



HIGHLIGHTS

**2024**

LABORATOIRE PLASMA & CONVERSION D'ÉNERGIE



## LABORATOIRE PLASMA & CONVERSION D'ÉNERGIE

---

### ADRESSES

#### **Université de Toulouse**

118, route de Narbonne  
31062 Toulouse cedex 9

#### **ENSEEIH**

2, rue Charles Camichel - BP 7122  
31071 Toulouse cedex 7

---

### DIRECTEURS DE PUBLICATION

#### **Olivier Eichwald**

Directeur

#### **Xavier Roboam**

Directeur adjoint

---

### EDITION

#### **Oblique Studio**

Communication visuelle

---

The logo for CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique), consisting of the letters "cnrs" in a lowercase, sans-serif font inside a white circle.

The logo for INP N7 (Institut National de Physique Nucléaire - Toulouse), featuring the text "TOULOUSE INP N7" in a bold, sans-serif font.

The logo for the University of Toulouse, with the text "UNIVERSITÉ DE TOULOUSE" in a bold, sans-serif font.

**5** EDITO

Introduction  
Olivier Eichwald  
Directeur du LAPLACE

---

**6** CODIASE

Gestion optimisée de  
l'énergie renouvelable dans  
des centres de données

---

**7** MDCE

Caractérisation de câbles  
de forte puissance pour  
l'avion à hydrogène

---

**8** AEPPT

Systèmes de protection –  
coupure : de la basse tension  
(B.T.) à la haute tension (H.T.)

---

**9** GREPHE

Propagation des ondes  
électromagnétiques  
dans les plasmas

---

**10** GENESYS

Impact majeur des phénomènes  
réversibles sur les piles à  
combustible PEM-BT

---

**11** GREM3

Optimisation topologique de  
circuits magnétiques 3D avec  
des contraintes mécaniques

---

**12** SCIPRA

Le LAPLACE se lance dans  
la valorisation du CO<sub>2</sub> par  
plasma froid !

---

**13** CS

Du transistor de puissance à  
sa commande rapprochée,  
des avancées majeures

---

**14** GRE

Antennes de type réseau  
transmetteur à balayage et  
formation électronique de  
faisceau

---

**15** DSF

Mécano-luminescence :  
un nouvel outil pour diagnostiquer  
la rupture de liaisons chimiques  
sous contrainte mécanique

---

**16** LM

Des recherches pour les  
nouvelles générations de diodes  
électroluminescentes organiques  
(OLED) plus écologiques

---

**17** PRHE

Élimination des polluants pharma-  
ceutiques dans l'eau par la décharge  
corona pulsée et étude de la toxicité  
des sous-produits générés

---

**18** IRN

Nanomatériaux, procédés  
et synergie enseignement  
et recherche : le  
LAPLACE fédère !

---

**19** ICD

Le LAPLACE organise  
la 5<sup>ème</sup> édition de  
l'International Conference  
of Dielectrics (ICD)

---

**20** SEMA

Le LABCOM SEMA,  
une véritable success  
story !

---

**21** NUMELEC

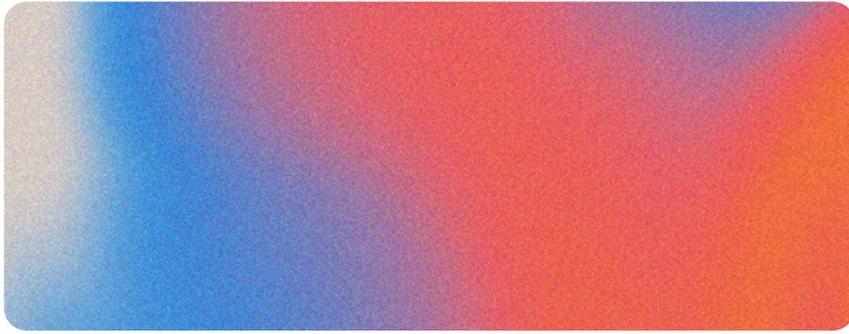
Le LAPLACE organise la  
10<sup>ème</sup> Conférence Européenne  
NUMELEC 2024

---

**22** PHYSIQUE 2024

Le LAPLACE, un acteur  
majeur de l'Année de la  
Physique 2023-2024

---



## Edito

Chères lectrices, chers lecteurs,

Ce fascicule est le premier d'une série qui présentera chaque année les faits marquants scientifiques et évènementiels du Laboratoire PLASMA et Conversion d'Énergie. Son contenu se veut être accessible à tous pour vous permettre de découvrir la richesse et la diversité des activités de recherche du laboratoire. Ce fascicule étant le premier d'une longue série, permettez-moi tout d'abord de vous présenter le LAPLACE.

Unité Mixte de Recherche (UMR) rattachée au CNRS, à Toulouse INP (Institut National Polytechnique) et à l'Université de Toulouse (UT), le LAPLACE constitue la plus forte concentration de recherche en génie électrique et en plasma de France. Il regroupe plus de 300 personnels permanents et non permanents répartis sur 3 sites principaux, gère 4 plateformes technologiques, accueille un laboratoire commun et 2 IRN (International Research Network) et est à l'origine de la création de 4 startups deeptech. Ancré dans l'institut CNRS Ingénierie, les nombreuses collaborations de recherche industrielles et académiques génèrent des ressources à hauteur de 5,5M€ en moyenne par an et touchent à un large panel d'applications comme l'aéronautique et l'espace, le transport et les systèmes embarqués, l'énergie, l'environnement et la santé.

La conversion d'énergie est le terme-clé des activités de recherche du LAPLACE. Les travaux se focalisent sur l'étude des plasmas générés par décharges électriques dans des réacteurs témoins ou semi-industriels. Les recherches portent entre autres, sur la modification par technologies plasmas des propriétés d'un matériau ou de son état de surface, l'optimisation des disjoncteurs haute et moyenne tension, la propulsion plasma des satellites, la protection contre les agressions électromagnétiques et plus généralement les interactions ondes-plasma, la génération de molécules d'intérêts, l'aide à la cicatrisation, ... Les activités du LAPLACE s'inscrivent également dans la dynamique de la transition énergétique avec ses défis liés à la production d'énergie électrique renouvelable, le pilotage et l'optimisation des mix énergétiques de production d'électricité, l'intégration sous contraintes de convertisseurs de forte densité de puissance à la fois robustes et fiables. S'appuyant sur une vision multi-échelles et multi-applications, le LAPLACE travaille sur la caractérisation de la tenue diélectrique des matériaux et des systèmes sous contraintes, la conception de nouveaux matériaux isolants ou électroluminescents, les technologies d'intégration 3D, les méta-matériaux, ... Il étudie aussi le design et les commandes temps réel pour la conversion d'énergie statique et électromécanique à haut rendement et faible dissipation thermique, la production d'énergie par piles à combustible, la durée de vie des systèmes et de leurs constituants, l'énergétique et les flux radiatif, les antennes, ....

Ces premiers « *Highlights 2024* » vont vous donner un aperçu plus concret et détaillé de quelques-unes de ces activités scientifiques. Il se clôture par la mise en avant de collaborations renforcées et de quelques évènements phares de l'année 2024.

Excellente lecture !

**Olivier Eichwald**  
Directeur du LAPLACE



**Highlights  
2024**

# Gestion optimisée de l'énergie renouvelable dans des centres de données

DÉCISION TEMPS RÉEL LIANT PRODUCTEURS ET CONSOMMATEURS POUR CENTRE DE DONNÉES

**Le projet ANR DataZero2 a permis de gérer la complexité de l'utilisation de l'énergie au sein d'un Data Center alimenté par sources d'énergie renouvelable. Pour cela, le consortium IRIT / FEMTO / EATON / LAPLACE a travaillé depuis plus de 10 ans. La gestion des machines virtuelles par le gestionnaire du data center permet maintenant de diminuer, stopper, décaler, les tâches informatiques des clients sur les serveurs, guidée par la disponibilité et la limitation de l'énergie.**

Le projet DataZero2 a donné lieu à un logiciel de pilotage de l'énergie électrique et des tâches informatiques qui est en cours de valorisation en 2024 (via TTT pour étude de marché et recherche de distributeur).

Dans ce logiciel nous trouvons des modélisations de sources et stockeurs d'énergie électrique « PDM » (solaire PV, Eolienne, Pile à combustible et Electrolyseur à hydrogène, Batterie Lithium-Ion), des tâches informatiques « ITDM » (besoin d'accès mémoire, %CPU) et caractérisation des serveurs et leur consommation (Puissance

en veille, en calcul, en démarrage/arrêt...). Ces modèles tiennent compte du vieillissement à 10-20 ans. En ce qui concerne le temps réel, ce logiciel adapte le placement des tâches informatiques sur les serveurs en fonction des prévisions de consommation des utilisateurs et de la production renouvelable (météo et état de charge des stockeurs Hydrogène et Batterie).

Pour cela, une corrélation entre les profils consommateurs-producteurs permet de placer les tâches au moment où l'énergie est disponible, permet également de prévoir une

## CONTACT

**Stéphane Caux**

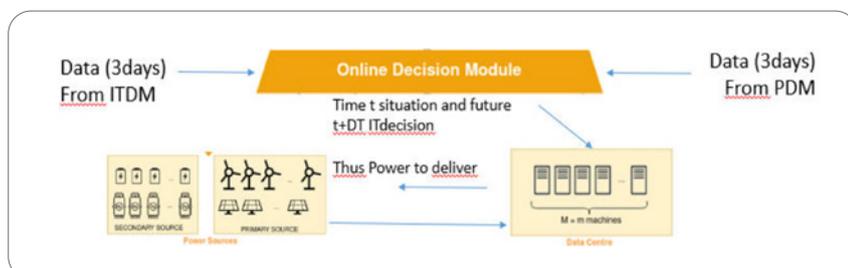
Professeur,  
Toulouse INP  
[stephane.caux@laplace.univ-tlse.fr](mailto:stephane.caux@laplace.univ-tlse.fr)

## Liens

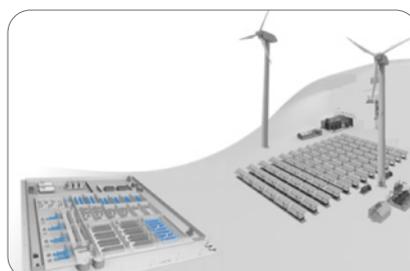
<https://www.irit.fr/datazero>  
<https://anr.fr/Projet-ANR-19-CE25-0016>

consommation amenant l'énergie à un point critique (bas) pour anticiper, sur une fenêtre de temps, l'utilisation de cette énergie. L'algorithme « BEASY » a montré de meilleures performances que des algorithmes actuels (backfilling, firstcome-firstserve etc) en cas de meilleur/pire condition météo et/ou pour le meilleur/pire pic de consommation.

