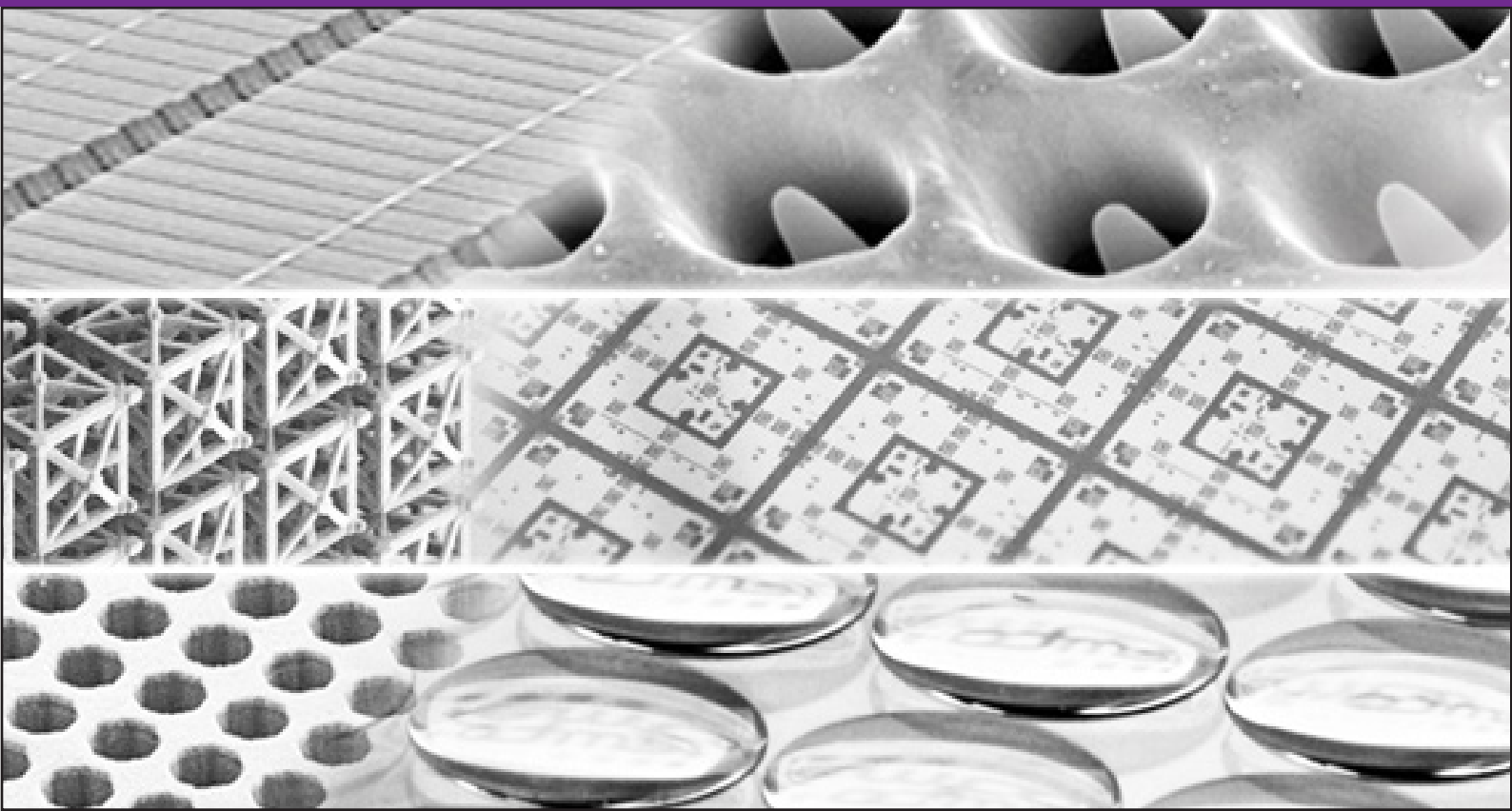


France 2030

Feuille de route technologique



UN LARGE SPECTRE D'EXPERTISES SCIENTIFIQUES

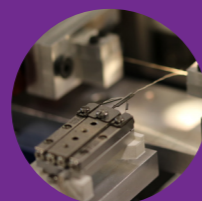
L'institut FEMTO-ST est structuré en 7 départements de recherche et en deux axes transverses RECITS et Biom'@x qui renforcent l'organisation des activités pluridisciplinaires de recherche. Nous encourageons également les activités de recherche multidisciplinaires en collaboration entre les départements et même au-delà de l'institut avec d'autres laboratoires du site.

MÉCANIQUE APPLIQUÉE (DMA)



- Matériaux, surfaces, procédés, structures
- Micromécanique, microfabrication
- Fonctionnalisation, structures intelligentes

ROBOTIQUE & AUTOMATIQUE (AS2M)



- Microrobotique, mécatronique
- Automatique
- Pronostic & gestion de la santé des systèmes (PHM)

TEMPS & FRÉQUENCE (TF)



- Oscillateurs/ résonateurs
- Métrologie Temps & Fréquence
- Systèmes et capteurs micro-ondes

INFORMATIQUE (DISC)



- Informatique parallèle et distribuée
- Méthodes formelles pour le génie logiciel
- Calcul haute performance
- Microsystèmes intelligents distribués

ÉNERGIE



- Hydrogène-énergie
- Convertisseurs électromagnétiques
- Machines thermiques

OPTIQUE



- Photonique non linéaire
- Photonique quantique
- Nano-photonique
- Systèmes optoélectroniques complexes & IA

MICRO-NANOSCIENCES & SYSTÈMES (MN2S)



- Microsystèmes opto-électro-mécaniques
- Phononique et microscopie
- Nanosciences et matériaux nanostructurés
- Bio-microsystèmes

AXES TRANSVERSES



Biom'@x
Vers une médecine translationnelle technologique



RECITS
• Recherche et études sur les changements industrielles, technologiques et sociétales

INSTITUT FEMTO-ST



Laboratoire public associé au CNRS développant des recherches dans le domaine de la Physique Appliquée et des Sciences pour l'Ingénieur. L'institut FEMTO-ST est le plus grand laboratoire de Bourgogne-Franche-Comté, un des plus grands laboratoires du CNRS au niveau national, avec environ 750 membres dont 260 chercheurs & enseignants-chercheurs, 220 doctorants. Ses domaines scientifiques très vastes couvrent l'automatique, l'informatique, l'énergie, la mécanique appliquée, les matériaux, les micro-nano-sciences et systèmes, l'optique et la métrologie du temps et des fréquences. L'institut FEMTO-ST maîtrise de nombreuses expertises technologiques au travers de 10 plateformes, dont une centrale de technologie en micro-nano-fabrication, MIMENTO, qui appartient avec 4 autres centrales en France (Paris, Toulouse, Lille, Grenoble) au réseau national CNRS RENATECH.

- **CLIPP** (Protéomique pour l'innovation clinique)
- **FLUIDIX** (Métrologie d'écoulements et d'échanges thermiques)
- **SMARTLIGHT** (Photonique pour l'IA et IA pour la photonique)
- **MIFHySTO** (Micro-fabrication mécanique, micro-usinage, injection de poudre, fabrication additive métallique, traitement de surface, polymères chargés, caractérisation de matériaux par tomographie)
- **MIMENTO** (Micro-nano-fabrication pour la mécanique, l'électronique, la thermique et l'optique)
- **CMNR** (Centre de Micro-Nano-Robotique)
- **Oscillator-IMP** (Métrologie de l'instabilité ultime des oscillateurs)
- **Hydrogène-Énergie**
- **SURFACE** (Développement et caractérisation des couches minces)
- **AMETISTE** (Caractérisation mécanique des matériaux, surfaces et structures)
- **Mésocentre de Franche-Comté** (simulations numériques et calculs haute performance)

Cet environnement scientifique pluridisciplinaire et enrichi de nombreux moyens de haute technologie, est une source de projets de recherche DeepTech interdisciplinaires originaux à très fort potentiel d'innovations, qui peuvent être déployés dans un environnement unique. Les nombreux résultats de recherche de FEMTO-ST, au premier plan mondial pour certains (microrobotique, matière programmable, piles à combustible, systèmes vibro-acoustiques, matériaux biosourcés, optique ultra-rapide, métamatériaux, intégration matériaux électroactives /LiNbO₃, dispositifs intégrés à ondes acoustiques, phononique, micro-horloge atomique), sont aussi la source d'entrée d'un dispositif unique de prolongement de laboratoire en direction de l'innovation industrielle : un centre de développement et de montée en maturité technologique, FEMTO Engineering, abrité par une fondation partenariale FC'INNOV.

www.femto-st.fr

Ce document a été construit dans le cadre d'une réflexion stratégique de l'institut FEMTO-ST, dans le but de définir un positionnement scientifique de l'unité en phase avec les initiatives déclinées en 2022 par le programme France 2030, en faveur de la recherche académique et de l'innovation.

FEMTO ENGINEERING



FEMTO Engineering est le centre de développement et de montée en maturité technologique de FEMTO-ST. Abrité par une fondation partenariale FC'INNOV fondée par l'université de Franche-Comté en 2013, cet outil original et quasi unique en France a été pensé et déployé par FEMTO-ST afin de trouver une solution à sa volonté d'adresser la question du prolongement de ses résultats de recherche académiques en direction du monde industriel.

La mission de FEMTO Engineering est ainsi de dé-risquer des technologies issues de FEMTO-ST dans une perspective d'innovation industrielle, la phase la plus risquée de l'ascension de l'échelle de la maturité technologique (TRL, technology readiness level). Cette étape critique est parfois appelée la traversée du désert de la mort d'une innovation technologique. Le statut juridique de fondation partenariale de droit privé à but non lucratif permet de recruter à FEMTO Engineering des ingénieurs-chercheurs avec une agilité indispensable à cette mission. Ces ingénieurs-chercheurs sont la plupart du temps formés par un doctorat à FEMTO-ST en y ayant acquis des compétences et savoir-faire propres au laboratoire, et ils sont ensuite aussi formés au sein de FEMTO Engineering à l'ingénierie d'affaire. Cette compétence complémentaire est essentielle afin d'être capable de comprendre au plus juste les contraintes et attentes du monde industriel (marché, coûts, fiabilité, avantage concurrentiel, etc.), et elle n'est généralement pas présente naturellement chez un chercheur ou une chercheuse du milieu académique.

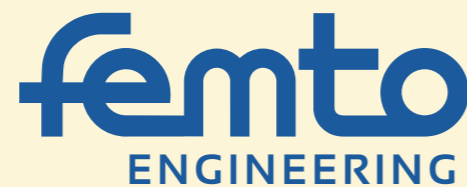
Les personnels de FEMTO Engineering sont ainsi capables de construire un pont permettant de traverser le fossé conceptuel, technologique et culturel entre les mondes académiques et industriels, grâce la maîtrise de cette double sensibilité souvent cruciale dans la montée en maturité technologique d'un résultat académique. Ces personnels sont par ailleurs immergés au sein même de FEMTO-ST, environnés par les chercheurs qui ont produit les résultats académiques à maturer, et en ayant accès aux mêmes plateformes technologiques qui ont été utilisées pour la preuve de concept des démonstrateurs académiques. Cet environnement

optimal est une des clés des nombreux succès déjà obtenus (pour n'en citer que quelques uns : maturation d'un groupe électrogène à pile à combustible ayant donné naissance à la spin-off H2SYS ; mise sur le marché à TRL9 d'un oscillateur cryogénique ultra-stable, record mondial de stabilité de fréquence commercialisé aux USA, GB, Italie et Chine ; nombreuses technologies de salle blanche en micro-nano-fabrication pour des applications quantiques ; découpe laser-fs de verres et cristaux ultra-rapide et sur de grandes épaisseurs grâce à des principes originaux de mise en forme de faisceaux laser ; simulation et optimisation multi-physique de conception de moteurs électriques).

La gouvernance de la structure est assurée par un conseil d'administration mixte entre membres des laboratoires impliqués, représentants politiques des membres fondateurs, et acteurs industriels (PDG de start-up innovantes) et de l'écosystème d'innovation local (Région Bourgogne-Franche-Comté, bpi).

Avec bientôt 10 ans d'expérience dans un domaine d'activité très original, la fondation est aujourd'hui un instrument de prolongement de laboratoire particulièrement efficace comme en attestent d'une part ses résultats technologiques, mais aussi son niveau d'activité (2M€ de chiffre d'affaire annuel, pour une vingtaine de personnes). Sa renommée grandissante lui a permis en 2016 d'être invitée à entrer dans le Carnot Telecom Société Numérique. Grâce à une gestion inscrite dans un cercle vertueux, les résultats dégagés par les prestations industrielles permettent de compléter des financements publics qui ciblent le développement des technologies les moins matures. Enfin, signe de son ouverture et de son intérêt général au-delà des activités de FEMTO-ST, un second centre de développement technologique a été ouvert en 2021 dans le domaine des biothérapies, pour lequel le laboratoire Inserm RIGHT et sa tutelle EFS (Etablissement Français du Sang) jouent le rôle de FEMTO-ST en matière de pilotage stratégique des activités. Le succès de la fondation est conforté par l'entrée de 2 nouveaux membres fondateurs en 2022 : L'EFS et SUPMICROTECH-ENSMM.

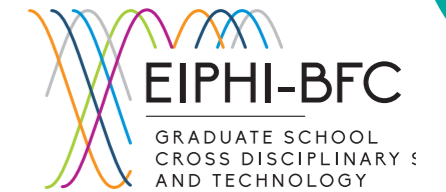
www.femto-engineering.fr



FEMTO Engineering est labellisé Carnot Institut (Carnot Telecom & Société Numérique) pour la qualité de ses partenariats d'ingénierie avec des industriels.

GRADUATE SCHOOL EIPHI

ECOLE UNIVERSITAIRE DE RECHERCHE, PIA3



EIPHI Graduate School propose un cursus formation-recherche de niveau master et doctorat à forte ambition internationale, adossée à 7 laboratoires et à l'axe scientifique du site universitaire de Bourgogne-Franche-Comté : « Matériaux avancés, ondes et systèmes intelligents ».

