



list

COMET CNES
Journée *Fibres Optiques*

Instrumentation par Fibre Optique pour la Mesure en Environnement Extrême

Guillaume Laffont, guillaume.laffont@cea.fr



Confidentiel CEA



Les Capteurs à Fibres Optiques

De multiples usages en Métrologie, en tirant partie des développements Télécom mais pas uniquement

- **La Fibre Optique comme moyen de transport de la "donnée" → Déport**
- **Modulation des propriétés de la lumière guidée, ou bien du guide lui-même**
 - Intensité, Phase, Polarisation, Longueur d'onde, Dispersion
- **Mesurandes diversifiés**
 - Température, Déformation, Pression, Vitesse, Vitesse angulaire
 - Courbure, Forme (Shape Sensing)
 - Vibrations et Ondes (de choc par exemple)
 - Indice de réfraction (interactions avec le champ évanescent), Luminescence, Fluorescence
- **Quelques familles de transducteurs "fibrés"**
 - Interféromètres (Mach-Zehnder, Michelson, Fabry-Perot)
 - Exploitant les mécanismes de rétrodiffusion Rayleigh/Raman/Brillouin
 - **Les réseaux de Bragg** (aussi utilisés comme filtre spectral pour les Télécom → réseaux WDM)

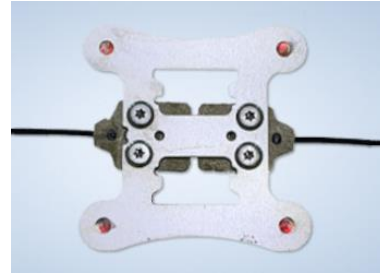
Les Capteurs à Fibres Optiques

Une base commerciale significative

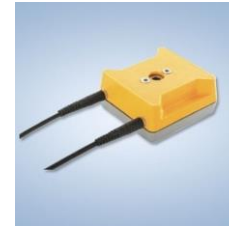
■ Fibre Optique et Capteurs



Fabricants de FO et Bragg/FP



Capteurs packagés
(ici une jauge à réseau de Bragg)



Accéléromètre Bragg

Points de vigilance

- Qualification à effectuer
- Environnement difficile R&D
- Perf métrologique
- Fiabilité, IHM

■ Instrumentations de lecture (exemples disponibles au CEA List LSPM)



Réflectomètre
optique



Brillouin
Discriminant T/Def



Rayleigh
T/Def
Haute résolution spatiale



Bragg WDM



OFDR Bragg
T/Def
Haute résolution spatiale

Les Capteurs à Fibres Optiques



? Pourquoi, pour qui, comment ?