Cette décision est optimisée pour la qualité de service, par le placement de l'exécution des tâches informatiques correspondant à la prédiction de la production et à l'engagement du stockage de l'énergie électrique. L'optimisation peut être adaptée pour une période de 3 jours à 3 heures, en lien avec des profils de puissance, d'énergie et de charge IT, calculés hors ligne sur le long terme, ces profils servant de cible au niveau de la décision restante à faire en ligne soumise à incertitudes non prévisibles.



Algorithme de décision temps réel pour la gestion de l'alimentation par énergies renouvelables des serveurs de calculs d'un centre de données non connecté au réseau de distribution électrique.



## PUBLICATION

**Mixing Offline and Online Electrical Decisions in Data Centers Powered by Renewable Sources.**

Igor Fontana de Nardin,  
Patricia Stolf, Stéphane Caux.

IECON 2022 :  
48th Annual Conference of the  
IEEE Industrial Electronics Society,  
IEEE Industrial Electronics Society  
(IES), Oct 2022, Brussels, Belgium.  
pp.1-6,

<https://doi.org/10.1109/IECON49645.2022.9968999>

hal-03841611

# Caractérisation de câbles de forte puissance pour l'avion à hydrogène

RÉALISATION D'UN BANC DE MESURE DE DECHARGES PARTIELLES SOUS CONTRAINTE SINUSOÏDALE, CONTINUE OU MODULÉE

**Un banc de mesure dédié aux câbles aéronautiques de forte puissance est en cours de construction au Laplace. Réalisé dans le cadre d'une collaboration des groupes MDCE et DSF avec la start-up Beyond Aero, il constitue un outil unique d'investigation sous contrainte électrique sinusoïdale, continue ou modulée, en température et sous vide partiel. Des détections électriques et optiques permettront de comprendre le phénomène d'apparition des décharges partielles (DPs) dans les câbles de manière à mieux les concevoir.**

La thèse en cours de réalisation depuis 2023 avec Beyond Aero vise à définir les conditions limites de service des câbles aéronautiques existants afin d'équiper un prototype d'avion à hydrogène tout électrique d'une puissance supérieure à 600 kW. Les technologies de câbles existantes seront explorées, avec trois axes de recherche principaux : i/ Définir des procédures de caractérisation appropriées tenant compte du comportement du câble sous contraintes issues des convertisseurs d'énergie et des conditions de pression et température pertinentes ; ii/ Analyser les différentes technologies de câbles

existantes et définir les conditions de service sans DPs pour les différentes solutions ; iii/ Interpréter en fonction des technologies de câbles les différences de comportement et explorer de nouveaux matériaux pour dépasser les limites existantes.

Ce programme a exigé la conception et la mise en œuvre d'un banc de test dédié aux câbles aéronautiques. Outre les conditions de vide partiel et de haute température exigées par les conditions de service, ce banc de test est adapté à la prise en compte des signaux générés par les convertisseurs électroniques

de puissance. Les contraintes DC/ modulées de tension sont produites par un amplificateur haute tension de large bande passante (35 kHz), ou par d'autres alimentations dédiées. Les diagnostics s'appuient sur des détections électriques et optiques pour mettre en évidence la manifestation des décharges partielles. La détection électrique de DPs est réalisée au moyen d'un transformateur de courant haute fréquence et la détection optique s'appuie sur un photomultiplicateur refroidi. Les détections électrique et optique sont complémentaires, l'une représentant une méthode standard de détection, l'autre amenant une localisation des décharges et des aspects énergétiques. Le dispositif est prévu pour permettre un diagnostic sur des durées prolongées et des contraintes combinées, permettant d'aborder le vieillissement sous régime de DPs.



## THÈSE EN COURS

**Characterization of aeronautic power cable technologies in order to design a partial discharge free hydrogen business jet**

PhD thesis of Younes Chikhoun

Collaboration Beyond Aero / Laplace, 2023-2026.

*Banc de mesure de décharges partielles (DPs) pour câbles sous contrainte aéronautique*

## CONTACT

### Sorin Dinculescu

Ingénieur de Recherche,  
Université de Toulouse  
[sorin.dinculescu@laplace.univ-tlse.fr](mailto:sorin.dinculescu@laplace.univ-tlse.fr)

### David Malec

Professeur, Université de Toulouse  
[david.malec@laplace.univ-tlse.fr](mailto:david.malec@laplace.univ-tlse.fr)

# Systèmes de protection – coupure : de la basse tension (B.T.) à la haute tension (H.T.)

L'ARC ÉLECTRIQUE DANS LA COUPURE :  
DU VIDE À PLUSIEURS DIZAINES DE BARS

**L'équipe AEPPT, depuis plus de 30 ans, étudie et aide à l'optimisation des systèmes de protection des installations. Ces milieux plasma sont caractérisés par des modélisations fluides multi physiques en configurations 3D, par des approches hors équilibres thermiques et/ou chimiques. Son dynamisme lui a permis cette année de contractualiser des études simultanément sur les disjoncteurs avec Hager (BT), Siemens (HT), Siemens Energy (vide) et sur les parafoudres avec CITEL.**

Les systèmes de coupure de courant sont indispensables dans les réseaux électriques pour la protection des installations et des personnes. Si de tels dispositifs existent et sont mis en place depuis de nombreuses années, le besoin de miniaturisation, de plus grande fiabilité, de respect de nouvelles normes notamment environnementales ou d'élargissement de la gamme d'utilisation conduit les industriels à accroître les études sur ces dispositifs. Dans le principe de base, le système de protection lors de la constatation d'un défaut, génère un arc électrique (déclenchement mécanique, ou bien claquage). La protection n'est alors assurée que lorsque l'arc est éteint. L'arc est généré dans un milieu plasma

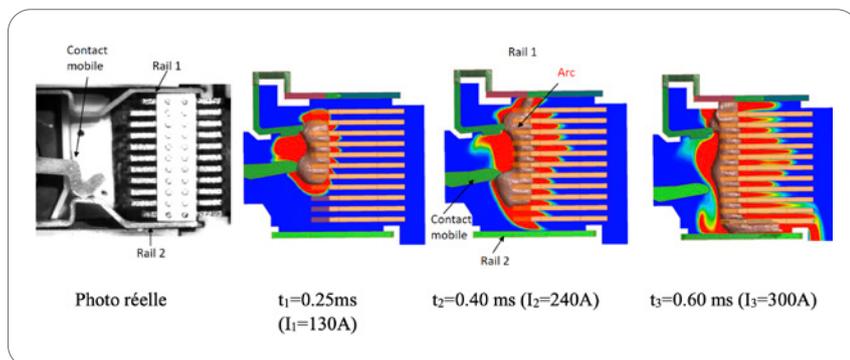
constitué de la nature du gaz présent initialement et des vapeurs métalliques et organiques provenant des contacts et des boîtiers. La description de tels milieux est complexe et nécessite des compétences en calcul de propriétés pour caractériser le milieu, la prise en compte de pièces en mouvement, des modélisations avec une physique spécifique pour la description de l'accrochage de l'arc. Ces études font appel à des modélisations fluides, multi physiques, appuyées sur des campagnes expérimentales réalisées sur des maquettes simplifiées qui permettent d'isoler les phénomènes et de conforter les modélisations qui sont ensuite appliquées aux prototypes ou dispositifs réels existants.

CONTACT

**Pierre Freton**

Professeur,  
Université de Toulouse  
[pierre.freton@laplace.univ-tlse.fr](mailto:pierre.freton@laplace.univ-tlse.fr)

Pour couper l'arc et rendre au milieu sa rigidité diélectrique, il existe principalement deux méthodes : (1) on « profite » du passage par zéro du courant alternatif pour le souffler, (2) on utilise ses propriétés intrinsèques et des chutes de tension dues aux interactions avec des matériaux pour créer une limitation du courant. Dans les deux cas, il s'agit d'une coupure « naturelle » sans intervention d'un opérateur. Dans le premier, une onde de surpression est générée en phase de fort courant et c'est elle qui lors du zéro du courant vient souffler l'arc. Dans le second cas, on force l'arc à entrer dans une chambre constituée d'une superposition de « lames » pour multiplier les chutes de tension et créer une limitation. L'équipe AEPPT, de par son expertise, a lié de solides collaborations et accompagne depuis de nombreuses années ses partenaires industriels tout en favorisant la diffusion scientifique et la formation de doctorants.



Modélisation 3D temporelle de l'ouverture des contacts d'un disjoncteur basse tension. La zone chaude du plasma est représentée en 3D par l'iso température 10000K, la zone périphérique de couleur rouge est supérieure à 3 000K et est représentée dans un plan de coupe 2D du disjoncteur. La variable  $I$  correspond au courant circulant entre les contacts lors de leur ouverture.

PUBLICATION

**Numerical simulation of vacuum arc under different axial magnetic fields and different erosion rates**

C. Simonnet, P. Freton,  
J.J. Gonzalez, F. Reichert,  
A. Petchanka

Plasma Physics and  
Technology  
11(1):12–15,  
2024

<http://dx.doi.org/10.14311/ppt.2024.1.12>

# Propagation des ondes électromagnétiques dans les plasmas

COMMENT PROTÉGER NOS SYSTÈMES DE COMMUNICATION SANS FIL GRÂCE À UN PLASMA ?