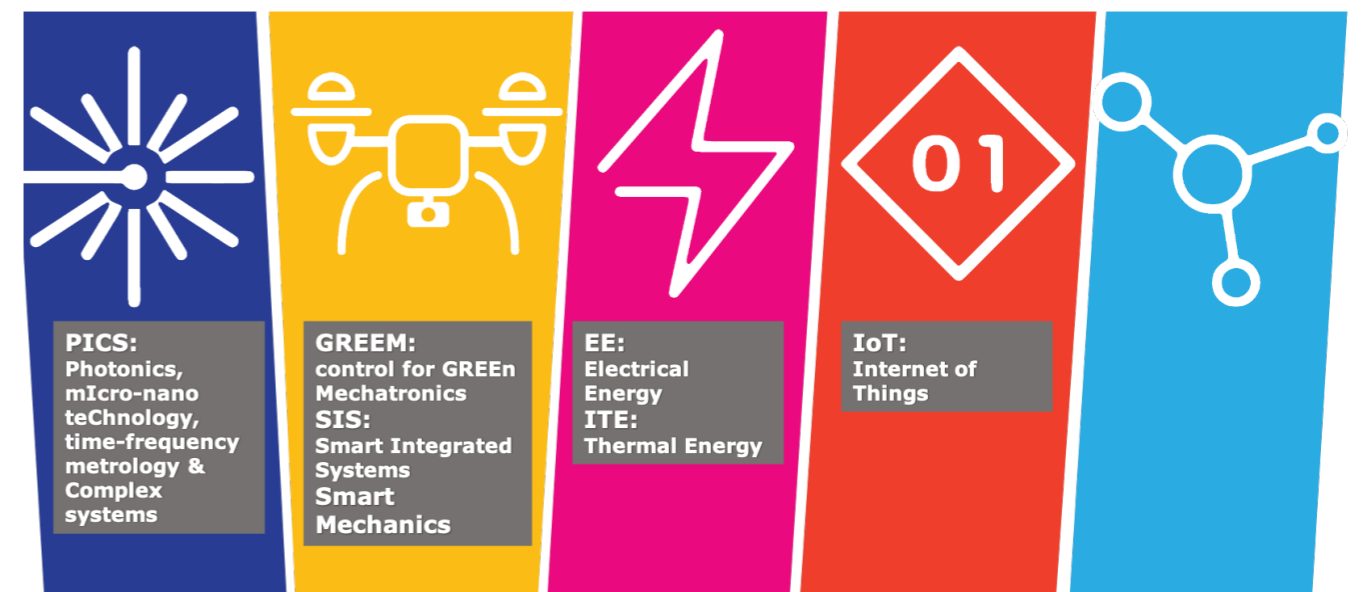
EIPHI Graduate School s'appuie sur 2 écoles doctorales : Carnot Pasteur (CP) et Sciences pour l'Ingénieur et microtechniques (SPIM). Elle propose 16 masters enseignés en langue anglaise (dont 7 en appui sur les forces et activités de l'unité - figure ci-contre) couvrant 5 domaines de recherche :

- **Physique, Mathématiques et Applications**
- **Systèmes et structures intelligents**
- **Énergie**
- **Sciences des matériaux**
- **Informatique**

L'appel PIA3 EUR 2017 a été positionné dans le contexte du possible prolongement des Labex, en s'appuyant sur la structuration et la trajectoire scientifiques réussies de ces derniers pour y adjoindre une dimension forte de formation à et par la recherche. En tant qu'unité coordinatrice du Labex ACTION (PIA1, « Smart Systems Integrated into Matter »), il est apparu essentiel à la direction de l'unité de déposer un dossier d'EUR afin de capitaliser sur l'organisation et la structuration impulsée par le Labex, en ayant pour objectif de compléter et de monter en gamme le lien Science-Société-Innovation grâce à la dimension Formation. Le projet d'EUR EIPHI s'est construit avec les 3 laboratoires FEMTO-ST, ICB et IMB (EIPHI

: Engineering and Innovation through Physical sciences, High-technologies and cross-disciplinary research). Ce sont ainsi 13,7M€ qui ont été obtenus pour coordonner et construire une trajectoire structurante à rayonnement international autour du lien Science-Société-Innovation.

Au-delà de la volonté de construire un lien étroit Recherche-Formation-Innovation dans un contexte intrinsèquement international, interdisciplinaire et à fort impact sociétal, l'ambition était également de contribuer à une structuration du site. En 2021, 4 autres laboratoires dont 3 UMR ont ainsi rejoint le consortium EIPHI (ICMUB, UTINAM, LmB, ImViA), rassemblant plus de 80% des effectifs C-EC en sciences dures du territoire. Le projet de Graduate School, sa démarche structurante au plan régional, son ambition d'impact sociétal, sa volonté d'implication dans l'innovation, ainsi que sa labellisation par le PIA, ont permis de convaincre la Région BFC de soutenir le projet avec un cofinancement conséquent (effet de levier x4 sur le programme Recherche de EIPHI, soit 9 M€ depuis 2019). EIPHI a séduit aussi la Région par son organisation et ses instances de construction et de sélection des projets de recherche dans un cadre clair et compatible avec le SRESRI (schéma régional de l'enseignement supérieur de la recherche et de l'innovation.)



Masters internationaux supportés par FEMTO-ST au sein de la Graduate School EIPHI

HYDROGÈNE ENERGIE

Les activités scientifiques sur l'hydrogène-énergie de FEMTO-ST ont une forte orientation vers les **activités "système"**, c'est-à-dire vers l'intégration des technologies pile à combustible dans des applications de mobilité et dans des applications stationnaires.

Les différents départements de FEMTO-ST impliqués dans la thématique hydrogène-énergie sont :

- **ENERGIE** (acteur historique) : systèmes piles à combustible, convertisseurs statiques, commande et gestion, actionneurs électriques, micro-réseaux électriques,
- **DMA** (acteur historique) : stockage comprimé, stockage solide, électrolyseurs,
- **AS2M** : pronostic, interdisciplinarité,
- **MN2S** : matériaux pour les piles et électrolyseurs haute température,
- **RECITS** : sciences humaines et sociales : histoire des techniques, enjeux économiques, appropriation par la société, interdisciplinarité SPI/SHS,
- **DISC** : applications aux centres de données,
- **OPTIQUE** : diffusion du concept de réservoir computing / ESN dans la gestion d'énergie.

Au total, environ **120 personnels** du laboratoire sont aujourd'hui impliqués sur les sujets hydrogène, dont environ 60 doctorants. En phase avec **l'émergence de la filière industrielle française**, de plus en plus de thèses CIFRE sont lancées dans le domaine, avec des grands acteurs industriels (Symbio, Michelin, ALSTOM, ENGIE, General Electric, ...) mais aussi avec des nouveaux entrants sur le marché (H2SYS, GAUSSIN, ...).



HYD-DRIVE : la première semi-remorque à propulsion à hydrogène au monde

AXES DE RECHERCHE

L'hydrogène est et sera utilisé dans de nombreuses applications stationnaires et mobiles. Aux côtés de l'efficacité énergétique et des coûts, la question de la durabilité des objets en conditions réelles d'usage est un sujet de recherche et de transfert fondamental. Un projet ciblé du **PEPR H2**, portés par FEMTO-ST concerne notamment **la durabilité des systèmes pile à hydrogène de type PEMFC**. D'autres activités incluent la réalisation de **piles à combustible et d'électrolyseurs tout solide** à haute température ou, le développement de cellules fonctionnant avec des **fluides issus de la biomasse**. Par ailleurs, l'hydrogène utilisé devant être produit à base d'énergies décarbonées, FEMTO-ST travaille sur l'intégration des **électrolyseurs d'eau** pour la production **d'hydrogène décarboné** à travers le seul Equipex+ DurabilitHy financé

dans le domaine. Il travaille également au remplacement des catalyseurs usuels par des matériaux plus abondants (projet IRT ELYSE). L'institut FEMTO-ST s'illustre également en travaillant sur les solutions de **stockage sous forme comprimée** et sous forme dite solide de l'hydrogène. Est visée ici l'étude mécanique des matériaux utilisés dans ces solutions de stockage et l'investigation des phénomènes induits par l'absorption et la désorption d'hydrogène. Dans le cas du stockage comprimé, le projet ciblé HyperStock du PEPR H2 porté par FEMTO-ST traite de la conception et des performances des **réservoirs hyperbares d'hydrogène**, permettant le développement d'architectures focalisées sur une réduction de l'impact carbone à destination de la mobilité lourde. Le stockage dit solide, sur base d'**hydrure métallique**, est également le sujet d'une collaboration étroite avec notre partenaire historique MAHYTEC.

Afin de **devenir un leader de l'hydrogène vert et des énergies renouvelables en 2030**, des écosystèmes à hydrogène doivent être créés. Ceci demande une **transformation multidimensionnelle et multiscalaire**, à la fois technique, économique et sociétale à différentes échelles, à la spatiale et temporelle. Celle-ci est étudiée et accompagnée par les enseignants-chercheurs en sciences humaines et sociales de l'équipe RECITS. En termes de transferts vers les entreprises, la business unit **FEMTO Engineering** de la Fondation FC'INNOV a enfin établi un pont efficace et solide entre le monde de la recherche et l'innovation industrielle.

DES IMPACTS AU DELA DE LA RECHERCHE ACADÉMIQUE

Afin d'accompagner au mieux le développement d'une économie de l'hydrogène en France, et ce dès l'horizon 2030, l'Institut FEMTO-ST s'est d'ores et déjà engagé, depuis plus de 20 ans dans différents domaines :

- Des projets de recherche internes ou collaboratifs multi-partenaires à l'échelle nationale et internationale,
- Le développement de moyens d'essais expérimentaux à l'échelle 1, uniques en Europe,
- Le développement de formations initiales, continues et "à la carte" dans le domaine de l'hydrogène-énergie (depuis 2014),
- Le développement de prestations de services, en lien avec l'UAR FCLAB et la fondation FC'Innov, à destination des laboratoires académiques, mais aussi et surtout des partenaires industriels,
- L'accompagnement à la mise en place d'un écosystème hydrogène à l'échelle régionale, avec une participation significative aux activités de médiation scientifique,
- La prise d'initiative dans le domaine de la création de valeur sur le territoire, avec différentes spin-offs créées) et des entreprises accompagnées dès l'origine sur les thématiques hydrogène.

START-UPS

Deux entreprises ont été fondées à partir des activités de recherche de FEMTO-ST :

- **MAHYTEC** aujourd'hui intégrée dans le groupe HENSOLDT NEXEYA FRANCE, a été créée en 2008 et compte aujourd'hui une vingtaine de salariés localisés à Dole. Elle conçoit, fabrique et commercialise en particulier des réservoirs de stockage solide et comprimé d'hydrogène.

www.mahytec.com



Stockage hydrogène solide

- **H2SYS** a été fondée en 2017 à Belfort pour donner suite à un projet de maturation technologique issu du savoir-faire du laboratoire autour des systèmes pile à combustible. Forte d'une équipe d'une trentaine de personnes, elle conçoit, fabrique et commercialise des groupes électrogènes à hydrogène allant jusqu'à 100 kW.

www.h2sys.fr

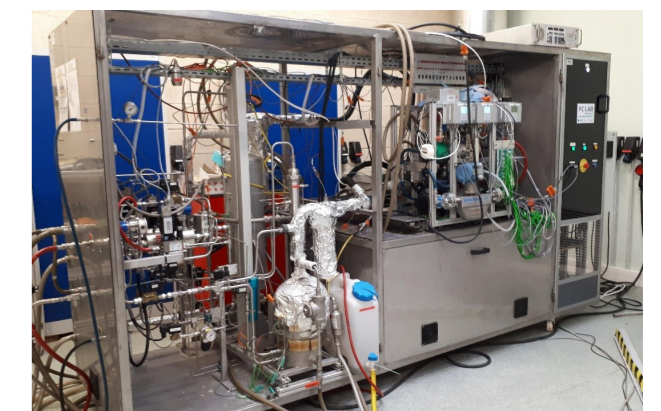


Groupe électrogène à hydrogène THYTAN de la société H2SYS

POUR ALLER PLUS LOIN

FEMTO-ST doit aujourd'hui franchir une nouvelle étape avec des besoins en termes de moyens matériels expérimentaux, de locaux pour les héberger, de moyens humains pour les opérer, et pour continuer à porter à l'échelle nationale une recherche d'excellence, au service du développement national. Pour ce faire, il est indispensable de :

- Trouver, au plus vite, **les moyens financiers nécessaires au bouclage de l'opération EcoCampus** à Belfort, qui doit permettre d'accueillir l'accroissement des moyens expérimentaux nécessaires au soutien d'une activité de recherche scientifique à forte composante technologique.
- Pouvoir **trouver les ressources humaines nécessaires** à l'expansion de notre activité expérimentale dans le domaine de l'hydrogène-énergie, tant d'un point de vue support financier de postes, que du point de vue de l'identification de personnes-ressources, dans un domaine déjà en tension à l'échelle nationale. Il faut aussi être en capacité de les fidéliser, une fois recrutées, au travers d'une juste et compétitive rétribution financière.
- Faciliter la création de spin-offs et de start-ups dans le domaine de l'hydrogène avec un engagement plus rapide et important des fonds d'investissement publics dans leur prise de participation, ou par **la création d'un fonds d'investissement dédié aux technologies émergentes de l'hydrogène**. Une autre action concerne la meilleure prise en compte des actions de transfert industriel, dans le déroulement de carrière des chercheurs et enseignants-chercheurs.



Bancs d'essai de piles à combustible PEM

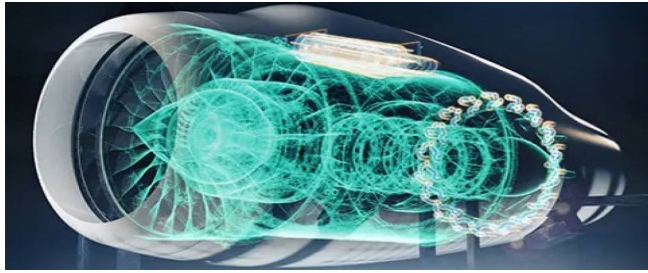


Photo : Rolls-Royce

RÉSERVOIRS

Dans l'aviation il faut distinguer les courts et moyens courriers des longs courriers. Pour ces derniers en dehors de l'allègement des structures et de l'utilisation de kérosène de synthèse qui contribueront à réduire l'émission de CO₂, il n'y aura pas de changement de paradigme. Pour les courts et les moyens courriers par contre, l'utilisation de carburant alternatif, voire de motorisation électrique pour les petits avions peut largement modifier le modèle. L'usage d'hydrogène apparaît aujourd'hui comme le meilleur choix. Le stockage est le problème principal pour les avions à réaction. Il faut en effet pour que la solution hydrogène soit réaliste proposer des stockages offrant une compacité et une gravimétrie compatibles avec les contraintes aéronautiques.

L'objectif est effectivement d'avoir aux environs de 2030, en France et plus particulièrement à Dole une société qui produira en série ses réservoirs.

Des activités dédiées au **stockage quasi-cryogénique pour les avions à réaction par combustion d'hydrogène** prennent également de l'ampleur avec l'utilisation de nouveaux matériaux. L'institut FEMTO-ST est très impliqué dans le développement de réservoirs innovants (projets ALLEGRO (ANR), CAVENDISH (EU - Clean Aviation)) en collaborations fortes avec les sociétés **MAHYTEC et DASSAULT AVIATION**. Le travail porte à la fois sur la structure et les matériaux de ces réservoirs (travail expérimental de modélisation et de simulation) et sur la simulation des phénomènes thermiques de remplissage et de vidage de ces réservoirs de façon à mieux appréhender l'alimentation en termes de pression et de température des réacteurs.



MÉCANOCHIMIE ET TRIBOLOGIE

L'institut FEMTO-ST contribue également à l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes par la réduction des frottements et le remplacement des produits pétro-sourcés à diverses étapes des chaînes de production. On contribue ainsi à la décarbonation des lubrifiants utilisés lors de l'usinage ou en service (développements avec AFULudine), au remplacement du collage par un soudage du bois. On développe également une approche innovante pour la maîtrise du frottement en utilisant l'environnement comme source continue d'agents lubrifiants.

START-UP

AFULudine (spin-off de l'institut FEMTO-ST, 2015) a l'ambition de proposer une alternative écologique dans l'univers des lubrifiants. Lubrifiants AFULudine, le choix d'un produit de haute performance pour s'inscrire dans une démarche écologique (innovation brevetée) :

- Sans huile ni additifs
- Neutre pour l'environnement
- Sans danger pour les usagers
- 100% français

<https://afuludine.com>



ENERGIE THERMIQUE

FEMTO-ST apporte une contribution majeure dans le domaine de la production d'énergie en **valorisant les rejets thermiques industriels** notamment ou en exploitant différentes sources de chaleur par le biais de moteurs à apport de chaleur externe de types :

- **Stirling**, dimensionnés pour des puissances variables allant de quelques mW (échelle micrométrique) à 10 kW (groupes électrogènes). Les applications concernent ainsi la cogénération, les motorisations hybrides.
- **Ericsson**, pour des puissances de 10 à 30 kW (la start-up ANANKE) a pour objectif principal de valoriser la chaleur fatale industrielle en vue de produire, soit de l'électricité, soit de l'air comprimé, dans le but d'une auto-consommation ou d'une réinjection sur le réseau électrique.

