intitulée « Treatment Techniques and Characterization ». Il a également été sollicité pour présider en qualité de « chairman » la session « fabrication additive métallique » lors de la conférence internationale CIRP CMS 2019, Ljubljana, Slovenia (12-14 juin 2019).

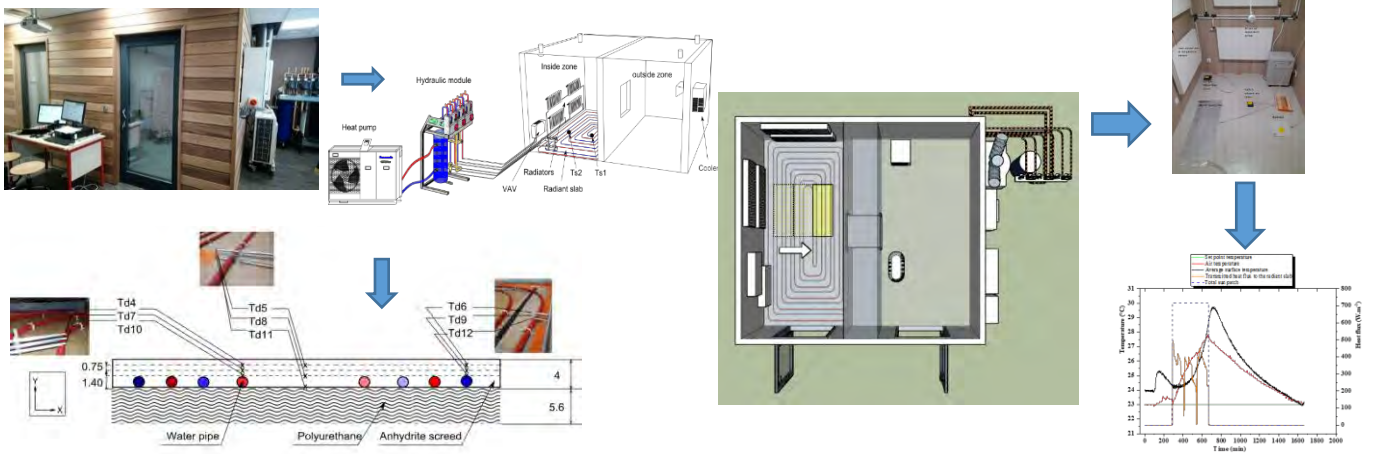


Modèle comportemental par la méthode des éléments finis d'un matériau pré-structuré par fabrication additive. Zouaoui et al. Procedia Structural Integrity, 2020.

**Efficacité énergétique des bâtiments (axe 2)** Cette thématique englobe les actions de recherche menées par 5 enseignants chercheurs, un ingénieur de recherche et 4 doctorants. Des moyens d'essai expérimentaux et un démonstrateur à échelle réelle instrumentés permettent l'étude de la performance énergétique des bâtiments et des systèmes de chauffage, de ventilation et de conditionnement d'air, tout en prenant en compte le confort thermique des occupants. Parmi les projets développés en 2019-2020, il y a le projet PLANCHAU, abordant la problématique de l'inertie thermique dans les planchers chauffants hydrauliques à chape d'anhydrite. Trois approches ont été déployées expérimentale, semi-analytique et numérique pour étudier leur comportement thermique soumis ou non à une tâche solaire. Les résultats obtenus dans le cadre des thèses de Beji et Li, co-encadrées par Abdelatif Merabtine, ont fait l'objet de plusieurs articles de revue et de conférences internationales.

Le projet COMFORT, porté par Vincent Basecq et Julien Kauffmann, a comme objectif d'évaluer le ressenti thermique humain vis-à-vis de son environnement. Le mannequin thermique NEWTON instrumenté est utilisé pour compléter les méthodes de modélisation déployées. Les études en cours concernent l'industrie textile, l'automobile et le bâtiment. Dans le même ordre d'idée, le projet CONFVUL, développé dans le cadre de la thèse de Al Akili avec l'UTT et l'URCA co-encadrée par Abdelatif Merabtine, aborde la problématique du confort thermique des personnes vulnérables où des approches quantitatives et qualitatives sont déployées.