SHM *Structural Health Monitoring*

Métrologie

Contrôle de procédé

Monitoring/Instrumentation

Mesure répartie/distribuée

Surveillance d'infrastructures

Pour environnement difficile/radiatif

Capteurs intégrés

Mesure répartie

Incohérent

Mono | Multiplexage

Insensibilité EM

Surveillance de structures

Bragg

Brillouin

Tenue radiations n/ γ

OTDR

DTS

DAS

Rayleigh

Portée Longue | Faible

Cohérent

FBG

OFDR

Raman

Fabry-Perot

Haute T°C

Résolution haute | basse

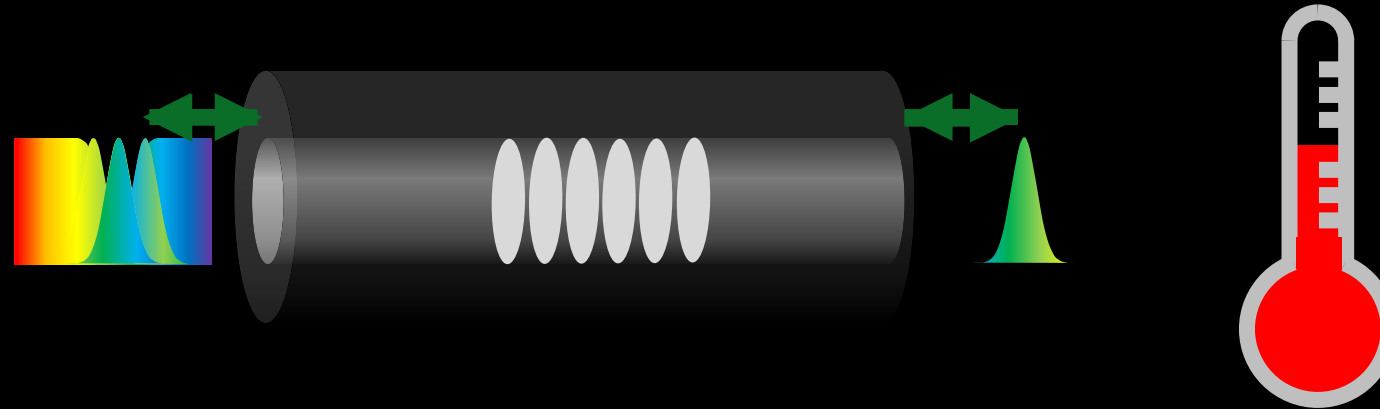
DTSS

Rapide | lent

ATEX

Le réseau de Bragg, un composant simple ?

PRINCIPE DU CAPTEUR A RESEAU DE BRAGG

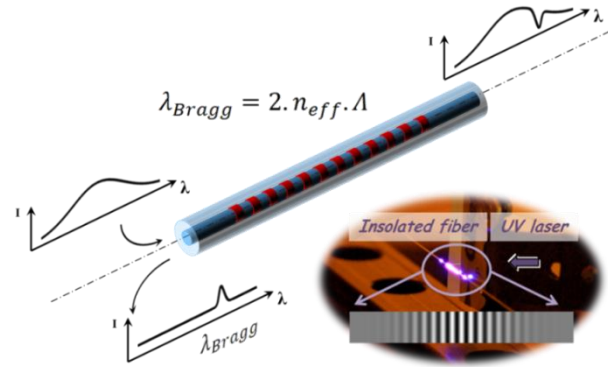


Capteur de température

Capteur de déformation

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff}\Lambda$$

Photosensibilité et procédés d'inscription



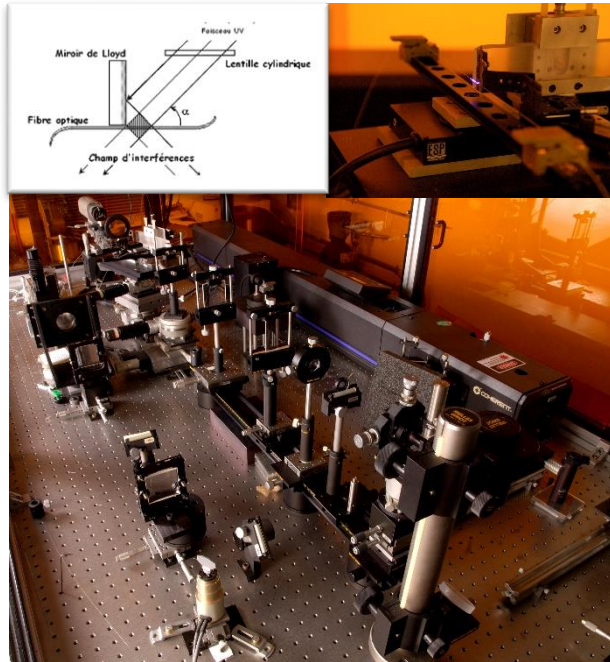
Photosensibilité des verres de silice

Changement permanent de l'indice de réfraction du matériau sous l'effet d'une insolation laser à des longueurs d'onde appropriées

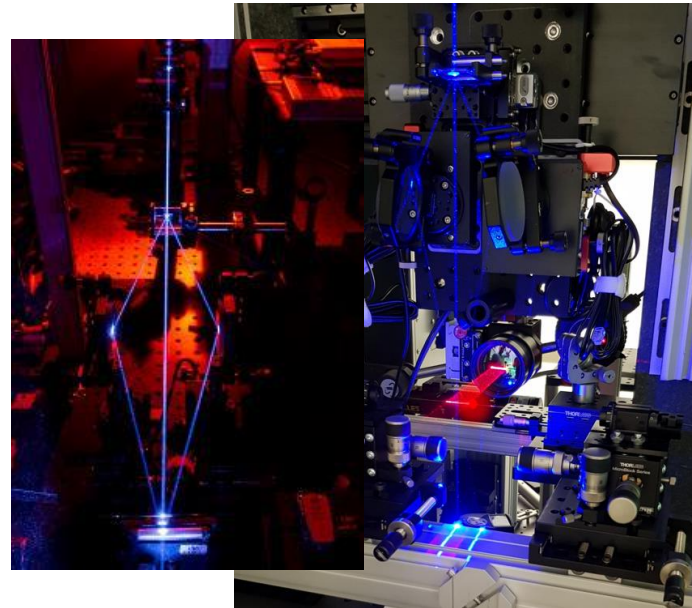
Douay, M., Xié, W.X., Leconte, B. et al.