Dans ce cadre, FEMTO-ST entend amplifier ses activités autour de deux technologies complémentaires :

- **Technologie Stirling en mode générateur.** FEMTO-ST vise les applications de la production aussi bien de froid (réfrigération, chambre froide industrielle, projet NEIGE SATT Sayens), la climatisation (pompe à chaleur) que de chaleur pour l'habitat. A termes, la machine frigorifique (2 kW de froid) sera associée à des panneaux photovoltaïques ou à des éoliennes dont l'énergie électrique produite sera utilisée pour entraîner la machine Stirling. Deux brevets internationaux ont été déposés en passe d'être licenciés avec la société qui accompagnera le projet dans son développement technologique et économique.
- **Technologie magnéto-calorique** s'inscrit dans la lignée de travaux menés au sein des départements Energie, DMA et MN2S sur l'élaboration et la caractérisation de matériaux magnéto-caloriques et la conception optimale de différents dispositifs magnéto-caloriques pour des nouvelles générations de machines à froid et pompes à chaleur (projet I-Site Compomag BFC/industrie en collaboration avec deux industriels DELFINGEN et NEXTPAC) . Cette activité se poursuivra notamment sur le plan des matériaux composites pour la réalisation et l'optimisation de régénérateurs.

Le secteur industriel français rejette 51 TWh de chaleur fatale, l'équivalent de la production électrique de réacteurs 6 nucléaires.

START-UP

- **ANANKE** a été co-créée en 2017 par deux anciens étudiants et hébergée au sein du laboratoire, a développé un Moteur à Apport de Chaleur Externe (M.A.C.E) pour l'objectif de convertir la chaleur de faible qualité en énergie utile, d'offrir l'opportunité aux industriels de réaliser des gains financiers, et d'intégrer la transition énergétique à la stratégie industrielle.

<https://ananke.eu>



Ecocompresseur ANANKE

TECHNOLOGIES POUR LE SPATIAL

SYSTÈME GÉNÉRATEUR STIRLING POUR L'EXPLORATION SPATIALE

Le projet européen PULSAR (Euratom, 2022) vise à surmonter les obstacles au développement des systèmes d'alimentation en radio-isotopes (RPS), une technologie clé pour l'exploration de l'espace lointain, où le soleil ne peut fournir suffisamment d'énergie aux engins spatiaux. Les RPS sont la seule alternative existante aux cellules photovoltaïques pour la production d'énergie à long terme dans l'espace. Pour remédier aux lacunes technologiques et aux dépendances externes, PULSAR jettera les bases d'une production de bout en bout de Pu-238 en Europe et utilisera un moteur Stirling, développé par l'institut FEMTO-ST, pour concevoir un RPS dynamique européen qui sera jusqu'à cinq fois plus efficace que les systèmes actuels. Les deux résultats devraient atteindre un niveau de maturité technologique (TRL) de 4 d'ici la fin du projet en 2024. Le consortium PULSAR - acteurs européens clés des secteurs nucléaire et spatial : coordinateur Tractebel (conseil en ingénierie nucléaire, groupe ENGIE, Belgique), SCK CEN (Belgique), CEA, FEMTO-ST, Centre commun de recherche de la Commission européenne, Airbus Defence and Space, ArianeGroup), Incotec (transfert), ARTTIC.

<https://tractebel-engie.fr/fr/actualites/2022/tractebel-prend-la-tete-d-un-projet-de-recherche-europeen-sur-les-technologies-nucleaires-spatiales-avancees>



Représentation de la station lunaire. ©ESA

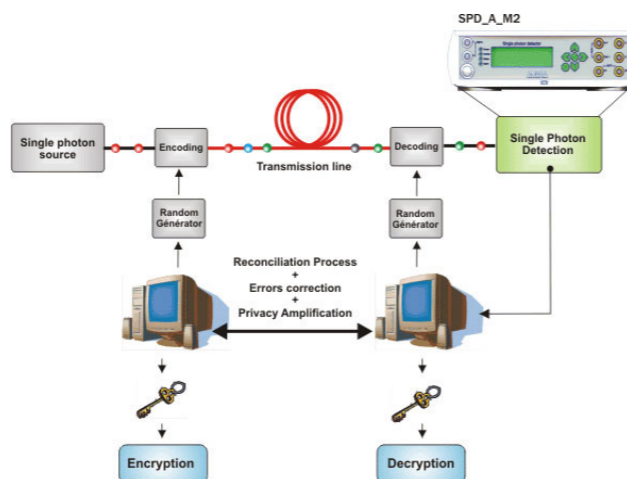


SÉCURITÉ DES INFORMATIONS

Parallèlement au développement de ces références de temps ultimes, briques de base de l'aventure spatiale, la sécurisation des informations est également un aspect clé de cette conquête spatiale. Dans ce contexte FEMTO-ST a créé une spin off, Aurea technology, en 2010, dont les activités sont centrées sur les détecteurs quantiques et les sources quantiques. À travers un laboratoire commun, à partir de fin 2022, nous créerons les nouvelles stratégies et moyens de communications quantiques avec les satellites. Plusieurs projets ont déjà été lancés depuis 2020 avec l'agence spatiale européenne (ESA).

START-UP

AUREA Technology (spin-off de l'institut FEMTO-ST, 2010) développe, fabrique et commercialise une nouvelle génération d'instruments de mesures optiques de hautes performances, compactes, rapides et faciles d'utilisations basés sur des technologies de comptage de photons capable de détecter de très bas niveaux de lumières. AUREA Technology propose des modules de comptage de photons dotés d'un très haut rendement quantique (Quantum Efficiency) pour un très faible bruit de détection (Dark Count Rate).

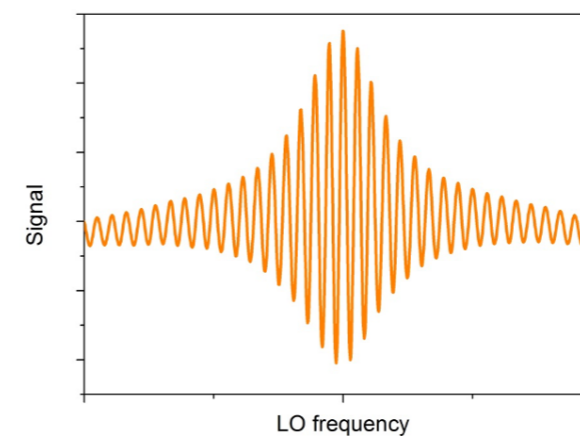


HORLOGES ATOMIQUES

FEMTO-ST est impliqué depuis début 2022, en collaboration avec Thales, Syrlinks et le laboratoire SYRTE, dans un projet collaboratif, nommé CHRONOS. Ce programme, soutenu par la DGA, vise au développement d'horloges quantiques compactes de nouvelle génération, dérivant de l'ordre de quelques nanosecondes par jour, pour applications embarquées.

https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/group/press_release/quantum-technologies-thales-and-syrlinks-develop-next-generation

FEMTO-ST est aussi impliqué depuis 2020 dans un projet prospectif, soutenu par le CNES et l'ESA, impliquant les industriels SODERN et Syrlinks, et le laboratoire SYRTE, évaluant la possibilité du développement d'une horloge atomique spatialisable pour les systèmes de navigation par satellite.



Signal d'horloge atomique

MATÉRIAUX ET TRIBOLOGIE POUR ENVIRONNEMENTS SPATIAUX

L'institut FEMTO-ST contribue fortement à l'innovation et à la fiabilisation des systèmes mécaniques fonctionnant en environnement spatial. Il développe notamment l'utilisation de nouveaux matériaux fonctionnels sur deux axes à la fois structurel et tribologique (frottement et usure) pour les mini/micro-mécanismes. Les projets récents montrent ainsi des matériaux présentant une tenue à la fatigue augmentée avec gain de 60% en limite d'endurance comparés aux matériaux conventionnels (projet AMA, avec le CNES et Vulkam). De nouvelles générations de matériaux lubrifiants ouvrent également de nouvelles perspectives offrant un comportement en frottement optimisé (frottement divisé par 2, projet Huiles Gélifiées piloté par le CNES), pour l'ensemble des phases de fonctionnement, de l'air ambiant à l'ultravide (nouveaux dépôt lubrifiant solide, en collaboration avec CNES, LaMCoS, LIST).



Tribomètre bille/disque pour étude tribologique sous environnement ultravide

TECHNOLOGIES POUR LA MÉDECINE DU FUTUR

Nos projets, que ce soit dans le domaine de la production de biomédicaments ou des dispositifs médicaux en général, démontrent une dynamique émergente très solide, en grande synergie avec notre écosystème local (CHU, EFS, PME, etc.), mais encore trop peu soutenue au niveau national. Le programme France 2030 se donne comme objectif de produire au moins 20 biomédicaments en France. Rien qu'à **Besançon aujourd'hui, nous produisons déjà 3 biomédicaments**. Notre ambition aujourd'hui est d'installer des moyens d'envergure pour pouvoir ancrer durablement toutes ces innovations dans le tissu industriel local.

Un certain nombre de chercheurs et chercheuses de FEMTO-ST sont issus du monde des sciences de l'ingénieur, mais exercent une activité de recherche et d'innovation très soutenue en lien avec sciences de la vie et la santé. Ce sont des activités que nous avons regroupées sous la forme d'un axe dit "transverse", Biom@x, car il recoupe de façon pluridisciplinaire tous les départements de l'institut en allant même au-delà de FEMTO-ST avec des laboratoires partenaires en Médecine & Pharmacie.. Ces activités, dont nous présentons ci-dessous un projet emblématique dans le domaine des biomédicaments (Mimédi, un projet FEDER/BPI de 15M€), ont la particularité d'être non seulement pluridisciplinaires, mais aussi d'une ambition très intégrative. La force d'un institut comme FEMTO-ST est en effet de pouvoir faire travailler ensemble, et en synergie avec les acteurs industriels locaux, des spécialistes d'un spectre très large de domaines de l'ingénierie, et de produire ainsi des innovations de rupture tout le long de la chaîne de production. Pour fabriquer un bio-médicament par exemple, il faut non seulement être capable de créer **les matériaux et les microsystèmes** nécessaires pour déplacer des cellules et les mettre en contact à grande échelle, mais aussi concevoir de **nouveaux capteurs** pour contrôler ces processus ou détecter d'éventuelles contaminations; des **outils de simulation et de modélisation** pour en qualifier le fonctionnement; des **systèmes robotisés** pour en industrialiser la mise en oeuvre; et, au final, des méthodes innovantes de fabrication de tous ces dispositifs pour permettre le passage à l'échelle et assurer la production de biomédicaments..

Nous développons notamment un axe de recherche portant sur les dispositifs de détection, d'analyse et de tri de cellules biologiques ayant vocation à fournir des outils pour le développement des médicaments de thérapies innovantes. Ces travaux sont réalisés en étroite collaboration avec l'EFS et différentes entreprises de la région (ILSA, SMALTIS, CellQuest, MedInnPharma, ...).

Nous travaillons sur trois aspects :

- le contrôle de cellules uniques,
- le développement de microdispositifs traitant des volumes importants,
- le développement d'outils pour le monitoring de la bioproduction.

En plus de la manipulation de ces biomédicaments cellulaires et leur qualification in line ou off line, l'étude de leur sécrétome peut révéler une quantité d'informations importantes sur leur état de viabilité et sur leur fonctionnalité. Enfin, et parallèlement aux biomédicaments cellulaires, les composés acellulaires, tels que les vésicules extracellulaires, produites par des cellules en culture ou en bioréacteur, constituent des biomédicaments au potentiel énorme et aux performances, en rendement et en efficacité, incroyables. Là aussi, l'enjeu est de qualifier ces biomédicaments vésiculaires, afin de corréliser fonctionnalité à dimensions mécaniques de ces nanoobjets (PEPR Bioproduction / EVs et Immunoscaling). Dans ce cadre, une initiative nationale de standardisation de la métrologie des paramètres biologiques et morphomécaniques de ces vésicules a été engagée courant 2022.

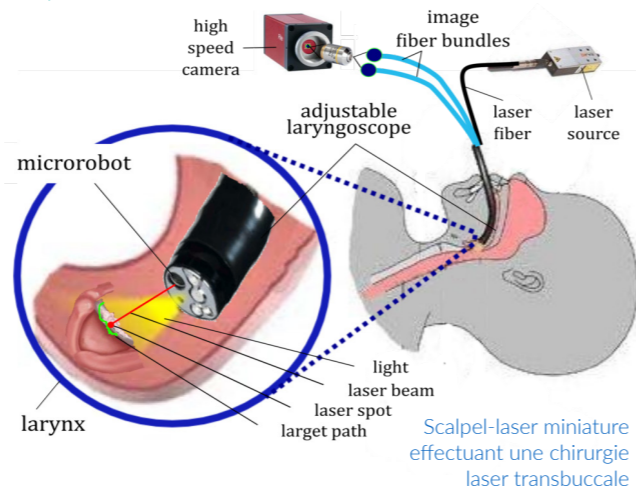
<https://projects.femto-st.fr/mimedi/>

IA pour l'imagerie médicale (voir le page 22)

START-UP

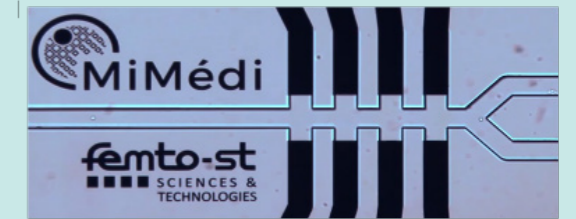
AMAROB Technologies (spin-off de l'institut FEMTO-ST, 2021) est une société émergente de dispositifs chirurgicaux avec une compétence de base en microrobotique. Mission : concevoir, fabriquer et commercialiser des dispositifs médicaux dédiés à la réalisation de chirurgies laser intracorporelles. Vision: devenir le leader mondial de la chirurgie laser intracorporelle.

<https://amarob.com>

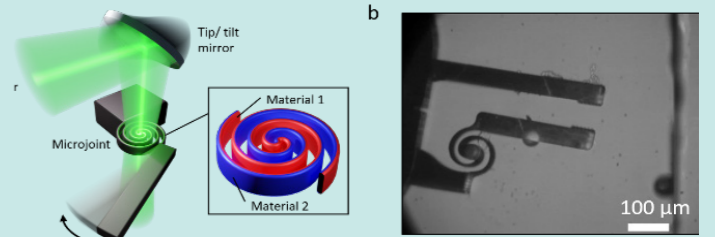


DISPOSITIFS POUR LE CONTRÔLE DE CELLULES UNIQUES

Concernant le contrôle de cellules uniques, l'originalité scientifique des travaux provient du fait que nous utilisons des lois de commande issues de la robotique qui permettent de contrôler chaque cellule individuellement, quelles que soient ses propriétés mécaniques ou électriques, en adaptant en temps réel les entrées de commande. Parmi les dispositifs développés, nous pouvons citer une micropince actionnée et déplacée en utilisant des champs de force générés à distance, qui a la capacité d'aller chercher une cellule unique dans un échantillon, mais aussi des dispositifs microfluidiques qui permettent de mettre en interaction deux cellules. Ils sont utilisés notamment pour mesurer l'avidité cellulaire entre un lymphocyte et une cellule tumorale, et isoler ainsi les lymphocytes capables de reconnaître et détruire les cellules tumorales qui pourront servir de base pour les biomédicaments de demain.