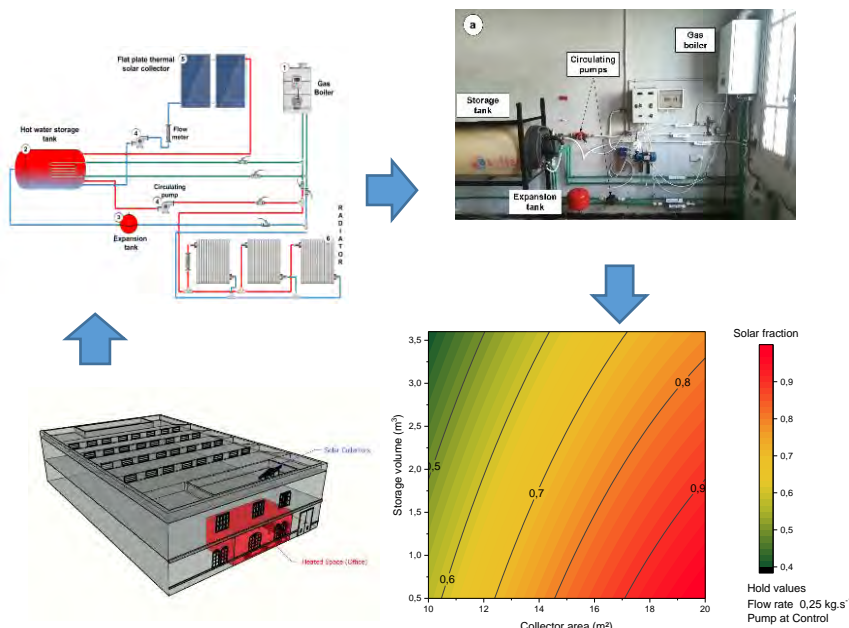
(Merabtine et al. 2019 ; Beji et al. 2020, Li et al. 2020)

Depuis 2019, différentes prises de contact sont à noter avec des entreprises du textiles (comme Petit Bateau et Decathlon), de l'automobile (Kubota) ainsi qu'un encadrement de stage avec Campa. Le mannequin a servi en 2019 à des travaux d'investigation des performances thermiques de textiles nouveaux de Petit Bateau. Par ailleurs une conférence scientifique pluridisciplinaire intitulée « Human Comfort in Building » (<https://hcb2021.wordpress.com/>) a été organisée depuis 2019, initialement prévue au premier semestre de 2020, puis au second semestre de 2020, elle a finalement été reportée en janvier 2021 sous forme de visioconférence. L'essentiel de l'organisation a été réalisé en 2019 et 2020. La réussite (très satisfaisante) de cette conférence sera présentée dans le rapport d'activité de 2021.



Mannequin Newton.

L'un des événements majeurs en 2020 est le financement d'une cellule externe qui sera installée sur le campus de Troyes afin d'étudier le comportement du bâtiment à échelle réelle. Ce projet a été financé par le CPER 2015-2020 ainsi que par le FEDER et l'EPF. Enfin, le projet EEB, développé dans le cadre de la thèse de Sarmouk, co-encadrée par Abdelatif Merabtine, adresse les problématiques du chauffage solaire hybride en contexte méditerranéen. Les approches d'optimisation multi-objectives, basées sur un modèle numérique validé par les expériences, y sont développées en utilisant une méthode de plans d'expérience.



(Sarmouk et al. 2020)

## Recherche et Innovation – Campus de Montpellier

**Energétique, environnement et gestion des ressources** Sur l'année 2019-2020, la nouvelle collaboration avec l'IMT Mines Alès, sur le thème de la gestion durable des ressources métalliques, se concrétise par l'accueil d'un étudiant EPF en stage pour 5 mois, dans le cadre du projet PCBets porté par Julia Mouton qui cible l'étude de polymères chargés en solution et leurs interactions avec les métaux (cuivre et/ou cadmium) pour le traitement des déchets ultimes. La nouvelle collaboration avec le laboratoire Euromouv de Montpellier se concrétise par l'obtention du financement de deux stagiaires EPF dans le cadre du projet HUT : l'habitat intelligent du futur, porté par Antoine Gademer. Enfin, l'année 2019-2020 voit se terminer le projet BAP lié à l'étude de l'énergie récupérable en environnement indoor pour l'alimentation de capteurs et objets nomades, qui va donner lieu à la soutenance de la première thèse co-encadrée par l'EPF et l'IES.