**Les systèmes de communication sans fil de plus en plus intégrés sont vulnérables aux agressions électromagnétiques. Les dispositifs de protection actuels montrent leurs limites face à la puissance croissante de ces agressions. Nous avons développé une nouvelle solution basée sur une ligne micro-ruban suspendue et une décharge plasma offrant une protection efficace avec des performances expérimentales et numériques prometteuses.**

D'un point de vue scientifique, grâce à une double approche théorique et numérique pour décrire les interactions ondes/plasmas et aux expériences menées en environnement de laboratoire, une compréhension globale du fonctionnement du limiteur plasma a pu être acquise. Nous avons pu établir théoriquement et valider expérimentalement le temps de réponse du limiteur plasma lié à la propagation du front d'ionisation, le temps de recouvrement lié à la décroissance du plasma et la puissance de fuite liée à la puissance minimale nécessaire pour entretenir la colonne de plasma. Les travaux théoriques nous ont permis de décrire précisément les modes de couplage onde/plasma qui se

manifestent dans ce type de topologie. Selon les conditions de densité électronique, des ondes de surface et des ondes de fuite peuvent exister et se propager dans le dispositif.

D'un point de vue technologique, un prototype compact (175 mm x 80 mm x 3.7 mm) et autonome (sans alimentation en gaz) a été réalisé. Il est conçu sur la base d'un assemblage par pressage moléculaire de 3 substrats ROGERS RO4003C combiné au collage d'une capsule en verre soudée définitivement après remplissage avec le gaz d'argon à 10 torr (voir illustration).

Le dispositif final permet d'une part de répondre instantanément à une agression électromagnétique (typiquement dans un temps de l'ordre

## CONTACT

### Thierry Callegari

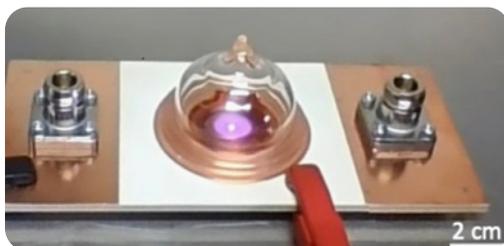
Professeur,  
Université de Toulouse,  
[thierry.callegari@laplace.univ-tlse.fr](mailto:thierry.callegari@laplace.univ-tlse.fr)

### Laurent Liard

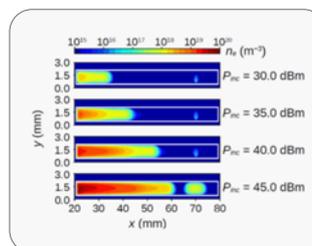
Maître de Conférences,  
Université de Toulouse  
[laurent.liard@laplace.univ-tlse.fr](mailto:laurent.liard@laplace.univ-tlse.fr)

de la nanoseconde) et d'autre part de soutenir des puissances d'agression très élevées jusqu'à ~ 2 kW en mode pulsé (largeur typique de 50  $\mu$ s) avec une puissance de fuite très faible (15 dBm), soit inférieure à 32 mW.

Cette étude est le fruit de deux thèses (A. SIMON, 2018 et L. FUSTER, 2023) d'un travail collaboratif dans le cadre de deux ANR, DIOMEDE 1 et 2, associant le LAPLACE, l'ISAE-SUPAERO, le CEA Gramat et la société ANYWAVES. Elle entre dans le cadre plus général des nombreux travaux menés au LAPLACE dans les groupes GREPHE et GRE en collaboration étroite avec l'ISAE-SUPAERO dans le domaine des interactions ondes/plasmas. Nous étudions en particulier les problématiques de contrôle de la propagation des ondes par les plasmas, la conception de nouvelles sources micro-ondes pour les plasmas, le bruit électromagnétique produit par les plasmas ou encore l'interaction de ces ondes avec des plasmas en mouvement.



Photographie du dispositif planaire de protection plasma contre les agressions électromagnétiques. Il est constitué d'un assemblage de 3 substrats ROGERS RO4003C et d'une capsule en verre enfermant un gaz d'Argon à 10 Torr. La puissance microonde à 3 GHz injectée par un des connecteurs est transmise via une ligne micro-ruban au connecteur de sortie. Une puissance incidente élevée entraîne la génération d'un plasma qui absorbe et réfléchit l'onde incidente protégeant ainsi la sortie.



Simulation numérique du profil de la densité des électrons pour 4 puissances incidentes (plan de coupe vertical de la ligne micro-ruban reliant les 2 connecteurs).

## PUBLICATION

**Microwave plasma interaction in a printed transmission line for a power limiting application: from surface-wave-sustained to leaky-wave-sustained discharge**

Lucas Fuster, Romain Pascaud, Jérôme Sokoloff, Gerjan Hagelaar, Patrick Hoffmann, Olivier Pascal and Thierry Callegari

Plasma Sources Sci. Technol. 33 (2024) 065007

<https://doi.org/10.1088/1361-6595/ad53fd>

# Impact majeur des phénomènes réversibles sur les piles à combustible PEM-BT

PRISE DE CONSCIENCE ET CONSÉQUENCES SUR LES ESSAIS DE VIEILLISSEMENT

**Le LAPLACE réalise des essais de vieillissement complexes depuis de nombreuses années. Cette année 2024 aura été marquée par la prise de conscience de l'impact majeur des phénomènes réversibles (engorgements très lents) sur l'accélération du vieillissement pour la technologie PEMFC-BT si leur expansion n'est pas minimisée. Cela a pour conséquence de repenser profondément la façon de réaliser les essais de vieillissement traditionnellement réalisés en laboratoire.**

Les phénomènes « réversibles » sont des phénomènes identifiés au sein des PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell). Pour autant, ils demeurent assez mal connus en détail et restent délicats à maîtriser. On peut noter un intérêt accru au cours de ces dernières années à leur sujet, sachant qu'ils ont été jusqu'ici plus ou moins subis dans la très grande majorité des cas.

Les phénomènes « réversibles » sont ainsi nommés car leur impact négatif sur les performances sur PEMFC peut être en partie effacé par différentes actions (arrêts/ démarrages, séquence spécifique à tensions élevées au niveau cellule, etc.). Les deux grandes origines de ces phénomènes, qui se dégagent de la littérature, sont l'engorgement progressif des couches catalytiques et les résidus d'oxydes de platine suite

aux cyclages répétés d'oxydation/ réduction du catalyseur au sein des PEMFC. Ces deux phénomènes ont en commun de s'exprimer sur des temps longs de fonctionnement de plusieurs dizaines d'heures à minima.

Au cours du projet ECH2\* (Efficient control of hydrogen systems), financé par l'ADEME et portant sur la mobilité lourde de type poids lourds, le LAPLACE a été amené à prendre du recul sur une dizaine d'années d'essais de vieillissement face aux résultats expérimentaux assez surprenants obtenus. Un constat est apparu assez clairement : à chaque fois que les phénomènes réversibles ont émergé de manière significative, un vieillissement accéléré a été observé, conduisant systématiquement à un arrêt des essais de par l'augmentation trop élevée du crossover d'hydrogène. C'est

CONTACT

**Christophe Turpin**

Directeur de Recherche,  
CNRS

Responsable des activités  
hydrogène du LAPLACE

[turpin@laplace.univ-tlse.fr](mailto:turpin@laplace.univ-tlse.fr)

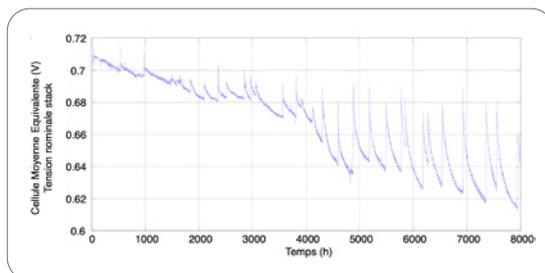
le cas typiquement de campagnes très classiques de vieillissement à courant constant avec des arrêts peu fréquents, typiquement toutes les 150 à 200 heures, pour réaliser quelques mesures afin de suivre le vieillissement.

Face à ces observations répétées, une action à moyen terme est naturellement de chercher à expliquer finement cette accélération du vieillissement. A plus court terme, le LAPLACE a commencé à repenser radicalement la façon de réaliser certains des essais classiques afin de ne pas générer de vieillissement accéléré, ou a minima de quantifier le vieillissement accéléré ainsi généré. Une des idées est d'inclure, par exemple dans les profils de cyclage, des séquences régénératives comme des arrêts/ démarrages réguliers à l'instar des applications réelles des systèmes énergétiques H<sub>2</sub>.

\* Partenaires projet ECH2 : Vitesco Technologies (Schaeffler Group), IFP Energies nouvelles (IFPEN), Laplace et Siemens Industry Software et ALSTOM Hydrogène (HELION Hydrogen Power).



Banc de test pour piles à combustible PEM-BT fabriqué et utilisé par le LAPLACE.



Essais de vieillissement à courant constant (8000h) sans maîtrise des phénomènes réversibles (« effet accordéon » sur la tension qui s'accroît).