Progress in silica optical fibre photosensitivity. *Ann. Télécommun.* 52, 543–556 (1997). <https://doi.org/10.1007/BF02997611>

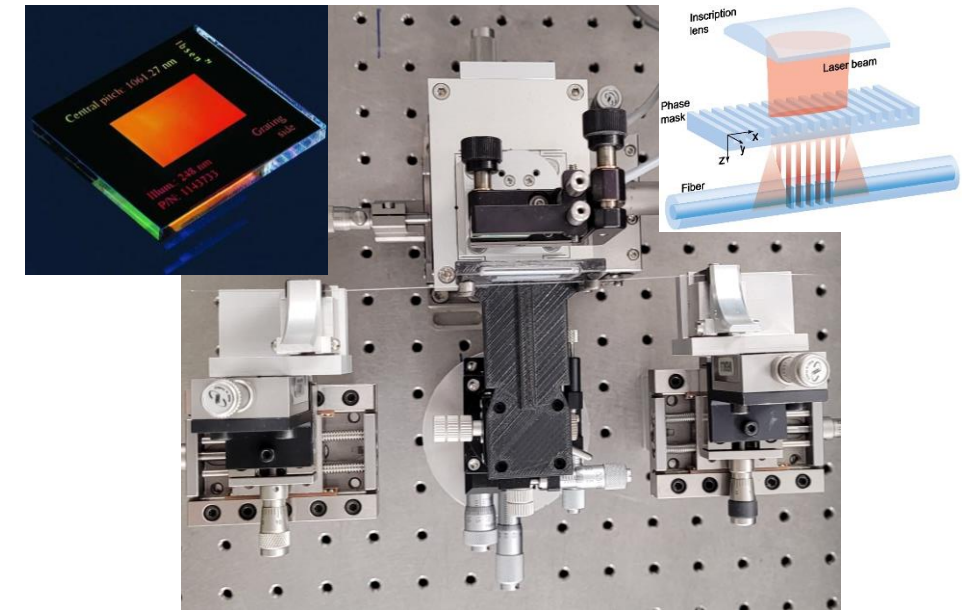
Exploitée via des procédés interférentiels pour structurer la modulation d'indice de réfraction



Interféromètre de Lloyd



Interféromètre de Talbot



Masque de phase

? Qu'est-ce-qu'un environnement sévère ?



Pression
>10 GPa



Radiations

$\gamma - n_{fast}$
Mgy/Ggy - $10^{20} \text{ n.cm}^{-2}$



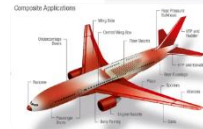
Champs EM



Le milieu



La structure



Les procédés



▪ **Contraintes sur transducteur/capteur**

- Pertes optiques
- Détérioration du *coating*
- Fragilité mécanique
- Dérives du capteur
- Durée de vie