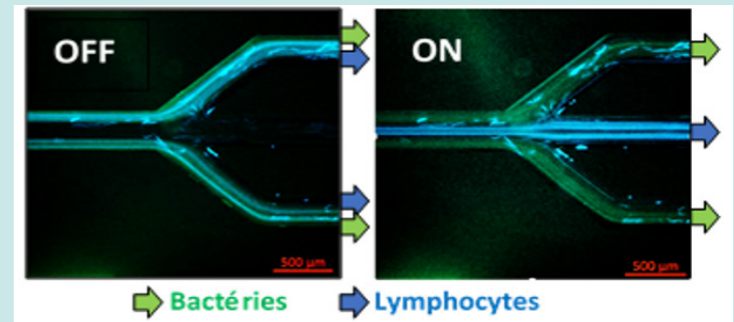
Dispositifs microfluidiques contrôlés par diélectrophorèse permettant la mise en interaction entre deux cellules (lymphocyte et cellule tumorale) ou le tri sélectif de cellules uniques.



Pince actionnée à distance à l'aide d'un laser qui contrôle l'ouverture et la fermeture des doigts.

MICRODISPOSITIFS TRAITANTS DES VOLUMES IMPORTANTS

Concernant le tri à plus gros volume, nous pouvons citer le développement d'un dispositif permettant grâce à un débit de 300μL/min de fluide biologique le tri/séparation d'éléments biologiques (exemple : 6000 lymphocytes/min). Il s'agit d'un dispositif d'acoustophorèse dont l'élément central est un dispositif micrométrique constitué de microcanaux fluidiques soumis à des ondes acoustiques excitées par un transducteur piézoélectrique qui est associé à son environnement microfluidique.



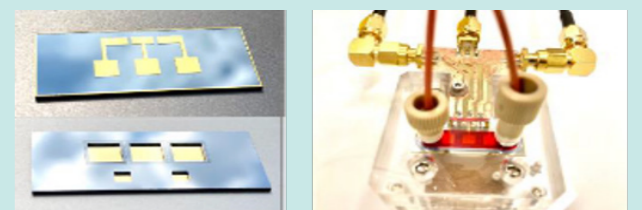
Exemple de séparation de bactéries/lymphocytes. Lorsque le système est activé, les cellules se dirigent vers le canal central.

MONITORING

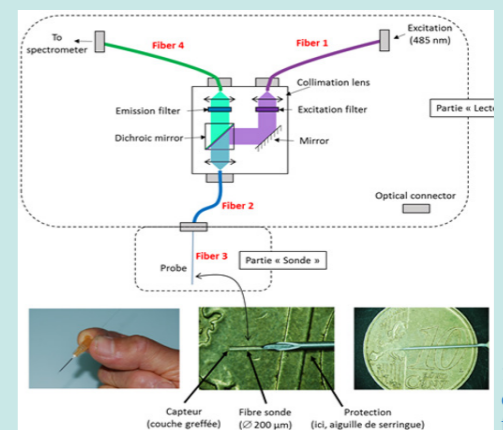
Parallèlement, sont aussi développés des microbiocapteurs permettant la détection multiplexée d'éléments biologiques d'intérêt ou la détection spécifique de contaminants (bactéries). Ces microcapteurs permettent aussi de mieux comprendre les mécanismes intervenant dans une maladie. La structure du microbiocapteur acoustique a fait l'objet d'un brevet international et le développement d'une plateforme de détection précoce de maladie par des biomarqueurs basée sur cette technologie est en cours de maturation (SATT SAYENS).

Pour le contrôle en-ligne de la contamination lors de la bioproduction des médicaments, nous avons mis en oeuvre une méthode de spectroscopie optique. Le capteur implantable dans le bioréacteur de production, permet un monitoring multifactoriel sans échantillonnage et donne le résultat du contrôle qualité en temps réel sans intervention humaine. Cette méthode permet, entre autres, de stopper la production dès qu'un problème apparaît lors de la phase d'expansion cellulaire sans attendre la fin de la production qui peut durer une dizaine de jours.

Le premier micro-pHmètre sans calibration a été mis au point en grâce au capteur original de fluorescence greffé à l'extrémité d'une fibre optique (brevet, projet maturation SATT SAYENS).

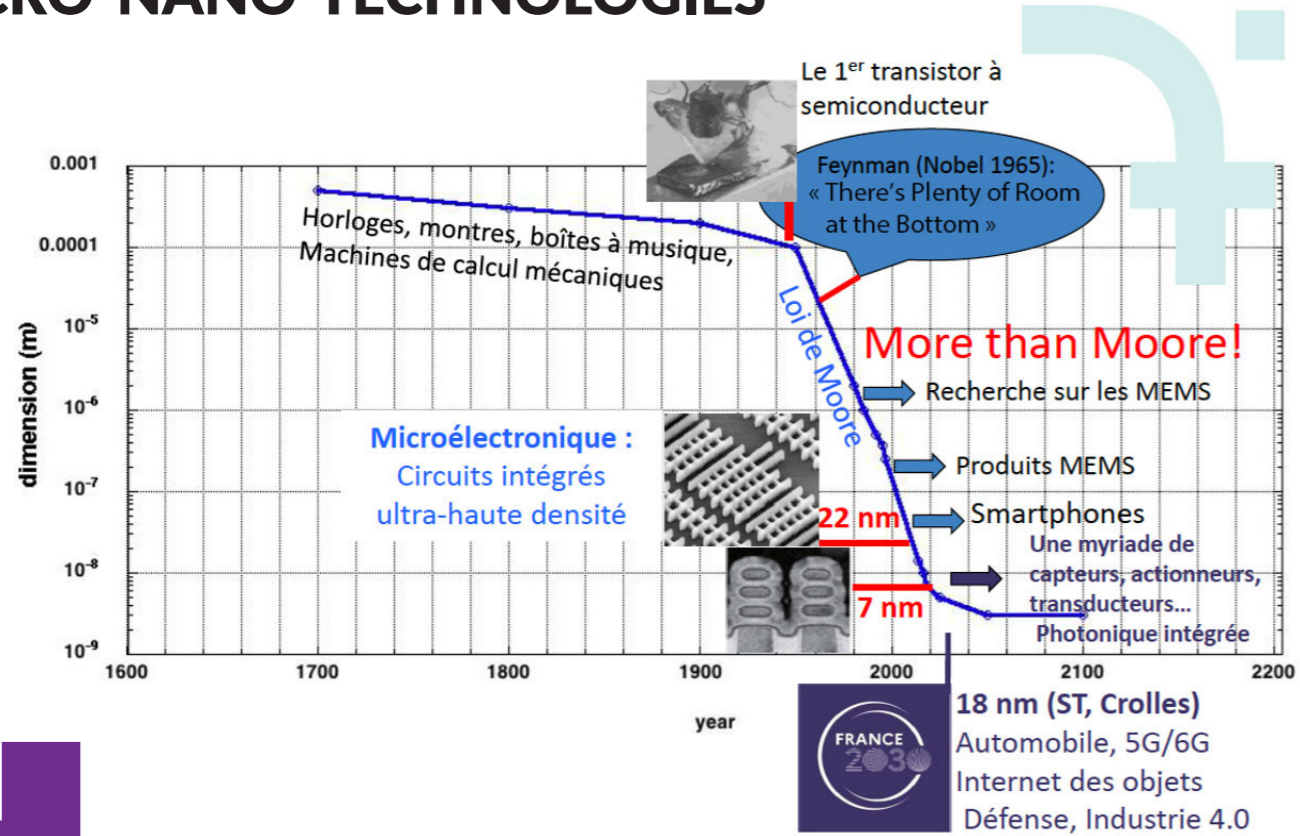


(gauche) Bio-micro-transducteur acoustique multiplexé à trois cellules en technologie silicium/quartz (droite) Microbiocapteur acoustique et canal microfluidique (passage de sang total) pour l'évaluation de l'hémostase primaire



1er micro-pHmètre sans calibration utilisant la fluorescence

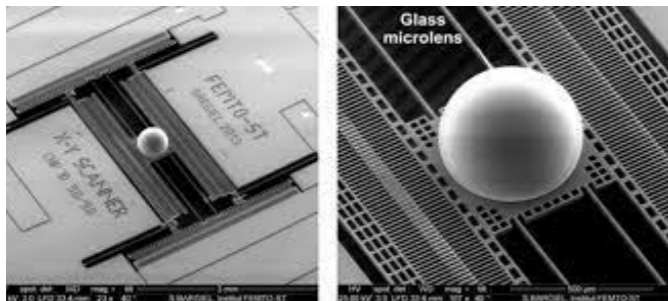
MICRO-NANO-TECHNOLOGIES



L'institut FEMTO-ST est également pionnier et internationalement reconnu dans le développement d'une recherche de pointe à la frontière entre les micro- et nanotechnologies. A cette échelle « mésoscopique », les technologies permettent l'accès à des effets physiques inaccessibles aux échelles supérieures, apportant des solutions hautement innovantes aux enjeux scientifiques et sociétaux actuels. Reconnu pour son savoir-faire et ses travaux de recherche basés sur des micro-nanotechnologies complémentaires à la microélectronique silicium, FEMTO-ST se positionne explicitement comme un contributeur au développement des matériaux électro-actifs, des microsystèmes électromécaniques (MEMS), des microsystèmes hybrides et des technologies hétérogènes, horloges atomiques (voir p. 11), composants nanophotoniques, usinage laser fs et la mise en forme ultime de fibres optiques. Ces micro-systèmes intégrés hybrides s'inscrivent dans la stratégie du "More Than Moore" destinée à maintenir la croissance de la microélectronique silicium, grâce à des fonctionnalités augmentées qui intéressent de

très nombreux secteurs applicatifs comme l'automobile, les communications, l'internet des objets, la défense, l'espace, et l'industrie 4.0:

- Technologies MEMS silicium et piézoélectriques hybrides avec une électronique adaptées (ASIC, microcontrôleurs, systèmes embarqués, connectés, calculateurs intégrés, edge computing, intelligence artificielle) pour des détecteurs ultrasonores (capteurs biomédicaux) ou d'impact (défense, contrôle corrosion nucléaire, contrôle non destructif), la récupération d'énergie (électronique ultra-basse consommation μW), les capteurs (environnement extrêmes de température ou de pression, pollution), la micro-acoustique et l'optique intégrée pour les télécommunications (5G-6G, etc.), en collaboration avec les sociétés françaises iXblue, Rakon, SOITEC et internationales WIKA (GE), Qualcomm (USA), STMicroelectronics (FR-IT) et les donneurs d'ordre DGA, CNES, CEA, ONERA, CNRS et réseau OSU-THETA, Institut Paul Emile Victor.
- Nouvelles approches technologiques pour la micro - et nano fabrication à haute vitesse (ERC PULSAR, projet H2020 kW-flexiburst) ; convertisseurs de fréquence pour les technologies quantiques ; nanofils de silices comme mémoires optiques et capteurs in-situ ; cristaux photoniques, métamatériaux et nanoantennes comme nouveaux composants optiques et capteurs in situ. Ces activités sont valorisées par des partenariats avec le Max Planck Institute, la DGA, les sociétés Thales, iXblue et SEDI-ATI et d'autres grands groupes industriels via Femto-Engineering.



Intégration monolithiques des microlentilles sur la membrane de l'actionneur MEMS

HIGHT-TECH FRANÇAISE

START-UPS

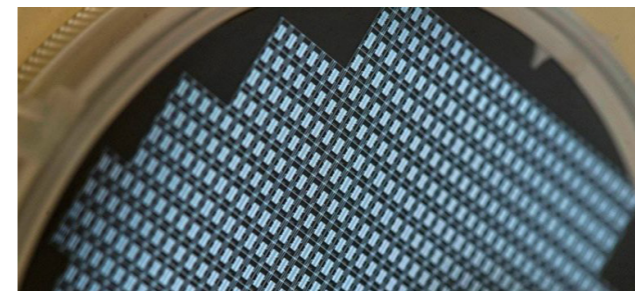
iXblue (ex Photline) (spin-off de l'institut FEMTO-ST, 2000), parmi les leaders mondiaux des solutions de modulations optiques, développe et fabrique des composants optiques intégrés et des produits pour des applications scientifiques et industrielles dans les secteurs de l'instrumentation, des télécommunications, de l'aéronautique, du spatial et de la défense.
www.ixblue.com



Modulateurs électro-optiques LiNbO₃ (iXblue)

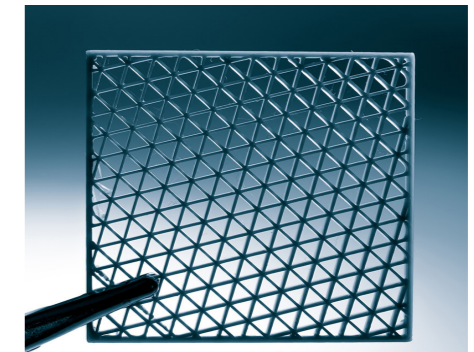
frecn|sys (groupe SOITEC) (spin-off de l'institut FEMTO-ST, 2013) conçoit, fabrique et commercialise des capteurs, filtres et des résonateurs radio-fréquences sur tranches de matériaux piézoélectriques. Les applications de ces composants passifs radiofréquences (RF) concernent la Mesure en environnements difficiles, la Défense, le Spatial et les Télécoms. Exploitant unique d'une ligne professionnelle de fabrication de composants SAW sous convention avec l'Université de Franche-Comté propriétaire des équipements, modèle d'exploitation unique en France, frecn|sys s'est révélée un vecteur crucial pour accélérer l'adoption des nouveaux substrats piézoélectriques-sur-isolant (POI) par les clients de SOITEC.

www.frecnsys.fr



Wafer MEMS (frecn|sys)

Metabsorber (spin-off de l'institut FEMTO-ST, 2019) transforme n'importe quel matériau en parfait absorbant sonore grâce à l'ingénierie des métamatériaux acoustique et sa capacité inédite à dépasser les limites des matériaux conventionnels, garantissant l'alliance du Style et de la Praticité. C'est l'art de structurer des matériaux pour façonner et améliorer la qualité de l'environnement sonore de notre quotidien
<https://metabsorber.com>

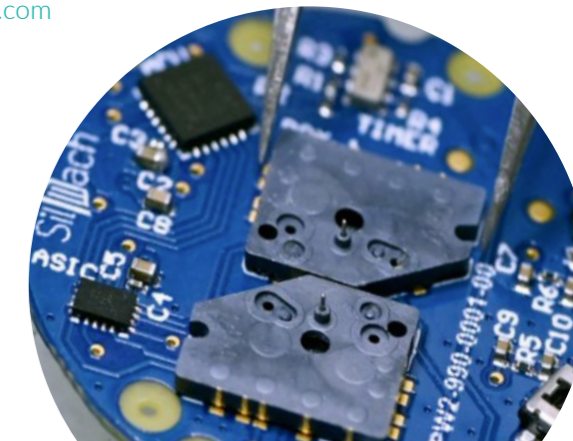


Matériau acoustique polymère (Metabsorber)

SilMach (spin-off de l'institut FEMTO-ST, 2003) pionnier de la micromécanique MEMS sur silicium, conçoit, fabrique et intègre des microsystèmes MEMS :

- Micromoteurs pour la motorisation de systèmes nomades et/ou connectés, notamment l'horlogerie au travers de sa coentreprise avec le groupe Timex
- Capteurs micromécaniques sans énergie pour le contrôle de santé des structures (surveillance du réseau de ponts en France, de trains d'atterrissage dans l'aéronautique...)
- Microsystèmes à façon pour des applications spécifiques dont un volant d'affaire significatif concerne des applications confidentielles

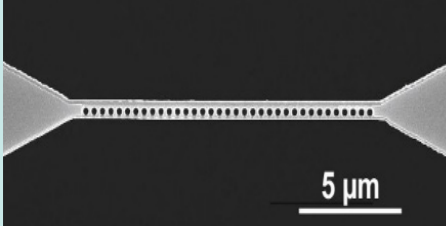
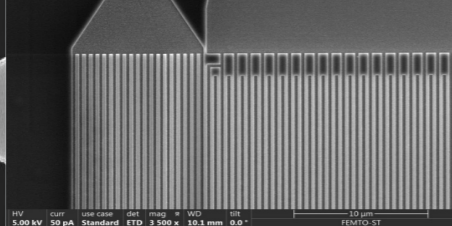

www.silmach.com



MICRO-NANO-TECHNOLOGIES

TECHNOLOGIES LiNbO₃ et LiTaO₃

LiNbO₃ et LiTaO₃, matériaux électro-actifs et nonlinéaires, sont largement utilisés pour le développement de diverses composants :