PUBLICATION

**Phénomènes réversibles au sein des PEMFC : état de l'art, retour d'expérience, réflexions et suggestions**

C. Turpin, M. Grignon, M. Tognan, E. Soyez, A. Jaafar, O. Rallières

Plénières de la Fédération CNRS FRH2, 7-11 octobre 2024, La Grande Motte.  
Présentations des Plénières 2024

# Optimisation topologique de circuits magnétiques 3D avec des contraintes mécaniques

DE LA THÉORIE MATHÉMATIQUE À LA RÉALISATION  
PAR IMPRESSION 3D

**A partir des équations de la mécanique et de la magnétostatique, nous avons mis au point plusieurs méthodes d'optimisation topologique hybridant ces deux physiques afin de concevoir des circuits magnétiques en 3D. Ces recherches partent des mathématiques appliquées pour les calculs efficaces des dérivées, permettant ainsi des développements de codes scientifiques spécifiques. Ces travaux ont notamment abouti à la réalisation d'un prototype par impression additive.**

Dans le cadre de la thèse de Zakaria Houta, nous avons pu étendre les méthodes d'optimisation topologique en magnétostatique 2D au cas de la 3D, en y intégrant des contraintes mécaniques sur la structure de l'actionneur considéré. Les approches ainsi développées ont permis de formuler de nouveaux problèmes adjoints pour le cas de la 3D ; ceux-ci sont directement impliqués dans les calculs efficaces des dérivées de problèmes d'optimisation avec contraintes EDPs (équations aux dérivées partielles). De nouveaux théorèmes ont ainsi vu le jour, ouvrant la voie au développement d'algorithmes d'optimisation topologique très performants pour la résolution de problèmes de magnétostatique en 3D. De premiers résultats numériques

de design de circuits magnétiques 3D ont validé notre approche. Dans [1], un premier couplage en 3D de deux physiques incluant les équations de la magnétostatique et de la mécanique a pu être réalisé, montrant ainsi l'intérêt de prendre en compte des contraintes mécaniques dès la toute première phase de conception de ces circuits magnétiques 3D. Les résultats issus de [1], ont permis de concevoir un premier prototype par impression 3D (effectuée au CIRIMAT), visible sur l'illustration ci-contre. La vérification expérimentale de la tenue mécanique, ainsi que l'étude des performances magnétiques de cet actionneur, vont être effectuées très prochainement sur l'un des bancs de tests du groupe GREM3. Tout dernièrement, de nouvelles approches d'optimisation topologique et de forme

## CONTACT

—  
**Frédéric Messine**

Professeur,  
Toulouse INP  
[frederic.messine@laplace.univ-tlse.fr](mailto:frederic.messine@laplace.univ-tlse.fr)

basées sur les méthodes « level-set » ont été développées dans le cas de couplage de ces deux physiques et toujours en 3D. Ces nouvelles approches ont donné des résultats sensiblement meilleurs que ceux obtenus par les approches publiées [1] et elles ont fait l'objet d'une présentation à ISMP (International Symposium in Mathematical Programming) en juillet dernier [2]. Zakaria va soutenir sa thèse au premier trimestre 2025 et ces nouvelles méthodes d'optimisation topologique vont très prochainement être utilisées pour optimiser le design en 3D d'un propulseur plasma de satellites.

## PUBLICATION

—  
[1] **Solid Isotropic Material with Penalization-Based Topology Optimization of Three-Dimensional Magnetic Circuits with Mechanical Constraints**

Z. Houta, T. Huguet, N. Lebbe,  
F. Messine

MDPI, Mathematics (2024), 12, 1147.

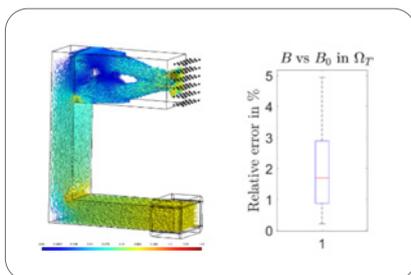
<https://doi.org/10.3390/math12081147>

—  
[2] **Level Set-Based Topology Optimization Of 3D Magnetic Circuits With Mechanical Constraints**

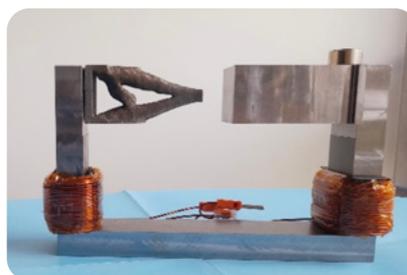
Z. Houta, N. Lebbe, T. Huguet,  
F. Messine

ISMP, Montréal, (juillet 2024).

<https://ismp2024.gerad.ca/schedule/ThB/318>



Conception optimale d'un dispositif électromagnétique à l'aide d'optimisation topologique basée sur des méthodes de densité 3D sous contraintes électromagnétiques et mécaniques



Prototype expérimental partiellement construit par impression 3D.

# Le LAPLACE se lance dans la valorisation du CO<sub>2</sub> par plasma froid !

UNE NOUVELLE THÉMATIQUE À L'INTERFACE ENTRE PLASMAS, CHIMIE ET PROCÉDÉS

**L'équipe ScIPRA du LAPLACE a commencé l'étude des DBD de CO<sub>2</sub> en 2021. Initialement fondamentaux, les travaux menés se tournent désormais vers le développement de procédés de valorisation du CO<sub>2</sub> pour la synthèse de molécules à haute valeur ajoutée. Cette thématique émergente fédère à présent autour d'elle 5 laboratoires français impliqués dans différents projets portés par le site toulousain (LAPLACE, LCC, GREMI, LPP, ICMUB).**

Les changements climatiques auxquels nous assistons ont pour origine l'activité anthropique et en particulier l'émission de gaz à effet de serre au premier rang desquels figure le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Dans ce contexte, le piégeage du CO<sub>2</sub> et son recyclage apparaissent comme un des leviers d'action. Une des approches utilisées pour rendre les molécules de CO<sub>2</sub> réactives consiste à leur apporter de l'énergie en utilisant des plasmas. Jusqu'à présent, l'essentiel des travaux dans ce domaine portait sur la synthèse de molécules de type C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>O<sub>z</sub> réutilisables comme combustibles.

L'équipe ScIPRA du LAPLACE a

commencé l'étude des décharges à barrières diélectriques (DBD) de CO<sub>2</sub> en 2021, initialement sur des aspects fondamentaux dédiés à l'étude du comportement de la décharge et de sa physico-chimie (thèse financée dans l'AOI de l'UT3). L'équipe collabore par ailleurs depuis de nombreuses années avec le LCC (Toulouse) et l'ICMUB (Dijon) pour la synthèse de nouveaux matériaux. C'est dans ce cadre pluridisciplinaire qu'est née l'idée de développer de nouvelles voies de synthèses chimiques assistées par plasma et dédiées à la valorisation du CO<sub>2</sub>. En particulier, un objectif est de parvenir à synthétiser des molécules à haute valeur ajoutée, telles que certaines produites dans l'industrie

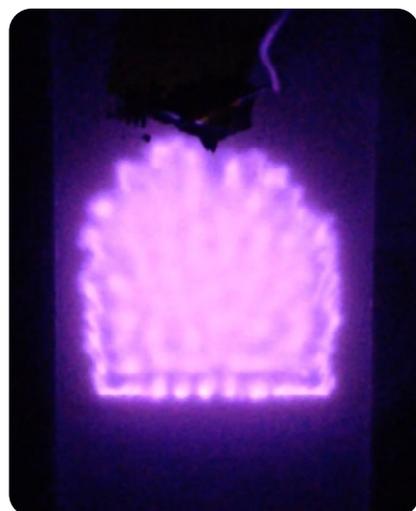
pharmaceutique, via l'insertion sélective de CO<sub>2</sub> préalablement activé par plasma sur des alcènes. Les essais préliminaires se sont rapidement révélés concluants.

Un premier soutien du CNRS à travers le financement d'un PEPS porté par le LAPLACE nous a permis de concevoir un dispositif expérimental adapté et de poursuivre nos investigations. Le soutien du CNRS a ensuite été renouvelé à travers le financement d'un projet de prématuration porté par le LCC qui a démarré cette année. Enfin, le projet ANR COVADIS porté par le LAPLACE vient de débuter. Ce dernier vise plus spécifiquement à explorer les mécanismes réactionnels et cinétiques à l'œuvre dans le plasma. Pour cela, deux nouveaux laboratoires, le LPP (Palaiseau) et le GREMI (Orléans), ont rejoint le consortium initial. L'année 2024 marque donc véritablement l'émergence de cette nouvelle thématique au sein du groupe ScIPRA.

## CONTACT

—  
**Simon Dap**

Maître de conférences,  
Université de Toulouse  
[simon.dap@laplace.univ-tlse.fr](mailto:simon.dap@laplace.univ-tlse.fr)



Photographie d'une Décharge à Barrière Diélectrique (DBD)

## PUBLICATION

—  
**Homogeneous dielectric barrier discharge in CO<sub>2</sub>**

C. Bajon, S. Dap, A. Belinger,  
O. Guaitella, T. Hoder and  
N. Naudé

Plasma Sources Sci. Technol. 32  
(2023) 045012

<https://doi.org/10.1088/1361-6595/acc9d9>

# Du transistor de puissance à sa commande rapprochée, des avancées majeures

TRANSISTOR DIAMANT, MOSFET SiC, ÉTAT DE SANTÉ, ACTIVE GATE DRIVER

**Des avancées majeures ont été obtenues en 2024 dans le groupe Convertisseurs Statiques (CS), avec des collaborations au premier plan mondial. Deux faits marquants sont présentés : la conception et la démonstration expérimentale d'un transistor diamant à calibre en courant record, et la surveillance de l'état de santé en temps réel et à haute précision d'un MOSFET SiC au sein d'un bras d'onduleur.**

Le groupe CS du Laplace est engagé dans des travaux de recherche «en rupture» pour l'augmentation des performances des convertisseurs statiques, par l'innovation dans les topologies multi-cellulaires, les méthodologies de dimensionnement multi-physique, les composants semi-conducteurs de puissance à matériaux (ultra) grands gaps, la commande électronique rapprochée, la robustesse en régime intense de contraintes et la tolérance aux pannes. Cette année, les résultats majeurs suivants sont mis en avant :

Pour aller au-delà des performances déjà exceptionnelles des transistors GaN et SiC, un transistor en diamant a été conçu et validé expérimentalement, avec un calibre en courant ayant le record mondial pour une conduction volumique [1]. Ces travaux sont issus du projet européen DCADE (clean aviation), en collaboration étroite avec la startup DIAMFAB et l'institut Néel (UPR CNRS, Grenoble). La thématique est d'autre part très active, via le projet ANR LSDMOS, et le démarrage du PEPR électronique FrenchDiam en 2024, projets

structurants et d'ampleur, ainsi que des collaborations directes avec DIAMFAB. Le groupe est ainsi associé aux résultats sur le sujet avec 10 communications en 2024, plusieurs transistors diamant packagés pour la première fois, et le dépôt d'un projet d'envergure (ADEME).