Parallèlement aux projets, en 2019-2020 les plateformes EnergyLab et Mater sont sorties de terre sur le campus de Montpellier. La plateforme EnergyLab accueillera des moyens d'essai et d'observation dédié à l'efficacité énergétique dans les bâtiments tertiaires alors que Mater sera dédiée à la mise au point de technologies innovantes pour la durabilité des ressources (dépollution, fabrication de cellules solaires, ...).

Plusieurs communications dans des conférences nationales ou internationales ont été effectuées : par exemple Nicolas Camara et son doctorant Bastien Politi ainsi que Christophe Rodier et son doctorant Sébastien Peillon ont présenté leurs travaux à l'European Photovoltaics Energy Conference and Exhibition de Septembre 2019.

**Droit de la recherche** – La période 2019-2020 a été marquée par l'exploitation scientifique des résultats des enquêtes et journées d'études réalisées en 2017 et 2018 dans le cadre du programme COMMONDATA. L'action de recherche a été tournée vers l'approfondissement des pistes ouvertes les années précédentes et la préparation de publications scientifiques. A ce titre, un premier résultat est à mentionner qui prend la forme d'une analyse de l'articulation des exigences de libre circulation des données publiques de recherche avec les exigences – largement contraires – de secret de ces données qu'imposent les conditions d'accès à la protection par brevet.

Au plan institutionnel, un résultat tout particulièrement remarquable et engageant pour l'avenir doit être mis en avant : le passage du programme COMMONDATA au statut de plateforme de la MSHSud. D'un programme de recherche financé pour une durée limitée, COMMONDATA est devenu désormais une branche permanente de la MSHSud. Les recherches conduites par les membres de COMMONDATA s'inscrivent désormais dans un temps long et bénéficient d'un soutien durable.

Au plan de l'encadrement doctoral, 2019 a été marquée par l'inscription en thèse de Joey Bou Nafeh. Ce travail de doctorat est engagé sous l'intitulé suivant : « Les enjeux juridiques de l'anonymisation des données personnelles ».

## Recherche et Innovation – Campus de Sceaux

**Traitement des eaux** Une chaire industrielle a été signée entre l'EPF et Odyssee Environnement en décembre 2019. Une collaboration scientifique est en train de se mettre en place avec l'ESITC, école partenaire. Les recherches avec notre partenaire académique (laboratoire LISE) continuent sur le traitement des eaux et notamment sur la recherche de nouveaux inhibiteurs verts d'entartrage (Hélène Cheap Charpentier et Tony Lourteau).

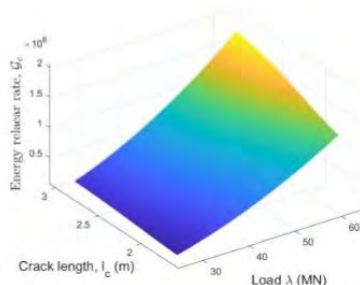
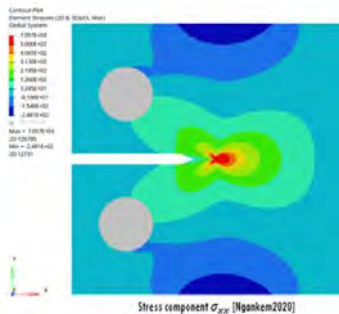
Deux nouveaux partenaires académiques nous ont rejoints sur cette thématique. L'INRAE de Rennes spécialisé dans l'étude du lait notamment, nous permet d'étudier des bactéries du lait à visée anti-tartre, avec des résultats prometteurs et novateurs (plusieurs campagnes d'études depuis 2019). Le SONAS (Campus du végétal – Angers), quant à lui, nous permet de déterminer les familles de plantes ayant des caractéristiques chimiques très intéressantes dans la problématique des dépôts minéraux.



Pour la plateforme GREEN, l'EPF a répondu à un appel à projet SESAME Ile-de-France (mai 2020) pour lequel l'école a reçu un avis favorable pour le financement d'une boucle d'essai dans le traitement des eaux. Les principaux axes de recherche et d'application de la boucle d'essai concerneront le traitement des eaux : entartrage et corrosion, détection et traitement des polluants et des biofilms.

