



Réduction des émissions de gaz à effet de serre et de polluants grâce à la combustion assistée par plasma



Christophe Laux

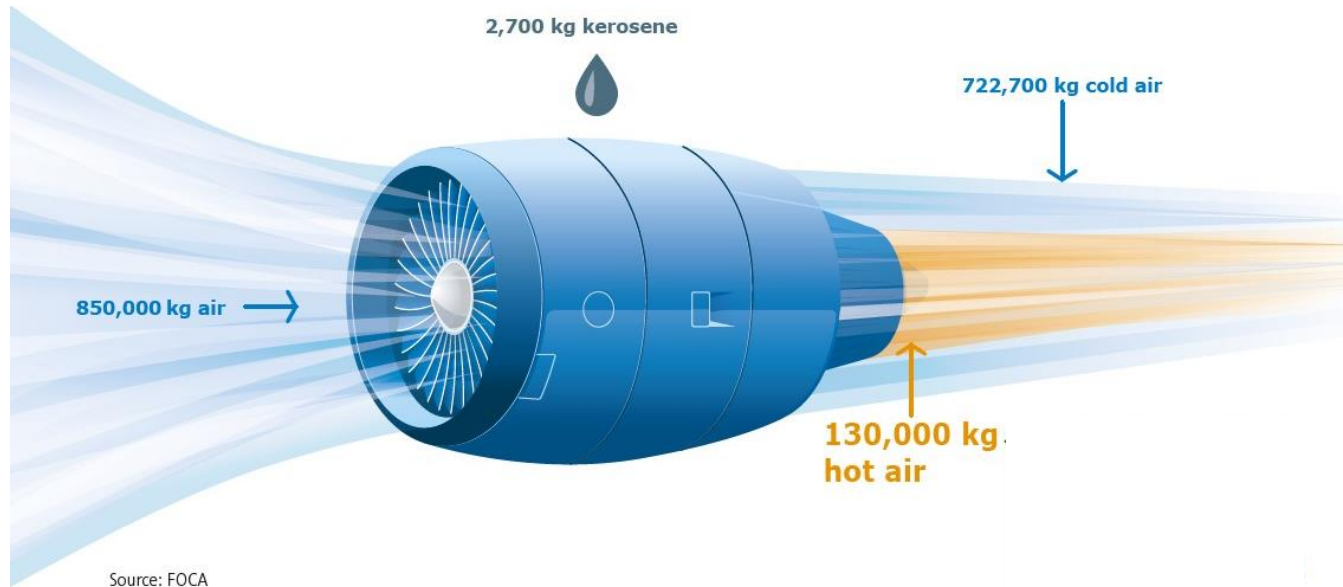
Laboratoire EM2C, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris Saclay

Inauguration - Paris Saclay Institute of Aeronautics and Astronautics

14 avril 2022

Enjeux de la transition énergétique dans l'aviation

Aviation : 2% des émissions de CO₂ mondiales ~1 Gt CO₂eq/an



Emissions d'un avion de 50 passagers en 1 heure :

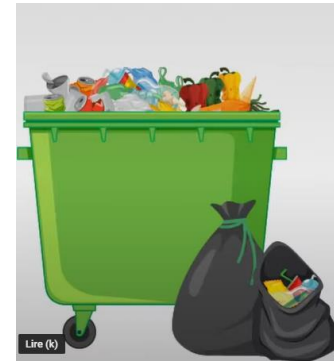
8,500 kg carbon dioxide (CO₂)
3,300 kg water vapor (H₂O)
30 kg nitrogen oxides (NO_x)
2.5 kg sulphur dioxide (SO₂)
2.0 kg carbon monoxide (CO)
0.4 kg hydrocarbons (HC)
0.1 kg particulate matter (PM) and soot

Objectif Europe 2050 : réduire CO₂ de 75% et NO_x de 90%

Darecki et al. (2011). Flightpath 2050 Europe's Vision for Aviation. European Commission.

Stratégies de réduction du CO₂

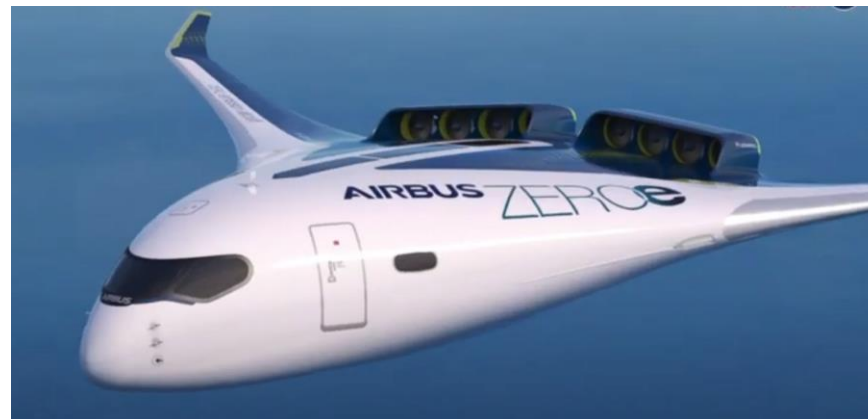
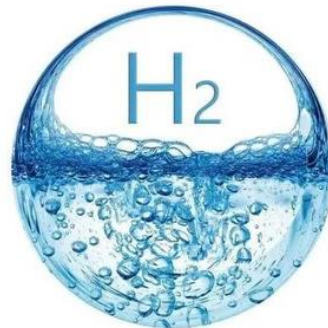
Sustainable Aviation Fuel (SAF) : carburants issus de plantes halophytes, huiles de cuisson, déchets municipaux, ...