La maîtrise de la fiabilité du MOSFET SiC est un enjeu de premier plan pour la conversion d'énergie à haute performance dans les applications critiques embarquées (automobile) et à longue durée d'usage (ferroviaire et aéronautique). Dans le cadre d'une collaboration initiée en 2019 avec Safran Tech (Saclay) et la thèse Cifre en cours de Mathis Picot-Digoix, une approche originale de surveillance de l'état de santé de l'oxyde de grille a été développée en 2024 permettant, pour la première fois au niveau mondial, un diagnostic complet en temps réel et à haute précision au sein même d'un bras d'onduleur. Basée sur l'insertion synchronisée d'une commutation d'amorçage spécialement ralentie grâce à une architecture de gate-driver parallèle, deux variantes de prototypes (numérique

## CONTACT

### Nicolas Rouger

Directeur de Recherche, CNRS  
Transistor de puissance en diamant  
[nicolas.rouger@laplace.univ-tlse.fr](mailto:nicolas.rouger@laplace.univ-tlse.fr)

### Frédéric Richardeau

Directeur de Recherche, CNRS  
Fiabilité semi-conducteur à grand-gap  
[frederic.richardeau@laplace.univ-tlse.fr](mailto:frederic.richardeau@laplace.univ-tlse.fr)

et analogique) permettent d'extraire et d'archiver en temps masqué de multiples indicateurs (dont  $V_{G\text{STH}}$ ) avec une précision finale inégalée en temps réel de 0.3%. Brevetée en 2024, cette innovation a été présentée à l'échelon mondial en conférence et publiée dans IEEE [2].

## PUBLICATIONS

### Transistor de puissance en diamant Projet européen DCADE

#### [1] Over 50 mA current in interdigitated diamond field effect transistor

D. Michez, J. Letellier, I. Hammas, J. Pernot, N. Rouger

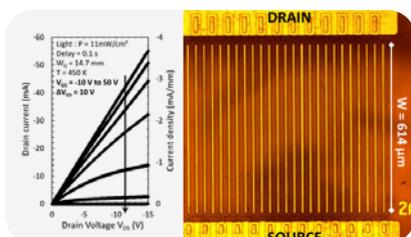
IEEE Electron Device Letters, 2024

### Fiabilité semi-conducteur à grand-gap

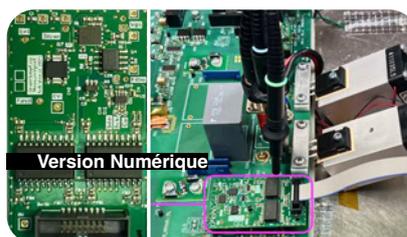
#### [2] Gate Voltage Dip as a New Indicator for On-Line Health Monitoring of SiC MOSFETs.

M. Picot-Digoix, F. Richardeau, J.M. Blaquièrre, S. Vinnac, S. Azzopardi, et al.

IEEE Transactions on Power Electronics, 2024



a) Image microscope optique du transistor interdigité diamant à effet de champ pour augmentation du calibre en courant (collaboration DIAMFAB).



b) Prototypage pour la surveillance de l'état de santé de l'oxyde de grille d'un MOSFET SiC en MLJ au sein d'un bras d'onduleur 600V/20kHz par le suivi de la dérive de sa tension de seuil ( $V_{G\text{STH}}$ ).



c) Collaboration Safran-Tech Saclay – Safran Electrical Power. Application : hybridation électrique de moteur d'avion sous contraintes ambiantes extrêmes.

# Antennes de type réseau transmetteur à balayage et formation électronique de faisceau

APPLICATIONS TÉLÉCOM À HAUT DÉBIT, APPLICATIONS SATELLITAIRES, AÉRONAUTIQUE (AÉRODYNAMIQUE)

**L'apparition de constellations de satellites en orbite basse, fonctionnant dans la bande millimétrique, a renforcé le besoin d'antennes compactes, large bande et très directives. L'étude de solutions faible coût, à faible profil géométrique, faciles à fabriquer, à faibles pertes sur une large bande en fréquences et en dépointage est donc un défi de recherche d'importance que notre design a su relever grâce à la conception de réseaux transmetteurs passifs puis actifs en bandes X et Ka.**

De nombreuses applications imposent l'utilisation d'antennes très directives à reconfiguration de faisceau(x) (dépointage de faisceau, antennes multifaisceaux, etc.). De telles applications concernent notamment le secteur spatial, le secteur automobile (radars d'assistance à la conduite en bande K et en bande W), ou encore les systèmes de communication à courte portée et haut débit. À plus long terme, des applications sont envisagées dans les domaines de l'imagerie ou la télé-détection dans les bandes millimétriques élevées ou submillimétriques. Nos études se situent dans le contexte de la conception d'antennes compactes, large bande et très directives pour des applications spatiales. Le balayage et la formation du faisceau est obtenu soit mécaniquement, soit électroniquement via des réseaux alimentés par lignes. Ces deux solutions contribuent à l'augmentation des coûts de production avec, de surcroît, une perte d'efficacité liée aux pertes d'insertion

dans le cas des réseaux alimentés. La topologie de notre antenne permet de résoudre ces problèmes.

Durant ce projet, nous avons appliqué une nouvelle méthodologie de conception de la cellule active. Nous avons ajusté les critères d'optimisation de la cellule unitaire pour tenir compte de sa performance lors de dépointages importants de l'ordre de  $\pm 50^\circ$ , permettant de suivre la cible (satellite, avion ...) en temps réel sur une large ouverture angulaire ( $100^\circ$ ). De plus, pour réduire l'augmentation de la polarisation croisée lors du dépointage, nous avons intégré un schéma de rotation séquentielle interne des patches Tx, exploitant ainsi l'effet de phase Pancharatnam-Berry. Grâce à cette approche, nous avons optimisé le calcul de la loi de phase pour améliorer les performances en rayonnement. La nouvelle conception a montré une réduction significative de la polarisation croisée dans toutes les directions de pointage.

## CONTACT

**Hamza KAOUACH**

Maître de Conférences,  
Toulouse INP

[hamza.kaouach@laplace.univ-tlse.fr](mailto:hamza.kaouach@laplace.univ-tlse.fr)

Pour valider ce design, nous avons fabriqué un réseau actif de 400 cellules. Le gain maximal mesuré pour ce réseau est de 21,6 dBi et la bande passante est supérieure à 6 GHz avec un rapport axial inférieur à 3 dB. Les performances en dépointage ont confirmé que le réseau permet de dépointer le faisceau sur une très large ouverture allant jusqu'à  $\pm 50^\circ$ , voire même  $\pm 60^\circ$ . La comparaison avec l'état de l'art révèle que notre conception offre des bandes passantes plus larges, des faibles pertes et une bonne efficacité.

## BREVET

### Cellule Transmit-Arrays

**(TA) active** (Cellule unitaire reconfigurable de type réseau transmetteur à conversion de polarisation linéaire (PL) vers circulaire (PC) large bande (UWB) avec circuit de polarisation et commande).

A. Cabral, H. Kaouach, A. Barka

Déposé le 13/03/2024, France,  
Patent n° : B2301116FR. 2024  
(Brevet INPI 23.07788)

## PUBLICATION

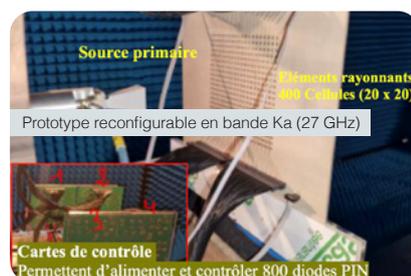
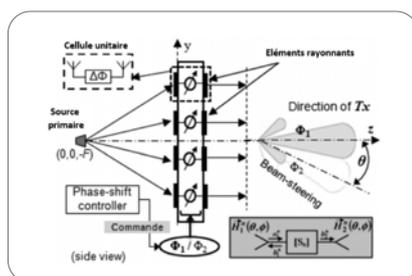
### Novel Wideband and High Efficiency Circularly Polarized Transmit-arrays Demonstration in X and Ka-band

A. Cabral, H. Kaouach, A. Barka,

IEEE OJAP Open Journal of Antennas and Propagation, Mars 2024

DOI: 10.1109/OJAP.2024.3409746

**Prix de la meilleure thèse de la branche Physique à l'ONERA 2024**



Antenne de type réseau transmetteur : topologie antennaire permettant de piloter électroniquement le pointage d'un faisceau initial issu d'une source primaire grâce à un réseau planaire en transmission. Dispositifs utilisés pour suivre une cible en mouvement dans les domaines aéronautique et spatial.  
Figure à gauche : Schéma d'une antenne de type réseau transmetteur.  
Figure à droite : Dispositif réel sous test dans une chambre anéchoïque.