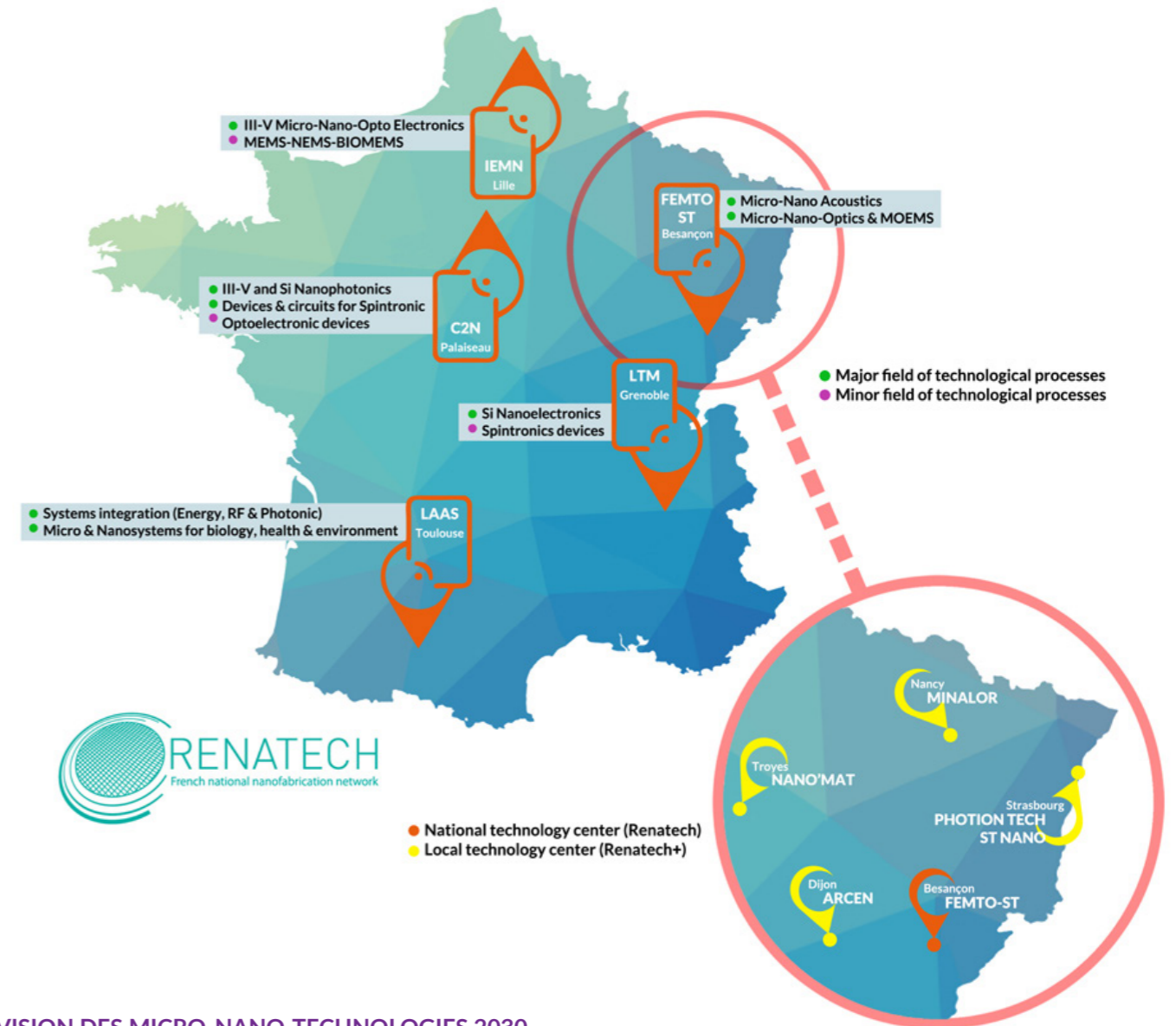
Photonique	Microacoustique et Phononique	Récupération d'énergie et actionnement
<ul style="list-style-type: none"> • Modulateurs électro-optiques ultracompacts (spin-off Photline) • Photonique intégrée, guides d'ondes • Conversion de fréquence • Sources accordables compactes 	<ul style="list-style-type: none"> • Filtres radiofréquences 5G/6G (spin-off freclnlys) • Capteurs biologiques et environnementaux • Composants phononiques (cavités, miroirs, fonctions logiques, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> • Microsources d'énergie pour des capteurs autonomes (IoT) • Actionneurs sans plomb • Composants ultrasons
 <p>Nanofil structuré</p>	 <p>Résonneur acoustique à 5-6 GHz</p>	 <p>Microrécupérateur d'énergie vibratoire</p>

Les couches minces de LiNbO₃ et LiTaO₃ sont urgemment demandées pour l'amélioration des performances des filtres rf pour les applications 5G/6G (V2X, etc.) et la photonique intégrée. FEMTO-ST est un des acteurs principaux académiques qui contribue à la création de filière nationale des couches minces LiNbO₃ et LiTaO₃ en collaboration avec le CEA LETI, **FEMTO Engineering** (technologie collage-polissage, épaisseurs de plusieurs microns) et les entreprises françaises **SOITEC** (technologie Smart-Cut, épaisseurs 0.3-1 microns) et **Annealsys** (croissance DLI-CVD, < 0.3 microns), qui développent les technologies de fabrication complémentaires et qui permettront d'avoir une offre unique sur une large gamme d'épaisseurs nécessaire pour répondre aux besoins des différentes applications. **Des développements coordonnés au niveau national permettraient de positionner la France au niveau mondial dans les technologies à base de LiNbO₃.**

Report/amincissement	Smart cut™	Epitaxie
 <p>Wafers 4-6" > 1 micron</p>	 <p>Wafers 4-6" 0.3 - 1 micron (± 3.5 %)</p>	 <p>Jusqu'aux wafers 12" < 500 nm (< 1 %)</p>

Epaisseur des couches

Technologies couches minces de LiNbO₃



VISION DES MICRO-NANO-TECHNOLOGIES 2030

La centrale de micro-nanotechnologie de FEMTO-ST a su accompagner depuis 2014 l'émergence d'un écosystème micro-nanotechnologique autour de Besançon en participant avec des spin-off de FEMTO-ST, les PME SilMach, Percipio Robotics, frec'n'sys (entreprise du groupe SOITEC) et iXblue Photonics (entreprise du groupe iXblue) à différents projets ambitieux de type FEDER (projets 3SMEMS, NEXTWATCH, MIMEDI, SMART-INN). Ce soutien continu a pris la forme de l'intégration d'une ligne de production pré-industrielle sur substrat 6" pour les MEMS hybrides au sein de la centrale académique, avec des applications dans les capteurs passifs et l'horlogerie de luxe, ainsi que la délégation d'exploitation à l'entreprise frec'n'sys d'un ensemble d'équipements de production, occupant environ ¼ de la surface de la salle blanche, pour des petites séries industrielles de composants sur matériaux piézoélectriques (quartz, LiNbO₃, LiTaO₃, etc.).

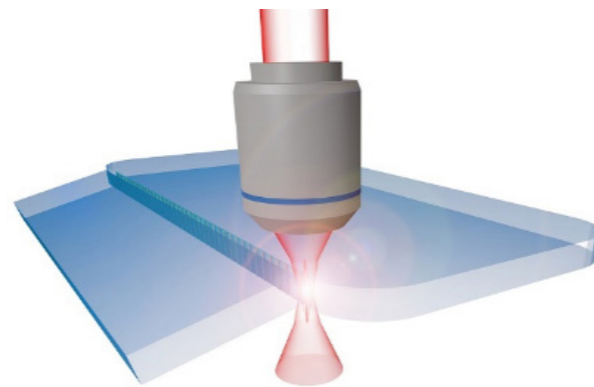
Ces collaborations nous poussent maintenant à une montée en puissance des capacités d'innovation et de développement en micro-nanotechnologies hybrides, par une montée en gamme de grade industriel de notre **centrale de technologie MIMENTO, référencée au niveau national "Micro-Nano-Optique/Acoustique, MOEMS, Microrobotique, LiNbO₃".** Cette ambition nécessite des investissements en organisation, en moyens et en personnels de notre salle blanche, de manière à pouvoir répondre avec une qualité et une réactivité quasi-industrielle lors de nombreux développements scientifiques et technologiques.

TECHNOLOGIES POUR LA PHOTONIQUE ET PAR LA PHOTONIQUE

L'Institut FEMTO-ST est également un acteur pionnier et internationalement reconnu dans le développement d'une recherche de pointe à la frontière entre la photonique et les micro -- et nanotechnologies. Les technologies permettent l'accès à des effets optiques inaccessibles aux échelles macroscopiques, apportant des solutions hautement innovantes aux enjeux scientifiques et sociétaux actuels. En contrepartie, la photonique apporte de nouveaux degrés de liberté technologiques, notamment via l'usinage laser à grande vitesse. La forte activité de recherche de l'Institut en photonique repose sur l'expertise technologique conjointe de la plateforme MIMENTO et de scientifiques ayant une solide expérience en nanophotonique, en science des matériaux, en usinage laser fs et dans la mise en forme ultime de fibres optiques. FEMTO-ST participe activement à l'essor photonique européen, en représentant la plateforme MOEMS dans les réseaux ACTPHAST4.0, ACTPHAST4R et PhotonHub, destinés à booster l'innovation photonique en Europe.

MICROFABRICATION PAR LASER

FEMTO-ST prépare, à travers plusieurs projets européens (ERC PULSAR, projet H2020 kW-flexiburst), de nouvelles approches technologiques pour la micro - et nano fabrication à haute vitesse, en particulier les technologies de découpe laser à haute vitesse de wafers et de perçage pour la microélectronique 3D. Ces activités sont basées sur une expertise reconnue internationalement en termes de mise en forme de faisceaux laser femtoseconde et de l'interaction laser-matière. L'interaction contrôlée permet de créer des nanocanaux via une seule impulsion laser, ouvrant la voie à la découpe rapide de verre fins jusqu'à des vitesses de 1 mètre par seconde. Ces activités sont valorisées par des partenariats avec de grands groupes français et européens à travers Femto-Engineering. Ces activités se déclinent également à travers l'EQUIPEX NanoFutur où est développée une nouvelle stratégie de croissance localisée de matériaux, contrôlée par irradiation laser femtoseconde.



Vue artistique d'un micro-usinage par laser

PHOTONIQUE INTÉGRÉE SUR LiNbO₃

La photonique intégrée sur LiNbO₃ s'appuie sur la maîtrise des propriétés électro-optiques et non-linéaires du LiNbO₃ et sur un savoir-faire technologique acquis de longue date. Les travaux récents tirent parti de structures constituées de films minces de LiNbO₃. Trois approches sont exploitées pour l'obtention de ces films. Les deux premières, entièrement mise en œuvre en interne dans l'Institut, sont des approches mécaniques basée sur le report-amincissement ou sur la découpe/polissage à la scie de précision. La troisième approche, réalisée par plusieurs sociétés qui commercialisent ces films minces. Ces trois voies complémentaires offrent une large gamme d'épaisseurs de film (500nm-20µm) qui est pleinement exploitée dans les dispositifs photoniques de l'Institut. L'élaboration de guides ayant des sections proches du µm² sont ciblés ce qui va permettre d'améliorer les performances des dispositifs. L'ambition à plus long terme est d'intégrer sur une même puce des fonctions actives et passives 3D exploitant ce confinement extrême, pour le traitement efficace de l'information quantique et pour les systèmes neuronaux photoniques.

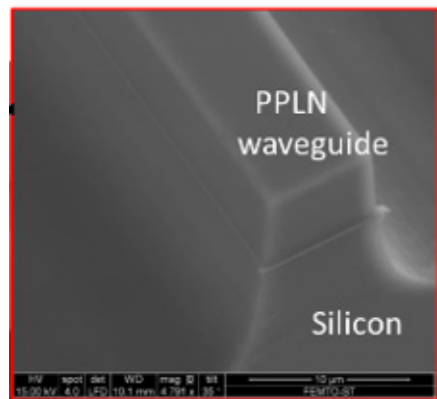
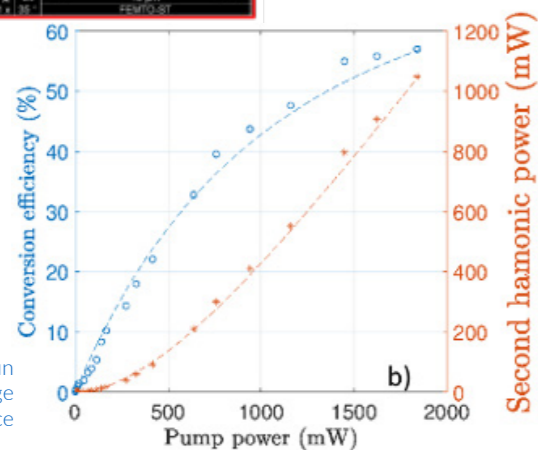


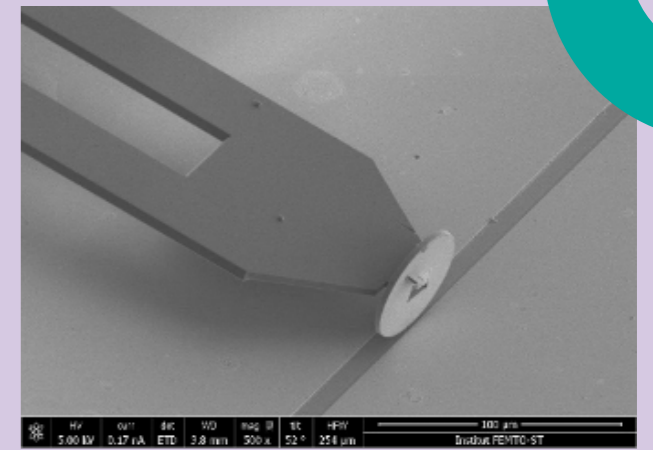
Image MEB de guide ruban PPLN



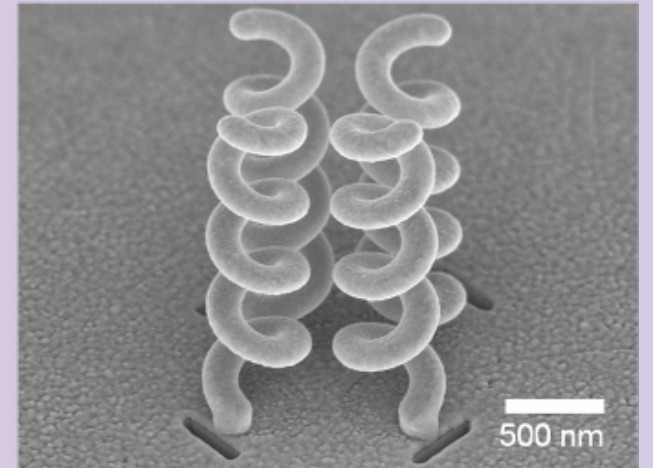
Performances d'un guide en doublage de fréquence

PHOTONIQUE 3D

Si les plateformes photoniques 2D ont désormais un niveau TRL industriel pour une large gamme de matériaux, il existe néanmoins des challenges à relever, essentiels pour des secteurs clés tels que l'intelligence artificielle ou le traitement de l'information quantique. A titre d'exemple, la réalisation de microprocesseurs denses, de réseaux neuronaux ou plus généralement de fonctions optiques complexes nécessite des densités d'intégration qui va largement au-delà de ce que peuvent proposer les circuits planaires désormais opérationnels. Dans ce contexte, l'Institut FEMTO-ST développe des approches complémentaires de développement photoniques 3D pour adresser ces challenges. Des architectures 3D complexes sont développées par le micro-assemblage hybride 3D de microcomposants électro-optiques en niobate de lithium, telles qu'un micro-disque nano-usiné et micromanipulé (Collaboration avec le département AS2M). A plus petite échelle, les technologies de micro-fabrication par photolithographie à deux photons (Nanoscribe) sont pleinement exploitées pour la réalisation de réseaux 3D denses de neurones photoniques. Enfin, l'Institut FEMTO-ST est pionnier dans le développement de nanostructures plasmoniques 3D obtenues par dépôt localisé assisté par faisceau d'ions focalisé (FIB). Ces nanostructures permettent d'envisager les premières architectures sublongueurs de sources à photons uniques directionnelles dont l'état de spin est contrôlé « à la carte ». Ces activités sont soutenues par l'EQUIPEX+ NanoFutur qui investit, par le biais de la plateforme MIMENTO, des moyens pour la réalisation de nouvelles sources à photons uniques.