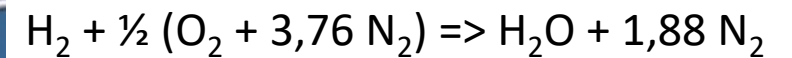
Neutre en CO₂



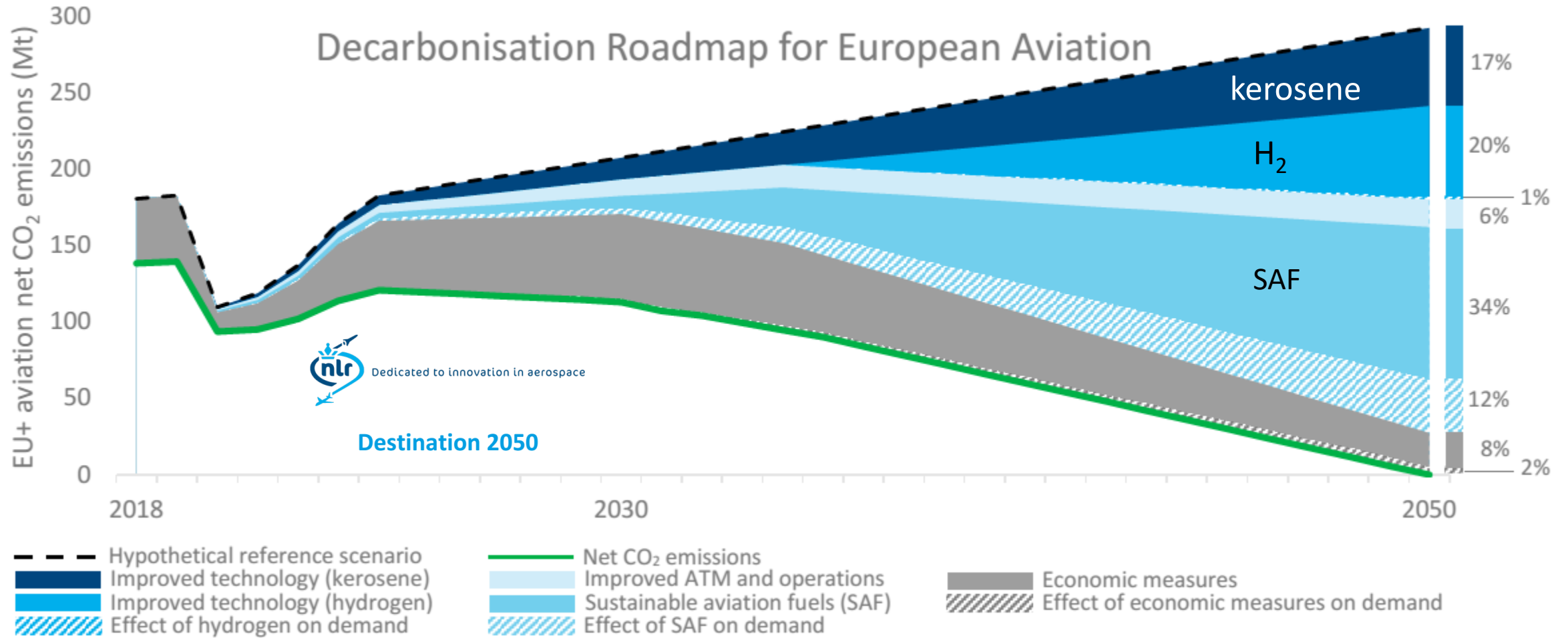
Hydrogène



Pas de CO₂ émis



H₂ et SAF dans les scénarios 2050 pour l'aviation



Mais il reste la question des polluants

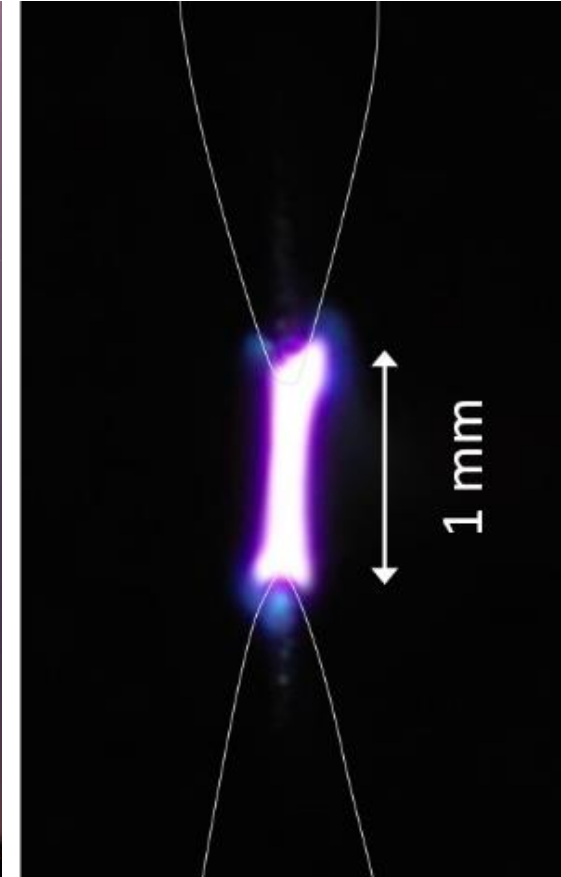
Les SAF et l'hydrogène produisent des NOx par réactions thermiques