# Mécano-luminescence : un nouvel outil pour diagnostiquer la rupture de liaisons chimiques sous contrainte mécanique

## CONTACT

### Gilbert Teyssède

Directeur de Recherche, CNRS  
gilbert.teyssede@laplace.univ-tlse.fr

### Jean-Louis Augé

Maître de Conférences,  
Université de Toulouse  
jean-louis.auge@laplace.univ-tlse.fr

## DÉMONSTRATION DE LA FAISABILITÉ DE LA MESURE DE MÉCANO-LUMINESCENCE SUR RÉSINES ÉPOXYDES

**L'identification de marqueurs de la dégradation de matériaux sous contrainte ouvre la voie à du suivi de leur état de santé en service. Pour les isolants électriques, ce sont des contraintes couplées électriques-mécaniques-thermiques qui sont en jeu dans le vieillissement. La démonstration d'une émission de luminescence liée à de la rupture de liaisons et à des réactions chimiques consécutives dans des résines époxydes vient d'être démontrée dans l'équipe DSF.**

Les effets électriques-mécaniques couplés sont reconnus comme des processus par lesquels les isolants électriques polymères 'vieillissent' sous l'action d'une contrainte électrique, ce qui est rencontré notamment en environnement haute tension. Par exemple, une fissuration sous la forme d'arborescence se produit amenant à la rupture. Pour déceler et comprendre ces effets, la luminescence paraît un outil intéressant. En effet, cette méthode est sensible et fournit une information spectroscopique sur les espèces chimiques mises en jeu. La lumière émise est détectée simultanément avec l'application d'une contrainte, ce qui constitue un autre avantage de la technique. La thèse en cours de Bap-

tiste Robbiani s'attache à analyser les signaux issus de contrainte mécanique pure ou couplée à des contraintes thermiques et électriques.

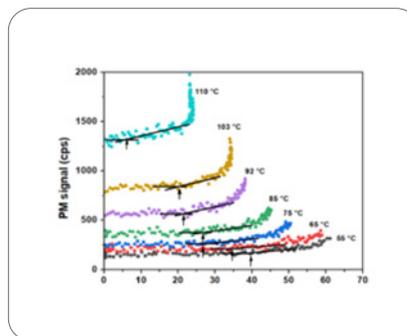
Un banc de mesure de mécano-luminescence a été mise en place et des résultats très prometteurs ont été obtenus sur des résines époxydes : un signal de luminescence est effectivement détecté dans les régimes de déformation mécanique élastique et plastique, de manière plus importante avec la température. Pour les résines étudiées, ces effets sont produits au-dessus de la température ambiante, et requièrent de l'oxygène dans le milieu ambiant. Des spectres d'émission de lumière ont pu être enregistrés et sont semblables à ceux obtenus pour une contrainte pure-

ment thermique. Des ruptures de liaisons se produiraient sur les nœuds de réticulation du réseau et la luminescence proviendrait des mécanismes d'oxydation consécutifs à ces ruptures de liaisons. Ce travail ouvre la voie à une visualisation directe de l'endommagement et sera poursuivi en combinant des contraintes électriques et mécaniques.

Les premières communications de ce travail ont été faites par le biais de conférences et un article de revue dans Polymer Degradation and Stability. Le prix du meilleur article de Jeune Chercheur a été obtenu à International Conference on Dielectrics qui s'est tenue à Toulouse en Juillet 2024. Baptiste Robbiani a également un obtenu pour son travail sur la mécano-luminescence une Graduate Fellowship, décernée par la Dielectrics and Electrical Insulation Society (DEIS), qui est une subvention prestigieuse permettant à son lauréat d'explorer davantage un sujet de recherche dans les domaines de l'isolation électrique et des phénomènes diélectriques.



Éprouvette soumise aux contraintes mécaniques et thermiques



Principe et résultats de mesure de mécano-luminescence sur une résine époxyde : la rupture de liaisons sous traction mécanique est décelée par luminescence. La figure de droite donne l'intensité de lumière émise par la résine d'époxy (ordonnées) en fonction de la contrainte de traction mécanique (abscisses) et de plusieurs températures (de 55°C à 100°C). Les courbes montrent une augmentation brutale de l'intensité à partir d'un seuil de traction traduisant la rupture de liaisons de certaines molécules constitutives de l'époxy.

## PUBLICATION

### Mechanoluminescence driven by oxidation reactions in epoxy resins

Baptiste Robbiani, Jean-Louis Augé, Gilbert Teyssède

Polymer Degradation and Stability  
232, 111101-1/10, 2025

# Des recherches pour les nouvelles générations de diodes électroluminescentes organiques (OLED) plus écologiques

**Les diodes électroluminescentes organiques (OLED) sont des technologies émergentes pour des applications d'éclairage et d'affichage. Les électrodes conductrices transparentes jouent un rôle crucial dans la fonctionnalité des OLED. Ils sont constituées par des films minces d'oxyde d'indium et d'étain (ITO) qui présentent plusieurs inconvénients liés à une flexibilité limitée, à la rareté des matériaux et aux coûts des processus de fabrication. Dans cette étude, avec le LGC et le CIRIMAT, nous avons utilisé un nouveau type de films organiques qui remplacent l'ITO grâce au procédé de dépôt chimique en phase vapeur par oxydation.**

Dans le fonctionnement des diodes électroluminescentes organiques (OLED), les propriétés des électrodes conductrices transparentes (TCE) sont cruciales. Effet, celles-ci assurent une distribution homogène du potentiel électrique permettant d'activer les propriétés électroluminescentes des matériaux qu'elles recouvrent de part et d'autre. Elles doivent donc être à la fois conductrices d'électricité et transparentes pour laisser passer la lumière émise par les matériaux organiques. A l'heure actuelle, les TCE sont essentiellement réalisées à base d'oxyde d'indium et d'étain (ITO). Cependant, plusieurs problèmes se posent, notamment économiques, écologiques et pratiques. En effet, les ressources principales d'indium se trouvent en Chine, qui en a profité pour maintenir un niveau élevé du cours du matériau brut. D'autre part, la rigidité d'ITO n'en fait pas un bon candidat pour les dispositifs souples. De plus, son procédé de fabrication est coûteux en raison de contraintes techniques et de

la rareté de l'indium. Par ailleurs, les composés d'Indium s'avèrent être fortement toxiques. Nos activités de recherche nous ont amené à concevoir de nouveaux types de films à base de matériaux (à base de carbone) potentiellement moins toxiques, plus performants et moins coûteux, tel que le polymère PEDOD poly (3,4 éthylène dioxythiophène). Par le biais d'un nouveau procédé de dépôt chimique en phase vapeur par oxydation (oCVD) mis en place par le LGC et le CIRIMAT, nous avons réussi à contrôler la température du substrat de dépôt pour améliorer la conductivité (de plus de 1600 S/cm) et la transmittance optique du film de PEDOT (97%) pour un film de 45 nm d'épaisseur. Les changements dans les propriétés du film de polymère conjugué ont été principalement attribués aux modifications de la structure moléculaire et de la composition chimique du PEDOT, ainsi qu'à l'augmentation du niveau de dopage. La surface lisse du PEDOT par oCVD a donc pu permettre la fabrication de dis-

positifs OLED diminuant, d'une part, les phénomènes de recombinaison dans le volume de la TCE de PEDOT et d'autre part, favorisant le transfert de charges vers les couches émissives. Ainsi, nous avons pu réaliser une preuve de concept de dispositifs OLED émettant dans bleu profond (< 450 nm) conçus sur des substrats en verre présentant une luminance de 72,1 cd/m<sup>2</sup> et une radiance de 0,86 W/Sr.m<sup>2</sup>. Nous avons obtenu un rendement quantique externe (EQE) de 1% et une couleur stable correspondant à un point de couleur selon coordonnées CIE - Commission Internationale de l'Éclairage de (0,15, 0,08). Par comparaison, un dispositif de référence basé sur l'ITO comme TCE a également été développé, montrant que les OLEDs avec une TCE de PEDOT présente des performances légèrement supérieures en termes de luminance et de radiance, avec une augmentation de 8,35 cd/m<sup>2</sup> et 0,25 W/sr.m<sup>2</sup>, respectivement. En outre, l'EQE a été augmentée d'un facteur de 1,7. D'autre part, une seconde preuve de concept a été réalisée à savoir la fabrication d'OLEDs sans ITO sur supports flexibles et conformables. Ces résultats mettent en évidence le potentiel de la couche mince de PEDOT oCVD comme alternative prometteuse à l'ITO pour les dispositifs OLED à grande échelle et plus largement pour les applications optoélectroniques organiques de la prochaine génération.

## CONTACT

**Cédric Renaud**

Maître de Conférences,  
Université de Toulouse  
[cedric.renaud@laplace.univ-tlse.fr](mailto:cedric.renaud@laplace.univ-tlse.fr)



OLEDs émettant dans le bleu profond (< 450 nm) avec une électrode conductrice transparente sans ITO réalisées sur substrat (a) rigide, (b) flexible/conformable

## PUBLICATION

**Single-Step PEDOT Deposition by oCVD for ITO-Free Deep Blue OLED**

A.Sekkat, H. El Housseiny, et al.