Concernant le traitement des eaux, la thèse de Manel Gritli a été soutenue en novembre 2019 (Olivier Horner et Hélène Cheap-Charpentier). Cette thèse est issue d'une cotutelle entre l'EPF, notre partenaire académique (le laboratoire LISE à Jussieu) et l'Université de Carthage (Tunisie).

**Jumeaux numériques et structures intelligentes** Sur l'année 2019-2020, le projet NeuroStruct, piloté par Cédric Zaccardi, qui vise à déployer des prototypes de systèmes actifs, en s'appuyant notamment sur des jumeaux numériques, s'est traduit par la réalisation d'un stage de M2 à l'EPF Danièle Ngankem encadré par Cédric Zaccardi et deux stages au LMT, Afsal Pulikkathodi en M2 et Marine Jacquemin en M1 co-encadrés par Elisabeth Lacazedieu et Ludovic Chamoin. Un partenariat avec ALTAIR est également envisagé pour fédérer l'ensemble des développements visant à utiliser l'IA pour l'enrichissement de modèles mécaniques. Parallèlement, la définition de la future plateforme ERMESS de Cachan a été finalisée : elle accueillera des moyens d'essai et d'observation dédiés aux structures intelligentes et à la durabilité des matériaux ; elle a fait l'objet d'une demande de financement sous forme d'un PIA Sésame déposé auprès de la région Ile de France. L'aspect multi-échelle est abordé par le biais des travaux menés par Joseph Marae-Djouda au LMT (Marae Djouda et al. 2020).



Propagation de fissure en milieu hétérogène simulée en temps réel à l'aide d'un modèle réduit par PGD sous Matlab. Pulikkathodi et al., WCCM Conference, 2020.

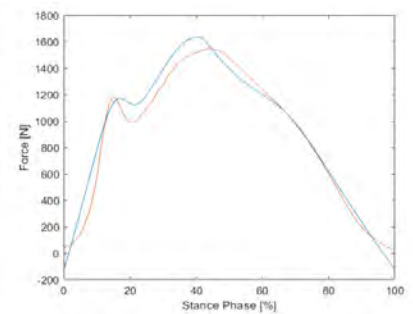
De nouveaux stages sont prévus à partir de 2021 ainsi qu'une thèse en collaboration avec ALTAIR et PSA sous la direction d'Elisabeth Lacazedieu et Ludovic Chamoin du LMT.

**Biomécanique et prise en compte du facteur humain** Sur le thème de la course à pied, les techniques de mesures basées sur l'utilisation de capteurs embarqués ont été évaluées et des modèles d'estimation des forces de réaction du sol ont pu être développés par Thomas Provoit. La sensibilité des signaux mesurés face à l'état de fatigue du coureur a pu être quantifiée et caractérisée sous la forme de grandeurs physiques mesurables. Une étude de sensibilité et une validation du modèle de force de réaction du sol en course à pied, face au paramétrage de l'activité de course en termes de vitesse, pente, technique notamment, est attendue et sera complétée par une étude expérimentale en 2021. A noter que l'évaluation de nouvelles techniques de mesures *in situ* sera favorisée par la mise en place de la future plateforme ERMESS qui inclura notamment une salle d'analyse du mouvement.



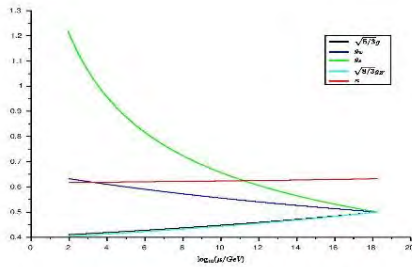
Future halle du mouvement de la plateforme ERMESS de Cachan : espace Biomécanique. PIA ERMESS. En biomécanique, le matériel (caméra, systèmes opto-électroniques...) a été acheté afin d'équiper une salle pour l'analyse du mouvement, en vu du déménagement dans les futurs locaux de Cachan. Ce matériel sera à la disposition de la recherche et de la pédagogie.

Etude de la course à pied. Comparaison de données de mesures issues de plateformes de forces et d'accéléromètres par méthodes directes et inverses. Provoit et al., ISEA 2020, SB 2020, Revue Sports Biomechanics 2021. Maxime Bourgain et Thomas Provoit ont participé au congrès International Sport Engineering Association (ISEA) Juin 2020 où les thématiques de recherche concernant le golf (Maxime Bourgain) et la course à pied (Thomas Provoit) ont été présentées.