Pour réduire les NOx => réduire la température des flammes
en utilisant des mélanges pauvres en carburant


Cependant les flammes pauvres en carburant sont instables

⇒ Solution envisagée : stabiliser les flammes pauvres avec un plasma


Quel type de plasma utiliser ?




Programme « Air Ramparts » » AFOSR 1997-2002



PLASMA DYNAMICS FOR AEROSPACE APPLICATIONS



RUSSIAN AJAX HYPERSONONIC FLIGHT VEHICLE (1994)



TECHNICAL CHALLENGES

- Uniform Plasma Generation
- Power Required; System Impact
- High Re, Q Environment
- Measurement/Modeling

PAYOFFS

- Drag Reduction
- Thermal Management
- Flight Control
- Size, Weight reduction
- Few Moving Parts
- Power generation
- Ignition/Combustion Enhancement

Plasma Shock Strength Reduction

Thermal energy

Propellant

Nozzle

MHD Flow Control/ Energy Extraction

Plasma-Assisted Ignition And Combustion

Problème :

1 m³ de plasma d'air = 27 GW
avec les plasmas classiques
(DC, radio-fréquences, micro-ondes)



Programme « Air Ramparts » :

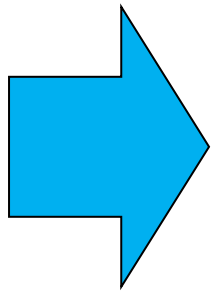
- Réduire la puissance d'un facteur 1000
- West Coast vs East Coast



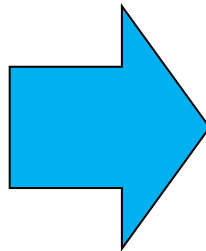
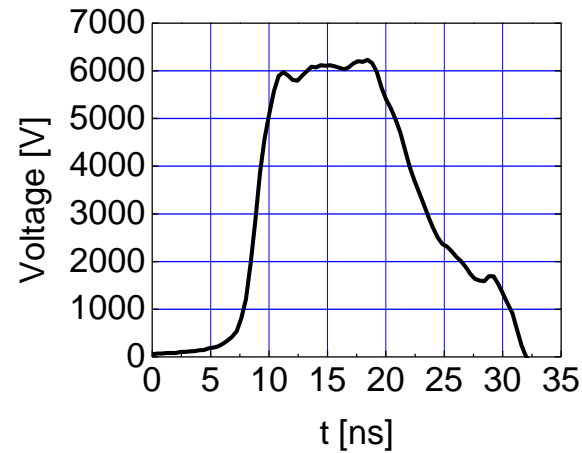
Reduction d'un facteur 1000
grâce à des plasmas NRP

Nanosecond Repetitively Pulsed (NRP) Discharges

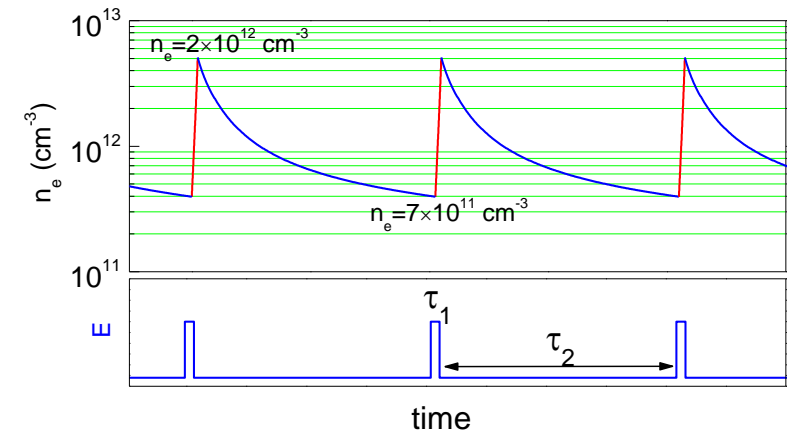
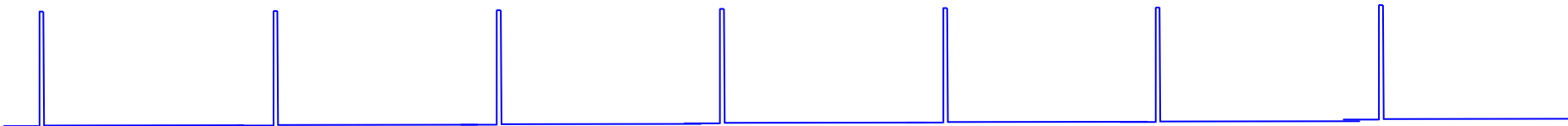
Découvertes à Stanford en 2000