ACS Applied Polymer Materials,  
ACS Appl. Polym. Mater. 2023, 5,  
12, 10205–10216 (2023)

<http://dx.doi.org/10.1021/acsapm.3c02019>

# Élimination des polluants pharmaceutiques dans l'eau par la décharges corona pulsée et étude de la toxicité des sous-produits générés

**Un réacteur corona optimisé a été mis en place et utilisé pour dégrader les fortes concentrations des polluants pharmaceutiques pouvant se retrouver dans l'eau. Après 30 minutes de traitement, on observe une dégradation de 60 % de la concentration initiale des 500 mg/L du paracétamol (soit 0,52 g/kWh). Les analyses chimiques ont permis d'identifier et de caractériser deux nouveaux sous-produits d'oxydation du paracétamol. Une analyse de la toxicité de ces sous-produits a montré que l'eau traitée pouvait être consommable.**

Les concentrations de polluants d'origines pharmaceutiques deviennent de plus en plus importantes dans les eaux en raison de l'accroissement de la consommation de produits pharmaceutiques. Malheureusement, les procédés classiques de dégradation de ces produits ne peuvent pas répondre à une telle croissance à cause de leur consommation énergétique trop importante. Pour satisfaire aux attentes, un réacteur plasma a été développé utilisant des décharges électriques corona en interface avec l'eau polluée en capacité de traiter toutes sortes de polluants ou de contaminants même à des

concentrations élevées dans l'eau. Deux parties ont été étudiées dans cette activité de recherche prometteuse :

Une étude paramétrique de la décharge électrique a été effectuée pour optimiser la formation des espèces réactives de l'oxygène et de l'azote (RONS) en fonction de la distance inter électrode et de la puissance électrique. Les résultats ont montré qu'une augmentation de la distance inter électrode (allant de 4 à 10 mm) entraîne une diminution de la concentration en phase liquide des espèces stables  $H_2O_2$ ,  $NO_2^-$ ,  $NO_3^-$  (ions nitrates et nitrites) et de la conductivité de l'eau traité, tandis que la valeur du pH diminue de manière significative. De façon quantitative, l'augmentation de la tension appliquée de 4,5 à 10 kV (soit une augmentation d'un facteur 2.2) induit une augmentation des concentrations en  $H_2O_2$  et ions nitrates et nitrites respectivement de 0,11 à 110 mg/L (x 1000), de 0,91 à 150 mg/L (x 165) et 0,13 à 4,6 mg/L (x 35). En parallèle, la conductivité augmente de 3,4 à 467  $\mu S/cm$  (x 137) et le pH diminue de 6 à 3,45 (/ 1,7). L'augmentation des concentrations de RONS mesurées dans la phase liquide peut s'expliquer par le passage du régime corona-streamer (décharges arborescentes chimiquement actives) générant un courant de quelques centaines de mA au régime corona-spark (dissipant l'énergie sous forme thermique et de conduction) générant un courant de décharges de quelques ampères.

Le dispositif optimisé a été utilisé pour étudier la dégradation du paracétamol (500mg/l) dans l'eau en régime corona. Après 30 minutes de traitement, on atteint 60 % d'abattement avec une valeur d'efficacité énergétique de 0,52 g/kWh. Les analyses chromatographiques en phase liquide et gazeuse couplées à la spectroscopie masse nous ont permis d'identifier et de caractériser deux nouveaux sous-produits d'oxydation du paracétamol : N-(4-(4-hydroxyphénylamino) phényl) acétamide (m/z : 242) et N-(4-aminophényl) acétamide (m/z : 150). La majorité des sous-produits proviennent de la nitration du paracétamol ce qui est rendu possible par le régime de décharge corona pulsée produisant des électrons capables de dissocier les molécules d'azote de l'air. La grande variété d'espèces d'azote et d'oxygène formées dans la phase plasma, en accord avec l'analyse par spectroscopie d'émission de la phase gaz permettrait d'expliquer le phénomène de nitration. Les sous-produits d'oxydation identifiés ont révélé leur non-toxicité sur des lignées cellulaires saines, HEK-293, ouvrant ainsi un champ d'application très vaste comme le traitement des déchets hospitaliers et la valorisation par exemple des eaux décontaminées riche en azote pour l'irrigation des plantes.



*Dégradation de fortes concentrations des polluants pharmaceutiques (paracétamol) dans l'eau par décharges pulsées corona*

## CONTACT

### Nofel Merbahi

Professeur,  
Université de Toulouse  
merbahi@laplace.univ-tlse.fr

### Mohammed Yousfi

Directeur de Recherche, CNRS  
yousfi@laplace.univ-tlse.fr

## PUBLICATION

### Air Pulsed-Corona discharges for degradation of emerging pharmaceutical pollutants in water and toxicity by-products control

D. Iya-sou, N. Merbahi, J. Bouajila, and M. Yousfi,

Journal of Water Process Engineering 67 (2024)106127

<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106127>

# Nanomatériaux, procédés et synergie enseignement et recherche : le LAPLACE fédère !

## CONTACT

### Nicolas Naudé

Maître de Conférences,  
Université de Toulouse  
[nicolas.naude@laplace.univ-tlse.fr](mailto:nicolas.naude@laplace.univ-tlse.fr)

PLUS DE 130 CHERCHEURS ET ENSEIGNANTS-CHERCHEURS COLLABORENT ENTRE LA FRANCE ET MONTRÉAL DANS LES DOMAINES DE L'INGÉNIERIE, DE LA CHIMIE ET DE LA PHYSIQUE

**Depuis 2011, le LAPLACE est un acteur essentiel de la construction d'un espace de collaboration scientifique aussi bien en recherche qu'en formation entre la France et le Québec. Actuellement, le réseau international (IRN NMC) et les deux Masters en bi-diplomation (Plasma et Chimie) sont les piliers d'une collaboration scientifique dynamique dans le domaine des nanomatériaux multifonctionnels pour de nombreuses applications sociétales et industrielles.**

En développant de manière conjointe les collaborations scientifiques dans le domaine de la recherche et de la formation, le LAPLACE est à l'origine d'un écosystème scientifique unique entre la France et le Québec. Celui-ci s'appuie sur l'International Research Network Nanomatériaux Multifonctionnels Contrôlés (IRN NMC), qui regroupe des chercheurs et enseignants-chercheurs issus d'une trentaine de laboratoires français associés au CNRS et leurs collègues de trois universités québécoises (Université de Montréal, Polytechnique Montréal et l'INRS). L'IRN NMC est un réseau structurant qui permet de faciliter les échanges entre les personnes

et ainsi de développer de nouvelles collaborations pluridisciplinaires pouvant déboucher sur des projets financés. L'autre aspect essentiel de cette initiative concerne la formation à travers deux diplômes de Master en bi-diplomation entre l'Université Toulouse 3 et des Universités partenaires au Canada (Université de Montréal, INRS, Université Laval, University of Saskatchewan) dans le domaine des Plasmas mais également depuis peu en Chimie. Ce format innovant de diplôme, dans lequel les étudiants ont une année d'étude au Canada, est basé sur des apprentissages par la pratique en laboratoire. En intégrant, dès le Master, ces étudiants dans des projets de

recherche collaboratifs internationaux, ils profitent d'une formation d'un très haut niveau scientifique et d'une ouverture internationale unique. Ces étudiants sont ensuite, tout naturellement, des candidats pour des thèses au LAPLACE ou à l'international.

La force du site Toulousain, et du LAPLACE en particulier, est d'avoir su développer des relations fortes avec les partenaires québécois en capitalisant sur les forces en recherche et en enseignement, afin de développer une synergie propice au développement de projets et de collaborations. C'est finalement toutes les thématiques du LAPLACE en lien avec les plasmas et les matériaux qui profitent de cette initiative et de ce vivier d'étudiants. Une vingtaine de projets collaboratifs actifs, en permanence une vingtaine d'étudiants impliqués (Master ou Doctorat) et près de 80 articles dans des revues scientifiques en lien avec ces projets depuis 2018 témoignent de l'efficacité et de l'intérêt à maintenir cette approche innovante.



Participants au 10ème atelier de l'International Research Network Nanomatériaux Multifonctionnels Contrôlés (IRN NMC) organisé à Toulouse du 11 au 14 juin 2024

## PUBLICATION

### Pulsed Aerosol-Assisted Low-Pressure Plasma for Thin-Film Deposition

G. Carnide, C. Simonnet, D. Parmar, Z. Zavvou, H. Klein, R. Conan, V. Pozsgay, T. Verdier, C. Villeneuve-Faure, M. L. Kahn, L. Stafford and R. Clergereaux

Plasma Chem Plasma Process 44, 1343–1356 (2024)

<https://doi.org/10.1007/s11090-024-10455-x>

# Le LAPLACE organise la 5<sup>ème</sup> édition de l'International Conference of Dielectrics (ICD)

## CONTACT

**Gilbert Teyssède**

Directeur de Recherche,  
CNRS

[gilbert.teyssedre@laplace.univ-tlse.fr](mailto:gilbert.teyssedre@laplace.univ-tlse.fr)

SPONSORISÉE PAR L'IEEE DIELECTRICS  
AND ELECTRICAL INSULATION SOCIETY

**La 5e International conference in Dielectrics (ICD) s'est tenue à Toulouse du 30 juin au 5 juillet 2024 et a été organisée à l'Université Toulouse III Paul Sabatier par des chercheurs et enseignants chercheurs du LAPLACE issus des groupes de recherche CODIASE, DSF, MDCE et SCIPRA. Cette 5ème édition a connu un grand succès avec plus de 340 participants inscrits, représentant 26 pays, 420 résumés soumis, près de 300 articles acceptés répertoriés dans le programme et 284 articles dans les actes finaux.**

Ce cycle de conférences a un rapport particulier avec Toulouse qui en est la ville natale : il a été créé à Toulouse en 1983 sous le nom de International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics (ICSD), et une édition est revenue à Toulouse en 2004, à l'occasion de son 20e anniversaire. Vingt ans plus tard, nous étions de retour à Toulouse. ICD couvre les recherches dans le domaine des matériaux isolants et des phénomènes diélectriques, ainsi que sur le comportement et les propriétés de l'isolation électrique dans les systèmes sous contraintes de service. Les systèmes du génie électrique, mais également l'ensemble des

dispositifs impliquant des isolants et des diélectriques sont couverts. Les communautés des diélectriques solides, liquides et gazeux se rencontrent, faisant le lien avec les interfaces, qu'il s'agisse d'interfaces physiques et de processus associés ou entre disciplines scientifiques.

ICD a offert un programme dense, avec 8 sessions orales, couvrant 41 communications orales régulières et 4 sessions d'affiches. Deux ateliers ont été organisés en préambule à la conférence, avec 3 conférenciers invités et une participation d'environ 25 personnes pour chacun. Le premier d'entre eux était sur le thème «Atomic

Force Microscopy for characterization of dielectrics at nanoscale». Le second était sur le sujet «Eco-friendly materials in electrical insulation», avec trois intervenants extérieurs. La conférence a été suivie par la troisième édition d'un tutoriel, dans les locaux du Laplace, consacré à «Assembly of space charge equipment for cables». Cette édition de ICD a été la première au cours de laquelle un concours de jeunes chercheurs a été organisé, avec trois prix distribués pour stimuler la participation de la jeune génération à la conférence. Autre innovation, le comité exécutif de ICD-2024, associé au groupe Women in Engineering – WiE– de DEIS ont récompensé Mme la Professeure Florence Sèdes, de l'Université Toulouse III Paul Sabatier, chercheuse à l'IRIT et présidente de Women in Engineering de l'IEEE-France, pour ses actions significatives pour promouvoir l'implication des femmes dans l'ingénierie.