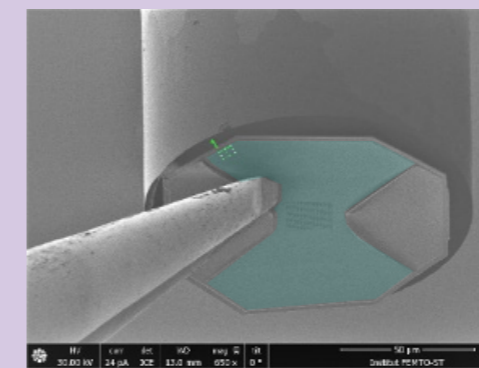
Microrésonateur assemblé verticalement sur un guide optique



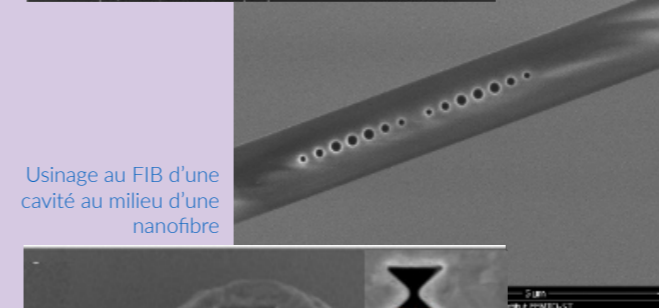
Nano-contrôleur de polarisation lumineuse

PHOTONIQUE INTÉGRÉES SUR FIBRE OPTIQUE

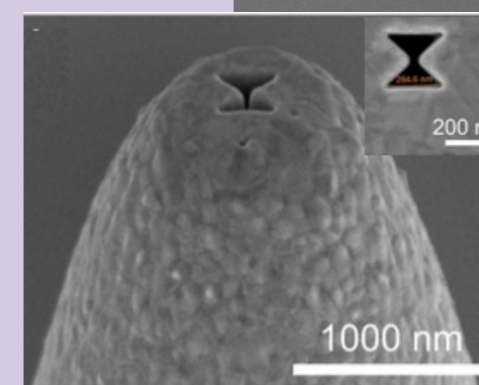
FEMTO-ST s'investit depuis plus de 15 ans dans le développement de fonctions optiques miniatures intégrées sur fibre optique. Deux approches technologiques ont été démontrées au sein de l'Institut pour la réalisation de ces fonctions. La première approche met en œuvre des techniques de nanofabrication par FIB en extrémité de fibre optique ou le report de nanostructures photoniques en extrémité de fibre. Des concepts d'antennes nanophotoniques ou de cristaux photoniques commandables, positionnés en bout de fibre et en interaction directe avec les modes de fibre, ont ainsi permis la mise en œuvre des premières micro-pinces optiques fibrées, de capteurs plasmoniques de type « Lab-on-fiber », de sondes médicales ultracompactes pour la surveillance in vivo de la dose de rayonnements en curiethérapie, et des capteurs électro-optiques minimalement invasifs pour des environnements sévères. La deuxième approche met en jeu l'amincissement contrôlé (par chauffage-étirage) de la fibre optique, pour la réalisation sur mesures de nanofibres (dont la dimension transverse est inférieure au micromètre) avec une précision de 10 nm. Les problématiques de fragilité et de sensibilité à la pollution de ces nanofibres sont maîtrisées via des encapsulations spécifiques. Un des axes de développement les plus dynamiques concernent la création de capteurs photoniques pour l'instrumentation du vide et les environnements extrêmes.



Cristal photonique LNOI micro-assemblé sur fibre



Usinage au FIB d'une cavité au milieu d'une nanofibre



Nano-ouverture bowtie nanofabriquée en bout de pointe fibrée

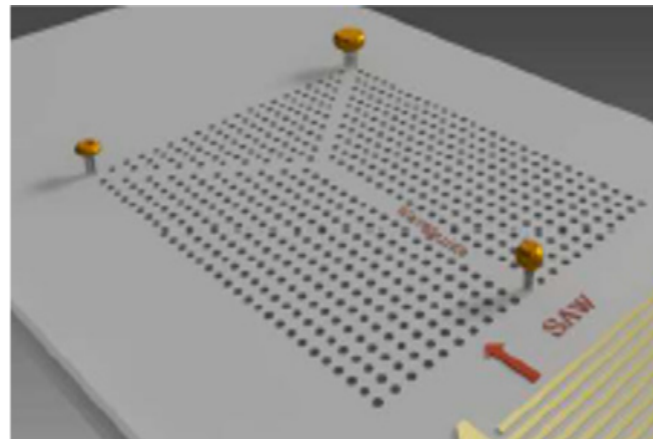
TECHNOLOGIES QUANTIQUES

COMPOSANTS INTÉGRÉS

FEMTO-ST participe au développement des technologies quantique à plusieurs niveaux. Plus généralement, les technologies quantiques constituent un axe majeur de développement de nombreux domaines tels que le traitement de l'information, la cryptographie, la métrologie ou encore les capteurs. Si de nombreuses démonstrations de principe ont été réalisées au cours des 20 dernières années, le déploiement de ces technologies reste limité par la trop faible capacité d'intégration de ces concepts en systèmes fonctionnels. Le développement de composants intégrés pour les technologies quantiques nécessite ainsi la levée de verrous scientifiques et technologiques tels que la miniaturisation à l'échelle micro- et nano-métrique, le développement d'instrumentation dédiée, le développement de composants hybrides et l'intégration de ces composants dans des systèmes fonctionnels. Dans la décennie à venir, **FEMTO-ST sera engagé avec détermination dans le développement des composants opto-mécaniques, nanoémetteurs à photons uniques, composants acoustiques pour la transduction quantique, etc.**

SYSTÈMES OPTIQUES

Au niveau fondamental nous étudions l'intrication spatiale de photons jumeaux de dimensionnalité géante dans les images. (paradoxe EPR dans les images, interférences et holographie à deux photons). Nous nous impliquons également dans le développement technologique de briques de base comme **les sources à photons jumeaux intégrés** en collaboration avec des entreprises comme Auréa Technology. Enfin, nous travaillons sur les applications du quotidien avec la conception et la réalisation de **capteurs à fibres** « ultimes » utilisant des compteurs de photons en collaboration avec Omnisens et Auréa Technology. Par ailleurs nous développons une recherche avancée en technologie photonique quantique dans le domaine fréquentiel, basée sur l'utilisation de **composants télécoms standards et intégrés**. Cette approche se différencie particulièrement pour sa capacité d'implémentation technologique mais aussi au niveau fondamental par la possibilité à participer au développement des modèles quantique, en établissant des **records en termes de manipulation d'états quantiques de grande dimension, de sensibilité de systèmes photoniques quantiques intégrés et transportables**, comme des sources à photons jumeaux et des détecteurs. FEMTO-ST a créé l'unique start-up française en communications quantiques : Auréa Technology en 2010, et un laboratoire commun créé en 2022, permettra de mener des recherches avancées dans le développement des applications et des technologies quantiques quantiques (source à photons jumeaux, applications spatiales voir page 10).



Plateforme quantique électro-acousto-mécanique



Aurea Technology produit des détecteurs de photon.

RÉFÉRENCES OPTIQUES ULTRA-STABLES

FEMTO-ST, dont les efforts de valorisation ont conduit aux premières micro-horloges commerciales françaises (<https://www.syrlinks.com/fr/produits/all/temps-frequence/horloge-atomique-miniature-mmec>), se positionne vers le développement de micro-horloges optiques à cellule MEMS de nouvelle génération. Ces horloges renforceront par leur déploiement la qualité de la navigation de micro- et nano-satellites, assureront le guidage sur des durées étendues de véhicules ou systèmes autonomes en situation de résilience aux signaux GNSS, ou étendront la durée d'études sismiques dans les fonds océaniques. FEMTO-ST sera investi de 2023 à 2026 comme partenaire au projet ADEQUADE (European Defence Fund).

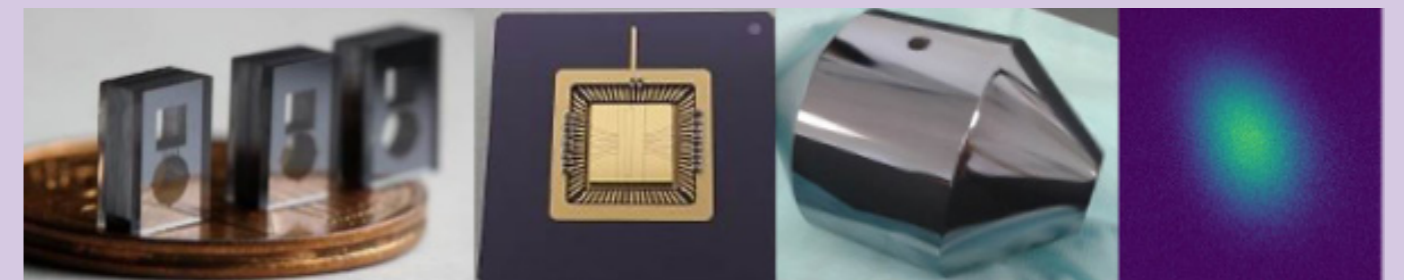
FEMTO-ST travaillera sur le développement d'une horloge optique compacte reposant sur l'interrogation d'un ion unique ytterbium, refroidi par laser et piégé à l'aide d'un piège surfacique au sein d'une enceinte ultra-vide. Cette référence de fréquence offre la perspective de performances de stabilité 10 fois supérieures à celles d'un maser à hydrogène dans un volume comparable. Cette horloge, à vocation transportable, pourra être mise à profit pour des campagnes de géodésie et contribuer à des campagnes de mesure d'inter-comparaison internationales via REFIMEVE.

FEMTO-ST investira des ressources conséquentes pour le développement de lasers ultra-stables. Ces dispositifs visent à la génération de signaux optiques présentant des stabilités relatives de fréquence exceptionnelles, à 17 voire 18 chiffres significatifs. Ces lasers peuvent être exploités

pour le développement d'horloges atomiques optiques, instruments dont la précision sans égal, nourrit d'ores et déjà des réflexions poussées au sein de la communauté internationale temps-fréquence pour l'établissement d'une future redéfinition de la seconde. Ces lasers intéressent aussi la détection d'ondes gravitationnelles, de matière noire ou la géodésie à très haute résolution.

<https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/project/next-generation-ultrastable-lasers-reducing-thermal-noise-limit-and-overcoming-technical-limitation/>

FEMTO-ST travaille sur le développement de 4 lasers à cavité ultra-stables, dont 2 impliquant l'apport de la cryogénie pour refroidir la cavité et explorer les performances ultimes de ce type d'approche. Un cinquième laser, basé sur un concept quantique extrêmement stimulant nommé superradiance appliqué sur un ensemble d'atomes ytterbium refroidis par laser disposés au sein d'une cavité optique, permet d'envisager des performances encore plus impressionnantes (10^{-18} à 1 s).



Cellules alcalines micro-fabriquées, piège à ion surfacique, cavité silicium, nuage d'atomes froids Yb.

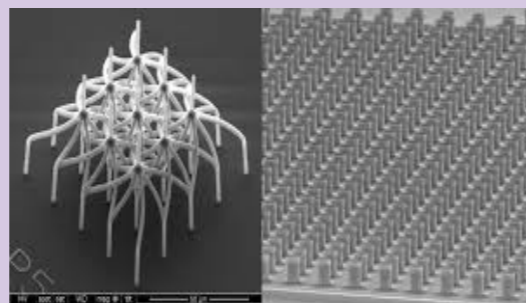
Fiabilité des programmes quantiques (voir le page 23)

INFORMATIQUE, INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET SCIENCE DES DONNÉES

L'intelligence artificielle (IA) a de plus en plus de retombées dans tous les départements de FEMTO-ST.

CALCULATEUR NEUROMORPHIQUE

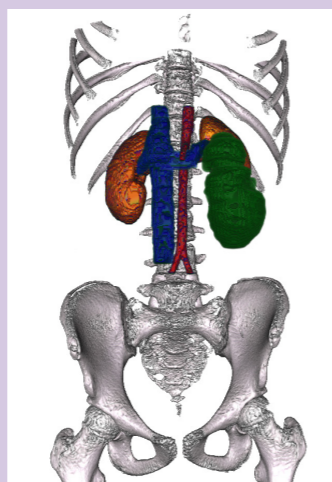
L'intelligence artificielle, l'apprentissage machine, les réseaux de neurones sont en train de révolutionner le traitement de l'information. Cependant, les réseaux de neurones nécessitent des milliers d'interconnexions, ce qui rend leur implémentation extrêmement gourmande en ressources informatiques. Pour pouvoir exploiter tout leur potentiel, il est nécessaire de réaliser des réseaux complexes et larges. FEMTO-ST, notamment à travers le projet ERC INSPIRE, développe une approche, en amont, de réseaux de neurones entièrement photoniques, parallèles, avec une architecture 3D, capable d'augmenter les performances actuelles par plusieurs ordres de grandeur.



Informatique neuromorphique utilisant les réseaux de points quantiques

SEGMENTATION 3D POUR L'IMAGERIE MÉDICALE

Au-delà de ces aspects fondamentaux sur le développement de l'IA au travers des réseaux neuronaux, FEMTO-ST est également porteur d'activité qui utilisent l'IA comme ressource pour l'innovation technologique. Par exemple dans le domaine de la santé, l'IA permet de travailler sur des données images (radio, scanner, etc) et d'utiliser également des données physiologiques du patient. Des travaux sont en cours pour travailler sur l'analyse des comptes rendus médicaux afin de proposer une approche permettant d'aider les personnes qui établissent les codes SIM10 par exemple. Plusieurs travaux ont eu pour but de faire de la segmentation sur les images médicales afin d'aider les médecins à faire des diagnostics plus rapidement. L'avantage de l'IA est qu'elle permet de travailler sur des données très variées, texte des comptes rendus médicaux, données 1D issues des électrocardiogrammes, 2D pour les radios, images, etc, et 3D pour les vidéos. Par ailleurs, nous avons déjà eu des contacts avec plusieurs collègues des CHU montrant un intérêt fort à développer des travaux en commun.