Short, high voltage pulses:
10 ns, 5-30 kV



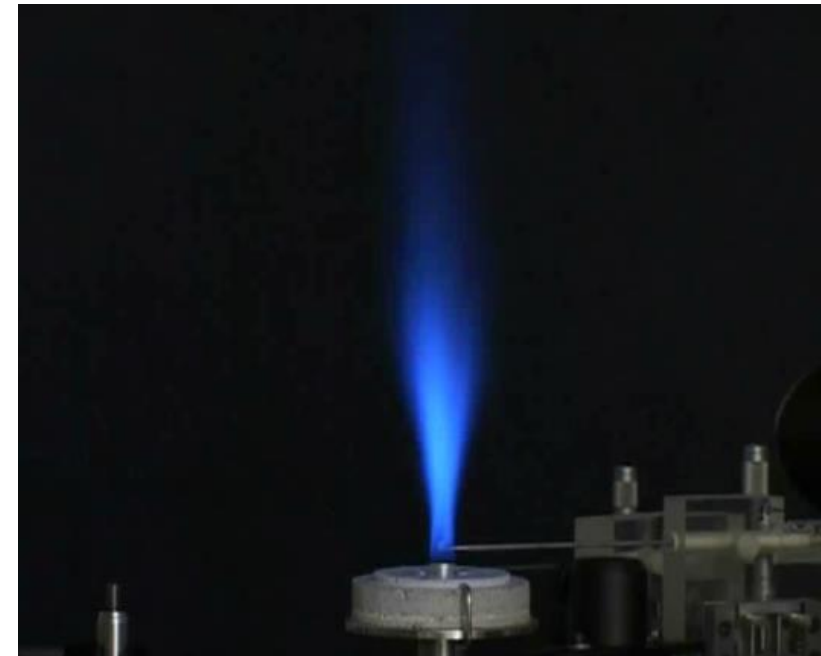
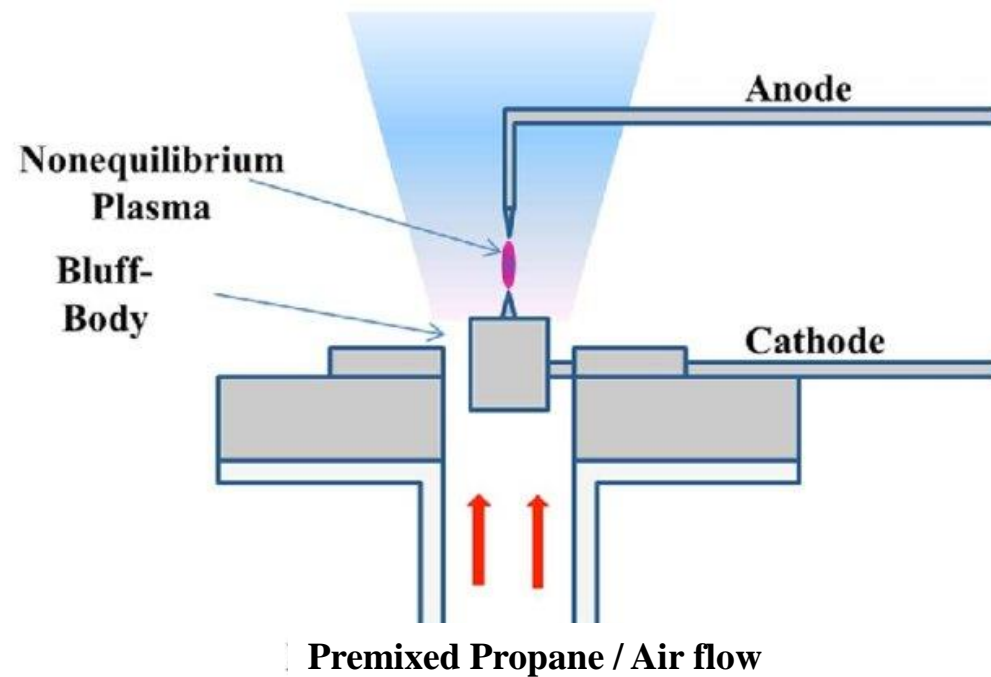
Applied at high repetition frequency (10-100 kHz)



\Rightarrow 1000 fois moins de puissance que plasmas classiques

Application des décharges NRP à la stabilisation

Brûleur Mini-PAC (EM2C)





Phénomènes induits par les pulses



Dissociation de O_2 ultrarapide (20 ns)

Chauffage ultrarapide (20 ns) modéré (< 1000 K)

Chauffage « lent » (100 μ s) modéré (< 1000 K)