Photo de groupe lors de la conférence  
ICD (International Conference on  
Dielectric) 2024

# Le LabCom SEMA, une véritable success story !

LABORATOIRE COMMUN CNRS LAPLACE – NXP,  
SEMA (SYSTÈMES EMBARQUÉS POUR LA MOBILITÉ AUTONOME)

## CONTACT

**Marc Cousineau**

Professeur,  
Toulouse-INP

[marc.cousineau@laplace.univ-tlse.fr](mailto:marc.cousineau@laplace.univ-tlse.fr)

**Créé en 2020, le laboratoire des Systèmes Embarqués pour la Mobilité Autonome (SEMA) est un accélérateur des recherches menées en collaboration étroite entre le LAPLACE et la société NXP, leader mondial de solutions de connexions sécurisées pour les applications embarquées. Tout récemment le LAAS-CNRS est venu renforcer ce consortium.**

Dans un contexte d'électrification des transports répondant aux enjeux de réduction des émissions carbonées et de l'émergence des véhicules autonomes, la notion de sûreté de fonctionnement pour les électroniques de puissance embarquées à bord du véhicule électrique devient cruciale. L'alimentation en énergie des actionneurs électriques et des calculateurs embarqués est une fonction critique qui doit être assurée de manière inconditionnelle notamment pour les fonctions d'assistance à la conduite, pouvant à terme se substituer au conducteur lui-même (ADAS:

Advanced Driver Assistance Systems). Dans ce cadre contraint, les dispositifs électriques du véhicule doivent répondre à des normes (ISO 26262) et des niveaux d'exigence élevés (ASIL Automotive Safety Integrity Level) en termes de tolérance aux pannes et d'aptitude à maintenir une continuité de mission inconditionnelle. C'est tout l'enjeu des recherches menées au sein du LabCom SEMA. Elles concernent les études, la conception et le développement amont des électroniques de puissance haute performance des véhicules électriques autonomes du futur.

Ces recherches intègrent des études sur la conversion et l'intégration de puissance, l'amélioration constante des rendements énergétiques, la sûreté de fonctionnement et de la tolérance aux pannes, la distribution agile de puissance, la robustesse et la fiabilité prédictive tout en intégrant les contraintes de compatibilité électromagnétique, de cycle de vie et de réduction des volumes, du poids et des coûts des équipements.

Depuis sa création, le LabCom SEMA a donné lieu à plus de 8 thèses, 11 contrats de collaboration dont 3 contrats postdoctoraux, 43 articles et conférences, 8 brevets, 10 séminaires invités, 3 prix et distinctions, 3 workshops, démontrant l'excellence de la collaboration et de sa dynamique !



# Le LAPLACE organise la 10<sup>ième</sup> Conférence Européenne sur les Méthodes Numériques en Electromagnétisme

NUMELEC  
2024

## CONTACT

**Ronan Perrussel**

Chargé de Recherche,  
CNRS

[ronan.perrussel@laplace.univ-tlse.fr](mailto:ronan.perrussel@laplace.univ-tlse.fr)

Après 7 années de pause, sous l'élan du LAPLACE, la conférence NUMELEC 2024 s'est déroulée du 8 au 10 juillet à Toulouse à l'ENSEEIH. Cette conférence a pour objectif d'offrir aux communautés travaillant sur la modélisation numérique dans les domaines des basses et des hautes fréquences la possibilité de se rencontrer et d'échanger sur les dernières avancées de leurs recherches.

D'une durée de trois jours, cette conférence a fait l'objet de sessions communes orales et affichées, de discussions sur des sujets communs, et a permis de dégager des lignes directrices utiles aux deux communautés. Les domaines abordés ont concerné les aspects méthodologiques tels que les formulations des problèmes

électromagnétiques en régime statique, quasi-statique ou variable, les méthodes de résolution et d'optimisation, ainsi que les aspects applicatifs liés à la modélisation des matériaux et des dispositifs. La conférence a réuni plus de 70 personnes venant de 6 pays et 25 laboratoires différents. Un véritable succès pour cette communauté de spécialistes !



Photo de groupe lors de la Conférence Européenne sur les Méthodes Numériques en Electromagnétisme (NUMELEC 2024)

# Le LAPLACE, un acteur majeur de l'Année de la Physique 2023-2024

CONTACT

**Direction**  
[direction@laplace.univ-tlse.fr](mailto:direction@laplace.univ-tlse.fr)

**Le projet « L'Énergie de demain », labellisé par le CNRS, a été co-construit entre le LAPLACE, le lycée professionnel Joseph Gallieni de Toulouse et le lycée général Simone de Beauvoir de Gragnague et s'est déroulé d'octobre 2023 à juillet 2024.**

Dans le cadre de l'Année de la Physique 2023-2024, le laboratoire LAPLACE et les lycées Joseph Gallieni de Toulouse et Simone de Beauvoir de Gragnague se sont regroupés dans l'objectif de mieux faire connaître les activités et les métiers de la recherche dans les domaines de la conversion d'énergie électrique.

Ainsi, 22 élèves choisis sur la base du volontariat et de la motivation, répartis en 2 groupes avec une mixité de niveau (1<sup>ière</sup> et terminale) et de lycée (professionnel et général) ont travaillé d'octobre 2023 à juillet 2024 sur la comparaison de la production et de l'utilisation de 2 modes de production

d'énergie électrique : l'hydrogène (source décentralisée) et la fusion par plasma (source centralisée).

Sur la base de maquettes (expérimentales et numériques), de documentations, de visites et d'échanges avec les chercheurs et enseignants chercheurs, les élèves ont réalisé/exploité des mesures, se sont familiarisés avec les phénomènes de base à l'origine de chaque production d'énergie, ont analysé la chaîne complète (énergie décentralisée versus énergie centralisée), se sont projetés sur les rendements et les facteurs d'échelles, ont été sensibilisés aux questions

d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) en lien avec les ressources disponibles et les déchets générés ...

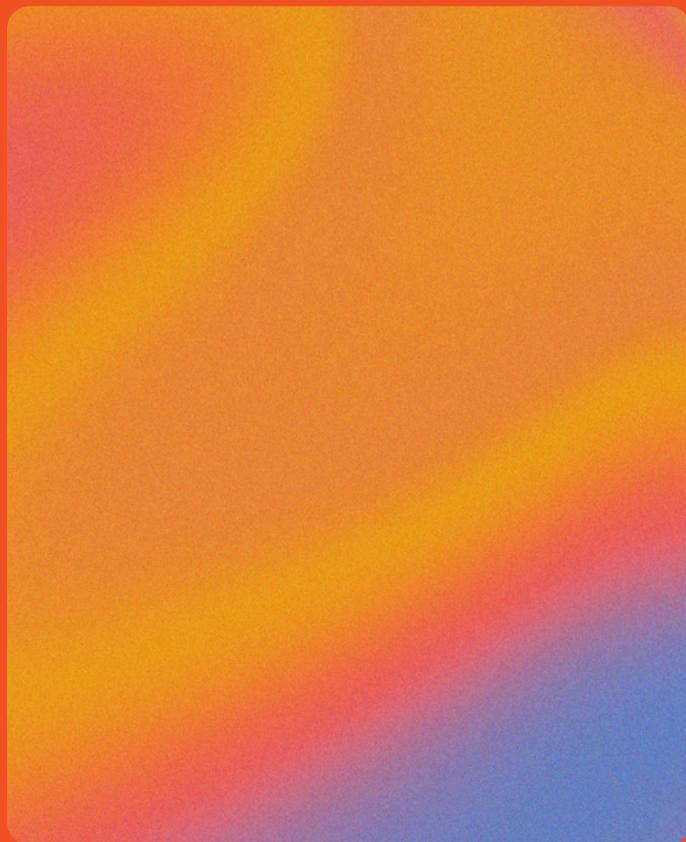
Des réunions bi-mensuelles se sont tenues au LAPLACE, dans les lycées et dans les salles d'expérimentation du laboratoire avec deux points phares : La visite de la plateforme hydrogène du LAPLACE sur le campus de Toulouse-INP en février et la visite d'une journée sur le site d'ITER de fusion thermonucléaire au centre du CEA Cadarache à St. Paul-lez-Durance en mars.

Début juillet 2024, les élèves ont présenté leur rendu dans un amphithéâtre de l'Université de Toulouse en présence de leur famille, des encadrants chercheurs du LAPLACE et enseignants des 2 lycées, et d'un inspecteur d'académie.





[laplace.univ-tlse.fr](http://laplace.univ-tlse.fr)



LABORATOIRE PLASMA & CONVERSION D'ÉNERGIE

---

ADRESSES

**Université de Toulouse**

118, route de Narbonne  
31062 Toulouse cedex 9

**ENSEEIH**

2, rue Charles Camichel - BP 7122  
31071 Toulouse cedex 7

---

[laplace.univ-tlse.fr](http://laplace.univ-tlse.fr)

DIRECTEURS DE PUBLICATION

**Olivier Eichwald**

Directeur

**Xavier Roboam**

Directeur adjoint

---

EDITION

**Oblique Studio**

Communication visuelle

---

The logo for CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique), consisting of the letters "CNRS" in a white, sans-serif font inside a white circle.

The logo for INP N7 (Institut National de Physique Nucléaire - Toulouse), featuring the word "TOULOUSE" in small letters above "INP N7" in a large, bold, sans-serif font.

The logo for the University of Toulouse, with the words "UNIVERSITÉ DE TOULOUSE" in a bold, sans-serif font.