Reconstruction 3D de l'abdomen (tumeur rénale) par l'intelligence

BIG DATA POUR L'ENVIRONNEMENT

L'agriculture est en pleine mutation vu le contexte environnemental. La prise en compte du contexte climatique semble inéluctable. Dans ce contexte, il est possible de prendre en compte des paramètres extérieurs (météo, contexte climatique, etc) pour permettre de détecter des anomalies ou des prédictions dans la production agricole. Avec des algorithmes d'IA, il est possible de travailler sur différents types de données (1D, 2D ou 3D). Les progrès des capteurs permettent d'envisager d'utiliser à bon escient ces données avec pour objectif de détecter des anomalies, d'améliorer le rendement ou la qualité.



Capteurs de collecte des données environnementale pour améliorer la production agricole

START-UP

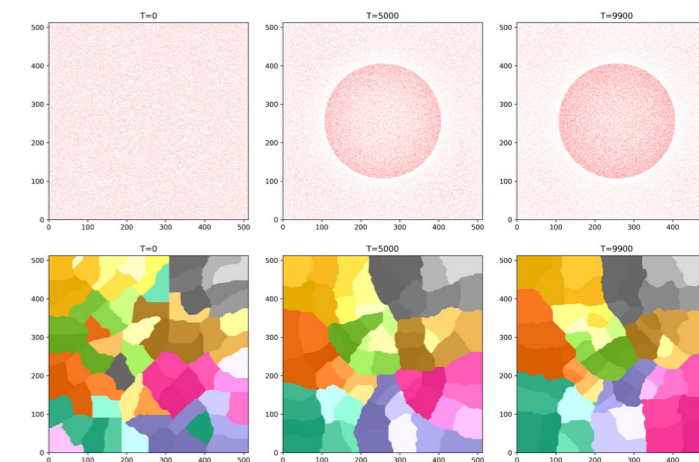
VERSO-Optim (spin-off de l'institut FEMTO-ST, 2017) propose des solutions d'optimisation (algorithmes), conçue d'emblée pour gérer des problèmes de très grande taille en fournissant des solutions quasi-optimales en un temps record : respect des horaires, temps d'intervention, compatibilité avec les intervenants et les véhicules, délais d'acheminement... toutes ces contraintes difficiles à gérer au quotidien.

<https://verso-optim.com>



AGILITÉ DES RÉSEAUX 5G

L'industrie automobile est en pleine transition vers la conduite automatisée. Les communications ultra-fiables, à faible latence (URLLC) proposées par la technologie 5G permet de répondre aux exigences critiques des véhicules autonomes connectés. La nature dynamique des réseaux véhiculaires exige des modifications architecturales des réseaux 5G avec la mise en œuvre du concept du Mobile Edge Computing (MEC), une technologie clé pour répondre aux futures exigences de la QoS des réseaux cellulaires 5G. Des mécanismes de décision auto-adaptatifs doivent être définis pour placer les ressources informatiques aux emplacements les plus appropriés pour permettre au réseau de prendre des mesures préventives afin d'éviter les problèmes liés à la mobilité véhiculaire. Des algorithmes pour l'analyse des données de trafic mobile sont développés en s'appuyant sur les techniques d'apprentissage (ML, DL). Des modèles de gestion de la QoS, en temps réel, des ressources du réseau, basés sur les techniques d'apprentissage (ML, DL) sont développés pour maintenir la communication entre les véhicules autonomes à un certain niveau de QoS.



Distribution dynamique de système multi-agents

SÉCURITÉ DES SYSTÈMES D'INFORMATIONS

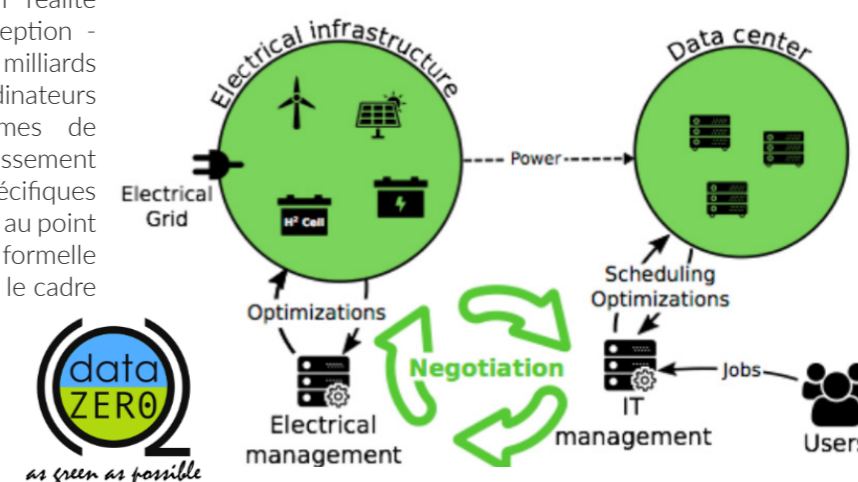
L'institut FEMTO-ST a développé ces dernières années une expertise dans l'analyse de la sécurité des systèmes informatiques, par exemple au niveau des protocoles de communication (projet européen AVISPA), des applications mobiles (projets ANR RAVAJ), des réseaux (projet européen RAZEN), du matériel en lien avec la DGA (projets ANR ASTRID) et plus récemment sur les protocoles de communications utilisés par le transport aérien (projet européen SARCOS et ANR ASTRID). Des travaux sont actuellement en cours, en partenariat avec le Laboratoire SIMULA en Norvège, visant à sécuriser le transport maritime avec pour objectif de détecter automatiquement des mouvements frauduleux, par exemple, en lien avec la surveillance de zones maritimes protégées.

FIABILITÉ DES PROGRAMMES QUANTIQUES

Le coût de ce que l'on appelle improprement des bogues informatiques - mais qui sont en réalité des erreurs de programmation ou de conception - représente un coût annuel estimé à plusieurs milliards de dollars. Le développement intensif des ordinateurs quantiques, s'appuyant sur des paradigmes de programmation différents, impose un investissement dans de nouvelles théories et techniques spécifiques d'analyse de fiabilité. L'institut FEMTO-ST met au point actuellement des techniques de vérification formelle de programmes quantiques, notamment dans le cadre du projet QuanTEdu-France.

VERDISSEMENT DU NUMÉRIQUE ET DU CLOUD

Depuis 2015 l'institut FEMTO-ST (départements AS2M, DISC et Energie) est membre du projet ANR DataZero, puis DataZero2 visant à étudier les problématiques liées à l'alimentation des Data Centres uniquement avec de l'énergie renouvelable. L'ambition du projet initial était de répondre à la question suivante : est-il possible de dimensionner et de piloter de manière robuste un data-center uniquement alimenté par des sources renouvelables, issues du soleil et du vent, produites localement ? Le raccordement à une source externe telle qu'un fournisseur classique d'électricité étant exclu, la problématique est la gestion de l'intermittence des sources d'alimentation. Nous avons montré, dans cette posture extrême, le potentiel des énergies renouvelables comme alimentation crédible alors qu'on connaît la pression du numérique en général et de l'alimentation des data-centers sur la consommation électrique et la production de CO2 en particulier. Nous avons répondu à trois défis : dimensionner le matériel informatique et l'alimentation électrique à des échelles crédibles, y compris pour les capacités de stockage, traiter la charge informatique dans une enveloppe énergétique limitée et enfin engager les sources d'énergie, ou stocker une partie de l'énergie produite lorsque celle-ci est abondante, pour répondre à une demande électrique négociée. Dans la continuité des solutions proposées dans le projet DATAZERO, le projet DATAZERO2 actuellement en cours vise une montée en TRL et la prise en compte des incertitudes à tous les niveaux où cela est nécessaire. Les autres partenaires du projet sont l'IRIT et l'entreprise Eaton.



Architecture de gestion de Data Center alimenté par énergie renouvelable

MICRO-ROBOTIQUE

Parmi les 3 groupes pionniers de la microrobotique à l'échelle mondiale, les chercheurs de l'institut FEMTO-ST créent des **systèmes robotiques** permettant à l'Homme d'intervenir aux **échelles micrométriques et nanométriques** qui lui sont habituellement inaccessibles. En 2021, nous avons créé le Centre de Micro et NanoRobotique, une plateforme académique qui propose des systèmes robotisés à haute technicité et matures capables d'intervenir dans les 4 environnements de travail suivants afin de répondre à de nombreux besoins sociétaux, scientifiques et industriels :

- Des robots capables d'intervenir dans le corps humain, par des voies naturelles pour la **chirurgie mini invasive** exploitant la déformation continue de structures ultra élancées et permettant des interventions délicates et finement contrôlées (Fig. R-c, spin-off Amarob).
- Des robots capables d'intervenir dans des environnements à vide comme la chambre de microscopes électroniques à balayage pour **les nanotechnologies** et le développement de nanoproduits (Fig. R-d et e)
- Des systèmes permettant **d'intervenir sur des cellules biologiques** notamment pour la caractérisation mécanique d'ovocytes (plateforme à haut TRL utilisée par les médecins à l'EFS) ou le tri ultra-sélectif de cellules (cf projet Mimedii)
- Des robots capables de réaliser des **tâches de caractérisation** (fibres naturelles par exemple) ou **d'assemblages de produits miniatures complexes**/hybrides dans l'air, par exemple pour les domaines de la photonique sur puce ou les micromécanismes (Fig. R-e et f). Ces travaux ont conduit à la création de l'entreprise Percipio Robotics en 2011 qui compte actuellement 32 employés et qui commercialise des machines de micro-assemblage automatisées.

Ces différents travaux sont de nature pluridisciplinaire mettant en synergie de multiples collaborations avec

d'autres départements de l'institut, des partenaires académiques et industriels. Ce spectre large est centré sur des compétences en robotique, automatique, traitement du signal et mécatronique. Ils permettent de proposer des concepts robotiques en rupture (Fig R-a et b) ainsi que des méthodes permettant de modéliser leur comportement mais également de contrôler de manière dynamique leurs mouvements et leurs interactions avec leur environnement de travail. Nous cherchons donc à repousser sans cesse les limites de la précision, de la dextérité, de l'intelligence et des dimensions de ces robots. Enfin, l'acceptabilité des technologies développées et leur déploiement dans un continuum recherche-transfert-formation constitue une pierre angulaire des travaux. Le Centre de Micro et NanoRobotique est soutenu par l'équipex Robotex, l'équipex + TIRREX, le PEPR O2R, la région, ses établissements tutelles ainsi que par nombreux projets académiques et industriels.

START-UP

Percipio Robotics (spin-off de l'institut FEMTO-ST, 2012) a développé une expertise unique en systèmes robotiques de préhension et d'assemblages microtechniques. De l'étude initiale de faisabilité à la livraison d'un système opérationnel complet, ils relèvent des défis techniques en termes de miniaturisation.

Atteindre la précision requise par l'assemblage microtechnique est un défi qui nécessite d'interfacer le meilleur des éléments robotiques (axes, dispenseurs, préhenseurs) avec un processus de vision industrielle haute définition, en les interfaçant via un contrôle logiciel efficace.

www.percipio-robotics.com

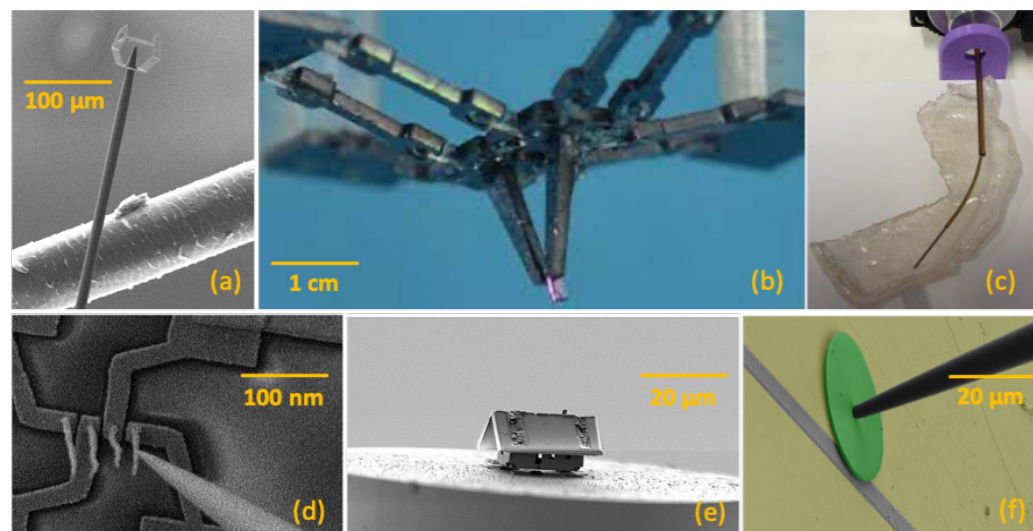


Fig. R (a) Structure Nanorobotique en bout de fibre optique étirée résultant d'articulations réalisées par le pliage de Silice (b) Migrirobot, le robot le plus rapide du monde (12 cycles de prise/dépose par seconde) combinant poutres rigides et articulations flexibles (c) Robots à tubes concentriques pour la chirurgie mini invasive (d) Caractérisation de propriétés électriques et mécaniques locales de nanotubes de carbone (projet collaboratif avec Thalès TRT) (e) Réalisation d'un dispositif complexe (micro-maison) en bout de fibre optique par assemblage (f) Positionnement ultra-précis (<10 nanomètres) d'un résonateur optique le long de son guide d'onde.

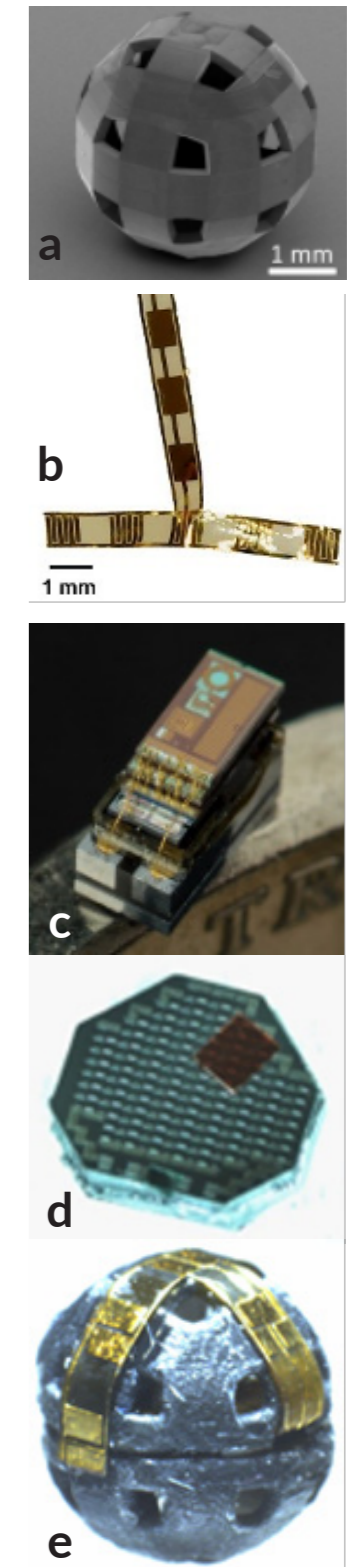
MATIÈRE PROGRAMMABLE

FEMTO-ST mène des recherches depuis plus de 10 ans dans la conception, la réalisation et la programmation d'une matière composée de micro-robots autonomes de taille millimétrique. Dans cette thématique, il est reconnu au niveau international comme un acteur majeur et il est à la tête d'un consortium international comportant 12 universités et 4 entreprises qui a mené des avancées dans le domaine des micro-technologies pour fabriquer un matériel intelligent ainsi que dans le domaine du logiciel pour créer des algorithmes distribués pour gérer ces matériels.

Les prochaines étapes consisteront au niveau matériel à travailler sur l'optimisation de l'actionnement des robots qui comprend l'attachement, où la difficulté est de consommer le moins possible d'énergie pour garder la connexion, et l'actionnement du mouvement, où le défi est de pouvoir délivrer la puissance nécessaire. Sachant que dans les **robots modulaires mésoscopiques**, plus de 50% de la masse est représentée par l'actionneur, il faut trouver le bon compromis masse/puissance. Il faut aussi que le dispositif soit résistant aux pannes et dans notre cas, miniaturisable.