Ondes de choc et expansion toroïdale

Fraction de l'énergie électrique déposée

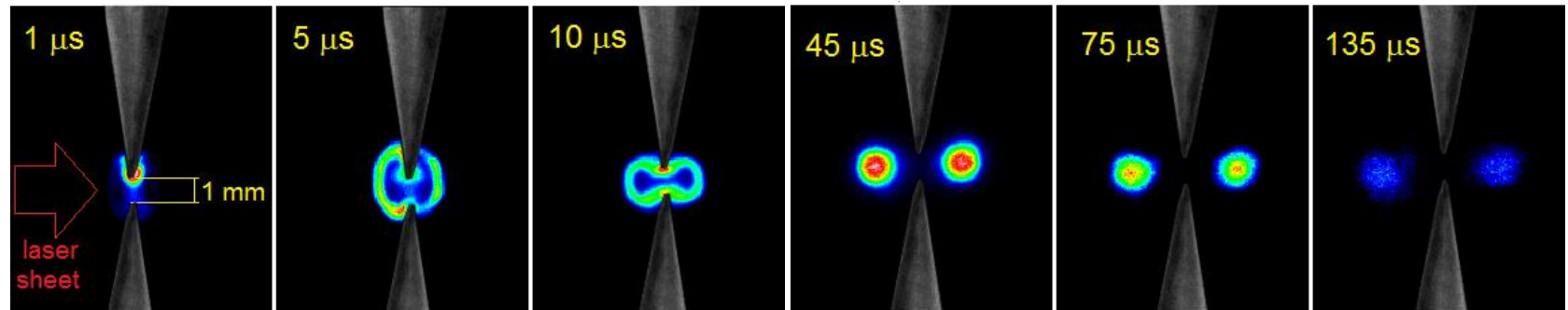
→ 35%

→ 20%

→

45%

Mini-PAC



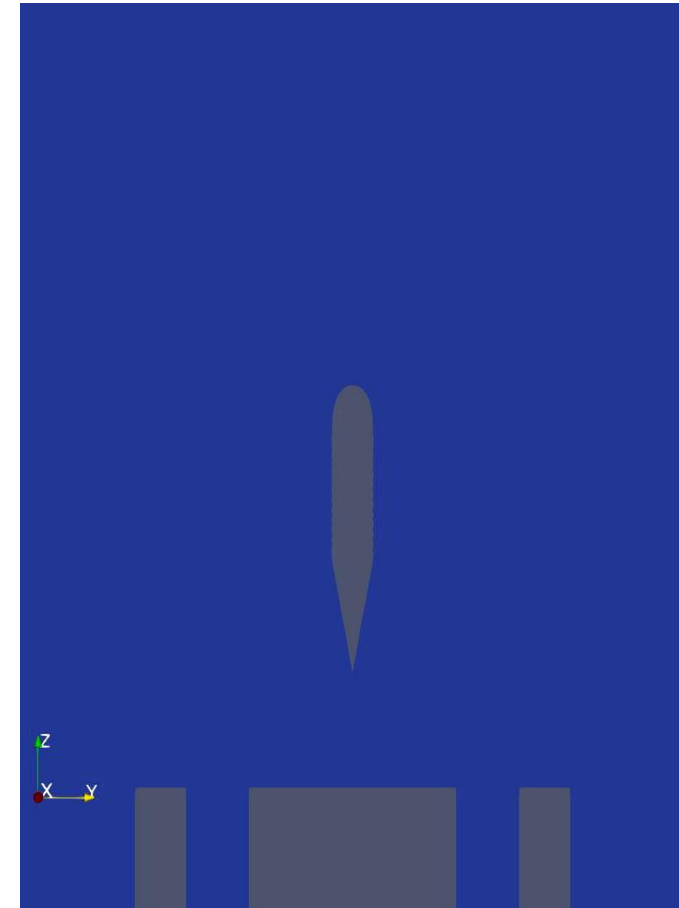
Simulations numériques du foyer MiniPAC

Modèle de décharges NRP:

- La décharge est un cylindre de 500- μm de diamètre
- 20% de l'énergie dans le chauffage ultrarapide
- 35% dans la dissociation ultrarapide de O_2
- 45% dans le chauffage lent
- Ref: Castela, Fiorina, Coussement, Gicquel, Darabiha, Laux, Comb. & Flame, 2016

Simulations avec AVBP:

- Modèle de décharges NRP
- Méthane-air
- LES avec modèle de turbulence
- Cinétique détaillée de la chimie CH_4 -air
- Ref: Bechane and Fiorina, Comb. Symp. 2020