En parallèle, les travaux menés en partenariat par Thomas Provoit Maxime Bourgain, l'IBHGC et l'Escuela Colombiana de Ingeniería avec Julio Garavito sur la caractérisation d'exosquelettes et le développement de modèles biomécaniques issus des mesures associées ont fait l'objet de plusieurs communications (WeRob 2020). Deux thèses sont actuellement co-encadrées par Maxime Bourgain respectivement sur l'évolution du système musculo-squelettique du joueur élite au fil de la pratique sportive intensive : anatomie morphologique et fonctionnelle (thèse de Grégoire Prum) et sur l'impact d'un échauffement perceptivo-cognitif sur les paramètres biomécaniques et neurologiques de la performance : prévention et prise en charge des commotions cérébrales (thèse d'Antoine Kneblewski).

**Physique fondamentale** Suite aux travaux menés en 2019 par Besnard et al. (J. Math. Phys.) en collaboration avec Brouder de l'UPMC, l'existence d'un nouveau boson de jauge, noté Z', et celle d'un nouveau boson "de Higgs" ont été étudiées. L'intérêt de la géométrie non-commutative est que tous les couplages peuvent se calculer à l'aide d'une seule variable. Cependant ces prédictions sont valables uniquement à l'énergie d'unification et doivent être ramenées à l'énergie électrofaible via le flot de renormalisation.



Flot des couplages de jauge. Besnard et al., J. Math. Phys. 2019. Besnard, Noncommutative geometry, background independence and B-L extension of the Standard Model, PoS(CORFU2019) 216, 2020. Besnard, Extensions of the noncommutative Standard Model and the weak order one condition, 2011, 02708, 2020.

La masse du quark top et celle du boson de Higgs peuvent être calculées à l'aide d'un seul paramètre, ce qui fournit un test pour le modèle. Le résultat est qu'il existe un intervalle de valeurs du paramètre qui donne une erreur relative inférieure à 3 % pour les deux masses, ce qui est remarquable étant données les approximations nécessaires au calcul. Plusieurs collaborations internationales sont envisagées sur ce thème, notamment avec l'Université de Cracovie.

**Economie circulaire** Depuis septembre 2020, une étude est conduite par Joël Ntsondé avec le CGS de Mines ParisTech sur l'émergence de nouveaux modèles économiques allant vers une meilleure réparabilité et durabilité des produits. Cette étude s'inscrit dans les travaux de la chaire Mines urbaines qui est co-piloté par l'éco-organisme Eco-systèmes et la fondation ParisTech. La réparabilité et la durabilité sont des objectifs actuels de la loi « anti-gaspillage pour une économie circulaire » votée en janvier 2020. Plusieurs mesures ont été introduites : instaurer un indice de réparabilité pour différents équipements électriques et électroniques (lave-linges, smartphones, ordinateurs...) ; encourager la mise à disposition de pièces détachées issues de l'économie circulaire ; constituer un fond de réparation géré par les éco-organismes ; différencier les éco-contributions des produits en fonction de leur réparabilité ; étendre la garantie pour les produits réparés pendant la phase de garantie ; introduire un taux de TVA réduit pour les activités circulaires. Ces différentes mesures visent en premier lieu à inciter les consommateurs à réparer leurs appareils plutôt que l'achat de produits neufs et de choisir des produits réparables ; développer et soutenir les activités de réparation ; inciter les producteurs à concevoir les produits en vue de la réparabilité. Certains producteurs et distributeurs, se sont d'ores et déjà engagés pour étendre et développer leur offre de services de réparation. A partir d'une enquête de terrain réalisée auprès de différents acteurs de ce secteur (producteurs, distributeurs, associations de consommateurs, réparateurs, acteurs publics, etc.), ce projet de recherche consiste donc à étudier les écosystèmes et les *business models* de la réparabilité et de la durabilité dans le domaine des produits électriques et électroniques afin d'objectiver les transformations de ce secteur en émergence. L'étude cible en priorité les produits visés par la loi économie circulaire où les enjeux de réparation et de réparabilité sont les plus aigus (gros électroménager, petit électroménager, PC portables, téléphones portables, Téléviseurs).