LA VALORISATION DE CES TRAVAUX SE FAIT ACTUELLEMENT AU TRAVERS DU PROJET DE CRÉATION D'UNE START-UP «PHIGI» DONT LE PORTEUR EST RENTRÉ EN INCUBATION AUPRÈS DE DÉCA-BFC.

Une piste est de proposer un robot déformable doté d'un **double système d'actionnement** : électrostatique pour l'attachement que nous développons à FEMTO-ST et basé sur un actionneur à gel ionique en couche mince que nous développons avec le LIMMS/CNRS. Au niveau logiciel, le principal défi est le processus de modification de la forme initiale d'un objet composé de robots modulaires qui est appelé **auto-reconfiguration**. Il consiste à trouver une séquence de mouvements à exécuter par les robots afin de transformer une configuration initiale en une configuration cible en respectant deux impératifs : l'ordre de construction doit prévenir tout blocage et le nombre de mouvements doit être minimal afin de réduire le temps de reconfiguration. En collaboration avec l'Université de Harvard nous proposons d'étudier une nouvelle méthode utilisant conjointement des approches heuristiques permettant une rapidité d'exécution et des approches bio-inspirées permettant une plus grande robustesse.



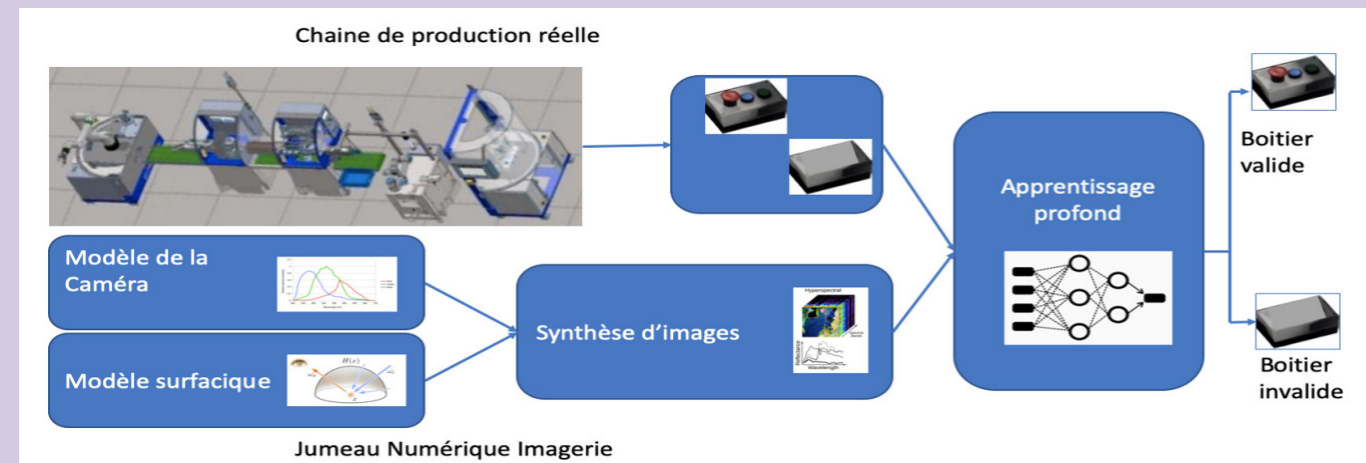
Toutes les pièces composent le robot final de 3.6mm (e) : la coque (a), le flexiboard (b), avec des électrodes flexibles, une version modifiée du Michigan Micro Mote, qui comprend l'unité de calcul (ARM Cortex-M0), une batterie, une interface de programmation, etc. (c), l'élevateur de tension (d).

INDUSTRIE 4.0

JUMEAU NUMÉRIQUE

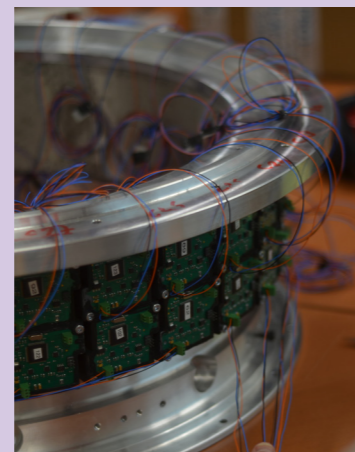
Récemment, l'industrie mondiale est confrontée à une quatrième révolution, appelée Industrie 4.0. Elle fait référence à la connectivité et à l'intégration des systèmes intelligents et autonomes pour recueillir et analyser les données et numériser les opérations de l'organisation. En effet, en ajoutant des caméras intelligentes aux chaînes de production, nous constatons une amélioration de la qualité de détection de défauts à des vitesses élevées et à des coûts réduits. De plus, compte tenu des restrictions imposées à la main d'œuvre humaine par la loi COVID-19, telles que la distanciation sociale dans l'usine, ces avantages sont encore plus essentiels pour maintenir les lignes de production fonctionnelles. Afin de répondre à cette problématique, dans nos travaux nous étudions

et développons un jumeau numérique basé sur l'analyse d'images multimodales et l'intelligence artificielle pour permettre la détection automatisée et précoce des défauts sur une ligne de production intégrant différentes modalités d'acquisition. Cette ligne est en cours de construction dans le cadre du projet territoire d'innovation. Il s'agit de la mise en œuvre d'un système composé d'un générateur d'images de synthèse multimodales et agrémenté de techniques d'IA afin d'accompagner et aider les entreprises dans l'amélioration de leur processus de production. Ce système servira de supports aux entreprises et notamment aux start-ups, TPE/PME de la région pour les accompagner dans la mutation de leurs processus de production.



SOBRIÉTÉ ACOUSTIQUE

La pollution sonore a un impact considérable sur la santé, avec plusieurs dizaines de milliers de pathologies directement induites annuellement en Europe occidentale. Les solutions de **contrôle passif ou actif des vibrations et du bruit** rayonné par les structures développées au sein de l'institut adressent divers niveaux de maturité technologiques. Les développements les plus avancés, financés par des projets ANR et Européens, permettent de proposer des concepts et méthodologies nouveaux tels que **le pilotage thermique des propriétés dynamiques des matériaux et des structures, l'utilisation de systèmes périodiques amortis, ou l'utilisation d'algorithmes d'IA pour adapter en temps réel** la fabrication de structures imprimées en 3D. La montée en maturité de ces solutions se fait en partenariat avec des partenaires industriels, tels qu'Alstom ou MMT pour le développement de méthodes de conception et de réduction du bruit des machines électriques, Thalès pour la réduction des niveaux vibratoires des POD, ou encore Safran pour la réduction du bruit rayonné par les moteurs d'avions. Cette dernière application est basée sur une technologie développée depuis près de 20 ans et a conduit à la création de la spin-off Vibiscus en 2021.



Extrait du montage de la virole pour le projet SALUTE

START-UP

Vibiscus (spin-off de l'institut FEMTO-ST, 2021) développe un matériau programmable novateur capable d'absorber les sons en milieu ouvert et fermé. Ce matériau est constitué de cellules de quelques cm³, dont une des faces est une membrane pilotée en temps réel en fonction des informations captées. Vibiscus crée des environnements acoustiques personnalisables et reconfigurables 5 à 10 fois plus économe en énergie que les techniques de contrôle actif classiques.

<https://vibiscus.com>

"DANS LE CHAMP DES MATIÈRES PREMIÈRES, SÉCURISER, AUTANT QUE POSSIBLE, L'ACCÈS À NOS MATÉRIAUX"

MATÉRIAUX BIOSOURCÉS

Le changement climatique est l'un des défis majeurs auxquels l'humanité est confrontée au cours de ce siècle. Un autre défi réside dans la demande croissante en nourriture et en ressources induite en partie par l'augmentation de la population mondiale. Pour atténuer le changement climatique face à cette demande accrue, il est nécessaire de développer de nouvelles chaînes de valeur qui ne concurrencent pas la production alimentaire, n'émettent pas de gaz à effet de serre et n'utilisent pas de ressources limitées. Dans ce contexte, il est nécessaire de développer de nouvelles familles de matériaux durables, légers et performants, non issus du pétrole. La biomasse végétale est une matière première candidate prometteuse pour de tels développements. En effet, le CO₂ séquestré par les plantes lors de leur croissance fait de cette ressource un excellent puits de carbone et permet potentiellement la production de produits neutres en carbone. Cependant, il faut être prudent dans le choix de la biomasse pour éviter les conséquences négatives liées aux effets sur l'irrigation, l'eutrophisation et l'utilisation des terres. Des défis majeurs subsistent également pour transformer la biomasse en produits aux fonctionnalités avancées tout en maintenant la neutralité carbone et en limitant l'empreinte environnementale. En effet, dans de nombreux cas, les avantages de la bio-origine de la matière première sont annulés par l'impact environnemental des procédés de transformation utilisés. Les composites à fibres végétales constituent des candidats prometteurs pour les matériaux durables du

futur. Au cours des 15 dernières années, de nombreux développements et progrès technologiques impliquant ces matériaux ont été réalisés. L'équipe Mat'éco du DMA de FEMTO-ST y a contribué activement, en particulier aux travers des activités menées dans les projets de recherche nationaux et internationaux que l'équipe a coordonnés (H2020-BBI SSUCHY) et auxquels elle a participé (EraNet Suscrop NETFIB, projet structurant I-SITE BFC WooFHi, ADEME Graine PHYTOFIBER...). Ces projets ont tous pour objectif commun de valoriser des fibres issues de biomasses végétales produites en France et en Europe (chanvre, lin et bois) pour le développement d'une nouvelle génération de matériaux composites durables pour des applications structurales et multifonctionnelles. Ces filières de production et de transformation de la biomasse végétale sont effectivement stratégiques et indispensables pour la transition écologique des secteurs historiques du bâtiment et des industries du transport et également pour les marchés émergents à forts enjeux de compétitivité pour la France. Le succès de l'intégration de ces matériaux biosourcés dans les applications technologiques et l'ingénierie de demain réside dans le développement d'approches fines permettant d'intégrer les spécificités inhérentes aux matériaux issus du vivant, en particulier la maîtrise et la réduction de la variabilité de leurs propriétés mécaniques

www.ssuchy.eu



BEE Electric scooter électrique, le châssis est réalisé en composites biosourcés

ARTS ET SCIENCE

FEMTO-ST a une importante implication dans les projets « arts et science ». Tout d'abord cela s'est traduit par des résidences d'artiste avec, dès 2018 au département d'Optique celle de Sarah Ritter (<https://www.sarahritter.net/>), artiste photographe, avec laquelle de nombreuses actions ont été menées dont une exposition mixte art-science pour la fête de la science 2018 (VIVO : <https://www.ubfc.fr/vivo/>) mais également depuis 2019 un projet Entreprenariat qui fait vivre chaque année à nos étudiants du Master PICS 1ère année une semaine d'immersion sur un projet à la frontière entre art et science. Ce projet leur permet de développer leur créativité, leur curiosité, leur intelligence collective et le goût de l'interdisciplinarité. Il est à noter que en dehors de l'aspect pédagogique et développement de compétences de ces projets, cela nous a conduit à être parmi les 20 lauréats de l'édition 2020 du concours "preuve par l'image" du CNRS (<https://www.concours-preuve-image.fr/la-savon-fou-et-la-fee-laser/>) mais encore, grâce au Service sciences arts et culture de l'université et à une de nos ancienne étudiante de Master, de développer une recherche sur notre patrimoine scientifique et technique (<https://projects.femto-st.fr/patrimoine-scientifique/historique>). Dans le cadre du projet Vertigo de l'appel STARTS (H2020, ICT36), une autre résidence des artistes Scenocosme a été également obtenue. Ils ont utilisé les technologies développées à FEMTO-ST, les Blinky Blocks pour créer un ensemble d'œuvres appelées reactive matter et présentées dans divers musées (Centre national d'art et de culture Georges-Pompidou, Experimenta, CENTQUATRE-PARIS, Athenium, Centre Culturel de l'Université de Bourgogne, ARCADE design à la campagne). Cette collaboration sera étendue aux nouveaux matériels issus du projet de matière programmable.

JEU VIDÉO

Au sein de l'axe transverse en Sciences Humaines RECITS, des recherches pionnières ont été menées sur l'étude des jeux vidéo, un champ de recherche émergent au sein des sciences humaines et sociales. Ces études se sont matérialisées par plusieurs projets de recherche, à commencer par l'ANR Ludespace, dont les résultats ont donné lieu à la publication d'un ouvrage (La fin du Game, Presses Universitaires François Rabelais, 2021) ou le projet Ludopresse (Labex ICCA) avec la publication de l'ouvrage Lire la presse de jeu vidéo (Presses universitaires de Liège, 2022). Ces recherches ont engendré de la médiation scientifique (Commissariat de l'exposition "Jeu vidéo" à la Cité des Sciences et de l'Industrie), de nombreuses reprises dans la presse généraliste, mais aussi de l'expertise à destination des pouvoirs publics (Fond d'aide au jeu vidéo du CNC) et des acteurs industriels (Séminaires Ubisoft).



Impression 3D instantanée & collaborative (matière programmable, voir le page 23)



H. Ter Minassian, V. Berry, M. Boutet, I. Colon de Carvajal, S. Coavoux, D. Gerber, S. Rufat, M. Triclot, V. Zabban, La fin du game ? : les jeux vidéo au quotidien, Presses Universitaires François Rabelais, 2021

COLLABORATIONS DE L'INSTITUT FEMTO-ST AVEC L'INDUSTRIE RÉGIONALE EN BOURGOGNE-FRANCHE-COMTÉ



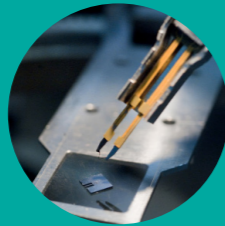


L'INSTITUT FEMTO-ST ENCOURAGE LA RECHERCHE ET L'INNOVATION POUR RELEVER DES DÉFIS SOCIÉTAUX



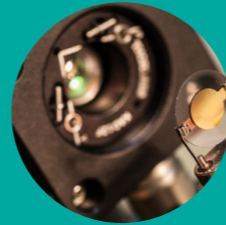
SANTÉ ET BIEN-ÊTRE

- Thérapies
- Diagnostic, dépistage et qualification biologique
- Ethique et acceptabilité



ÉNERGIE PROPRE, SÛRE ET EFFICACE

- Energie - hydrogène
- Récupération d'énergie
- Efficacité énergétique de systèmes



ENVIRONNEMENT

- Capteurs environnementaux
- Traitement de l'air et de l'eau
- Protection contre les vibrations et nuisances sonores
- Préservation des ressources



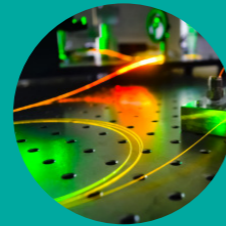
SYSTÈMES INTELLIGENTS

- Intelligence artificielle: systèmes distribués, diagnostic and pronostic
- Objets intelligents & Systèmes complexes
- Ethique



COMMUNICATION ET INFORMATION

- Optique ultra-localisée
- Technologies quantiques
- Matériaux et systèmes pour télécommunications



INDUSTRIE DU FUTUR

- Nouveaux matériaux et procédés
- Capteurs et actionneurs
- Usine 4.0



DÉFENSE - SÉCURITÉ

- Sécurité logicielle et réseaux
- Systèmes intelligents pour défense



Soutenu financièrement par :





FEMTO-ST Institute
15B avenue des Montboucons
F - 25030 BESANÇON cedex - France
Tel.: +33 (0)3 63 08 24 00

www.femto-st.fr