Stabilisation de flammes pauvres par décharges NRP

Reference	Burner type	Fuel	Pressure	Flame power (P_{flame})	Plasma power (P_{plasma})	$P_{\text{plasma}} / P_{\text{flame}}$	Pulse rate	Extension of LBO (change of ϕ)
Pilla 2006 (Mini-PAC)	Bluff-body	Propane	1 bar	11 kW	70 W	0.6%	30 kHz	~10%
Pham 2011 (Mini-PAC)	Bluff-body	Methane	1 bar	11 kW	70 W	0.6%	30 kHz	~10%
Barbosa 2015	Swirled	Propane	1 bar	52 kW	350 W	0.7%	30 kHz	0.47→0.11
Heid 2009	Swirled	Kerosene	3 bar	50 kW	< 500W	< 1%	30 kHz	0.44→0.21
DiSabatino 2020	Swirled	Methane	1 bar	4.5 kW	31 W	0.7%	30 kHz	~5%
DiSabatino 2020	Swirled	Methane	5 bar	20 kW	65 W	0.3%	30 kHz	~5%
Vignat 2021	Swirled	Heptane (L), Dodecane (L)	1 bar	5 kW	< 100W	< 2%	20 kHz	~10%
Moeck 2014	Swirled	Natural gas	1 bar	43 kW	315 W	0.7%	50 kHz	Thermo-acoustic instabilities reduced by > 99%
Gomez 2017	7-LDI	Methane	1 bar	20 kW	< 200W	<1%	30 kHz	Thermo-acoustic instabilities reduced by > 99%

Pilla (2006) *IEEE Trans. Plas. Sci.*, **34**(6), 2471-2477

Pham et al. (2011) *IEEE Trans. Plas. Sci.*, **39**(11), 2264-2265

Barbosa et al. (2015) *Phil.Trans. R. Soc. A*, **373**, 20140335

Heid et al. (2009) Proceedings ISABE conference

Di Sabatino (2020) *J. Phys. D*, **53**, 355201

Vignat et al. (2020) Proc. Comb. Symp.

Moeck et al. (2014) *IEEE Tr. Plas. Sci.*, **42**, 2412

Gomez et al. (2017) AIAA 2017-4778

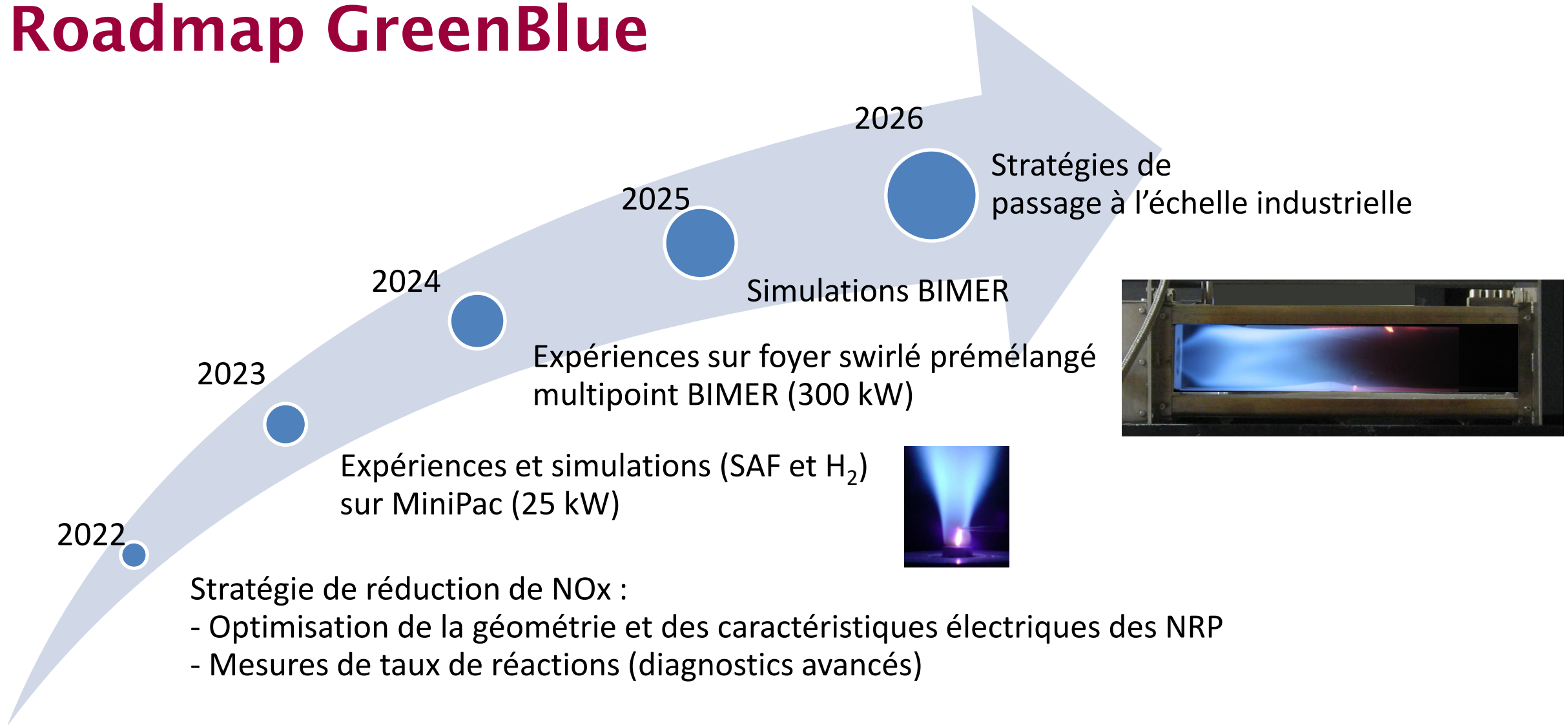
Projet de 5 ans démarré en Nov. 2021. Budget: 2.5 M€

Objectifs : minimiser les émissions de NOx des flammes SAF et H₂ / air

- Etudes fondamentales des NRP dans les mélanges air, H₂, CH₄, CO₂, H₂O
- Mesures de taux de réactions (diagnostics femtosecondes)
- Modèles de combustion assistée par plasma
- Simulations numériques
- Passage à l'échelle (300 kW) en flammes pauvres prémélangées swirlées

Ouvert à collaborations académiques et industrielles

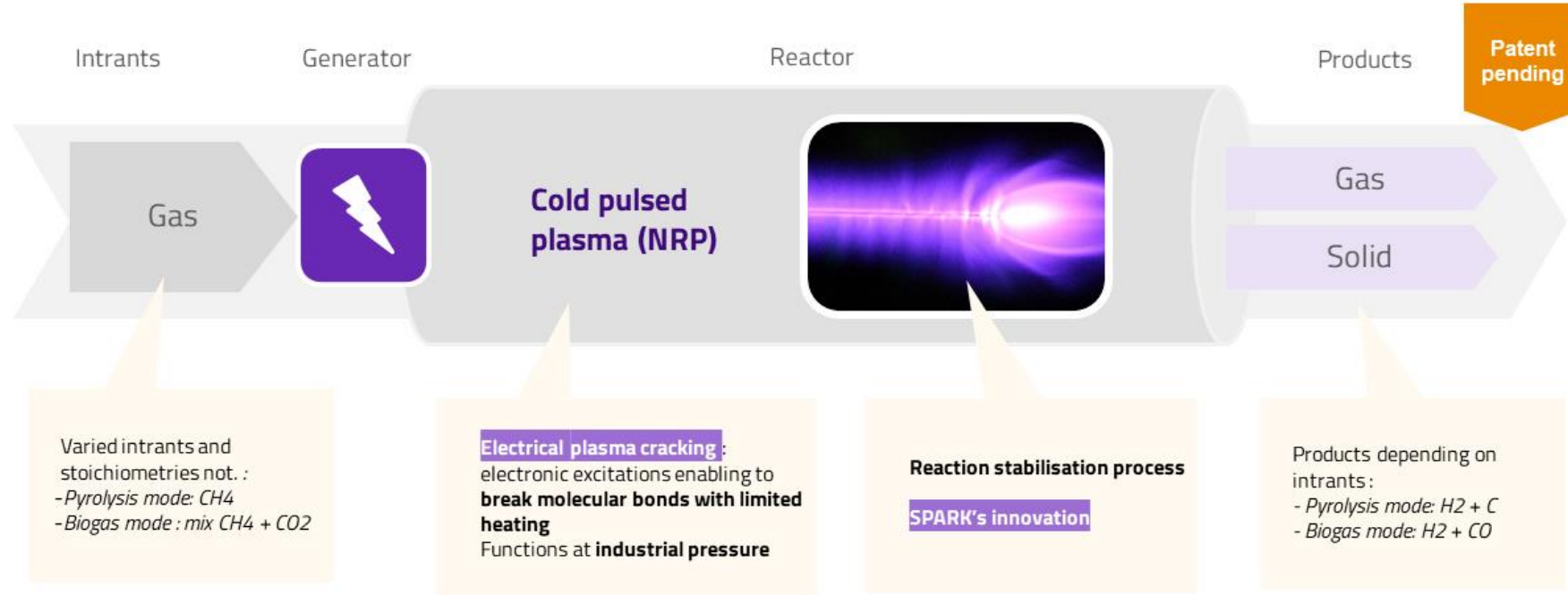
Roadmap GreenBlue



Autres applications étudiées à EM2C :

Production de H₂
Conversion de CO₂

Plasmalyse méthane : Spark Cleantech



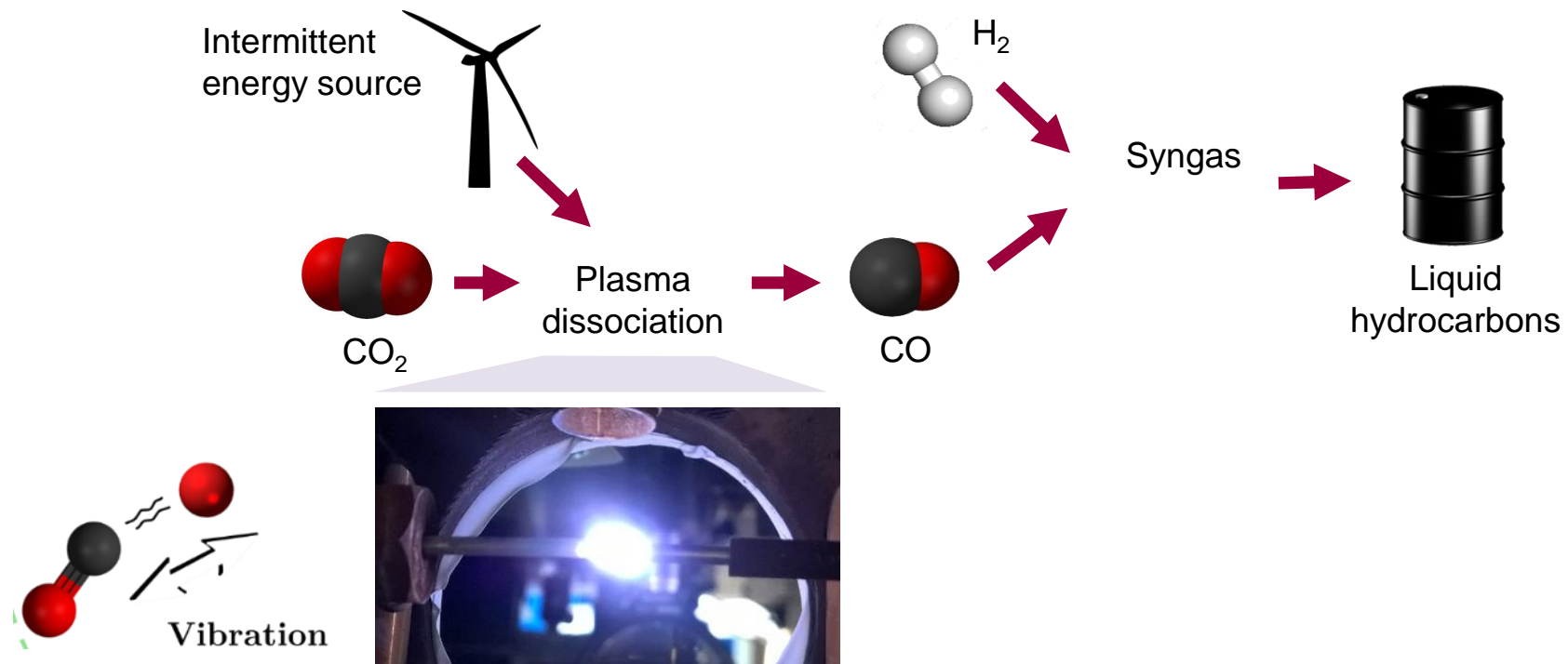
Technologie de rupture :

- Vert : pas de CO₂ émis
- Efficace : 4x moins d'énergie que l'électrolyse de H₂O

Réacteur modulaire 1 kW fin 2022 (Contact : Erwan Pannier)

Conversion du CO₂

Objectif : stocker les énergies intermittentes sous forme chimique



Contributors to Plasma-Assisted Combustion at EM2C

Plasma group:

Doctoral students: David Galley, Guillaume Pilla, David Pai, Diane Rusterholtz, Farah Kaddouri, Da Xu, Fabien Tholin, Nicolas Minesi, Victorien Blanchard, Erwan Pannier, Arthur Salmon, Marien Simeni Simeni, Philippe Castera, Augustin Tibère-Inglesse, Pierre Mariotto, Arnaud Gallant, Corentin Grimaldi, Ulysse Dubuet, Jean Maillard, Jean-Baptiste Perrin-Terrin, Aymeric Bourlet

Post-doctoral students: Sergey Pancheshnyi, Lise Caillault, Gabi Stancu, Mario Janda, Sara Lovascio, Sergey Stepanyan, Ciprian Dumitrache

Researchers: Christophe Laux, Gabi Stancu, Sean McGuire, Anne Bourdon

Combustion group:

Doctoral students: Maria Castela, Yacine Bechane, Séverine Barbosa, Guillaume Vignat, Preethi Soundararajan

Researchers: Denis Veynante, François Lacas, Sébastien Ducruix, Laurent Zimmer, Benoit Fiorina, Nasser Darabiha, Olivier Gicquel, Thierry Schuller, Sébastien Candell, Antoine Renaud

Research Engineers: Deanna Lacoste, Philippe Scouflaire, Daniel Durox, Arthur Salmon, Moises Garcia, Clément Mirat, Jean-Michel Dupays

Supporting staff: Erika Jean-Bart, Yannick le Teno, Jérôme Baunier, Hubert Jubeau, Dedit Mushatsi, Jérôme Bonnety, Koro Sokhona, Brigitte Llobel, Noï Lavaud, Nathalie Rodrigues, Sébastien Turgis, Virginie Martinez

Collaborators from ONERA: Axel Vincent, Julien Labaune, Fabien Tholin, Renaud Lacourt, G. Heid, Paul-Quentin Elias, Denis Packan, Jean-Pierre Taran

National collaborators: Pierre Vervisch, Armelle Cessou, Bertrand Lecordier, Corine Lacour, David Honoré (CORIA), Pascale Desgroux, Guillaume Vanhove (PC2A), Svetlana Starikovskaia (LPP), Julien Sotton et Marc Bellenoue (PPRIME)

International collaborators: Carmen Guerra-Garcia (MIT), Mikhail Shneider (Princeton), Mark Cappelli (Stanford), Jun Hayashi (Osaka University), Jonas Moeck (TU Berlin), Nikolay Popov (Moscow University), Timothy Ombrello (US Air Force Research Laboratories)

Merci de votre attention