▪ **Contraintes sur systèmes**

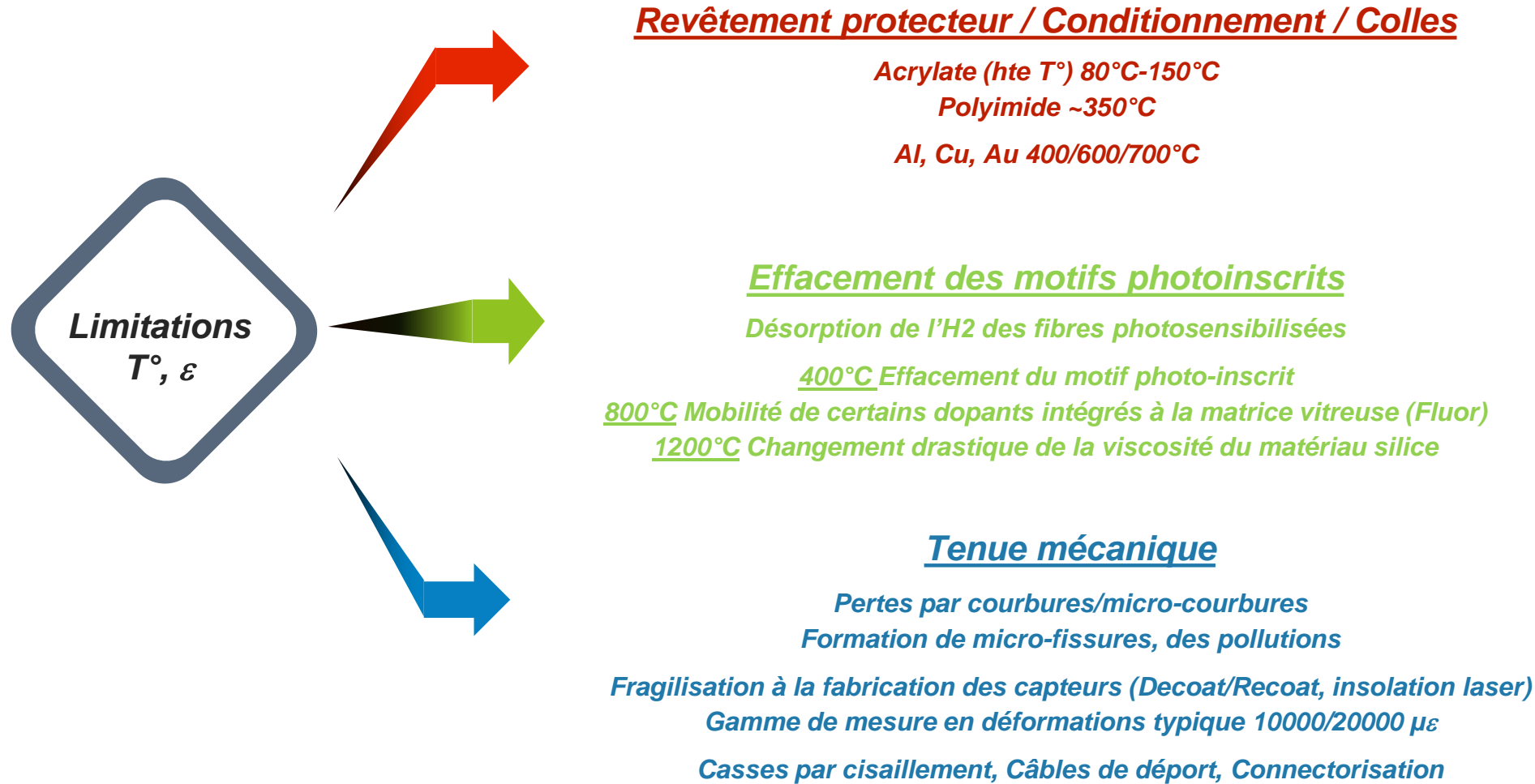
- Encombrement
- Consommation électrique
- Vibrations, accélérations, Thermique
- Pollutions chimiques
- Fiabilité

➡ **Difficile... pour le transducteur, le capteur et le système**

➡ **Pour les CFOs, les challenges débutent à partir de 400°C**

Limitations en température et Déformations pour les RdBragg

Le verre de silice est fibré à ~2000°C mais des limitations à l'usage des CFO en haute T°



Température et réseaux de Bragg

Un paradoxe ...

Mesure de température par réseaux de Bragg

- Décalage du pic de Bragg avec la température → applications capteur $\sim 10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$
- Sensibilité non-linéaire avec la température (cryogénie, 1000°C)
- Etalonnage est indispensable pour pouvoir proposer des performances métrologiques, $S_T = f[\text{substrat, dopants, longueur d'onde}]$
- Temps de réponse en T° dépend du conditionnement

La température n'est pas qu'un mesurande

- Sensibilité croisée [Strain/ T°]: techniques de compensation à mettre en place
- Facteur de vieillissement : chute voire disparition de la réflectivité avec la température (effacement du RdBragg)
- Dérive de la mesure, dégradation du revêtement protecteur (coating), fragilité de la fibre (microfissures)
- Vieillissement accéléré en haute T° → $\Delta R = 70\%$ [7 days @ 600°C]

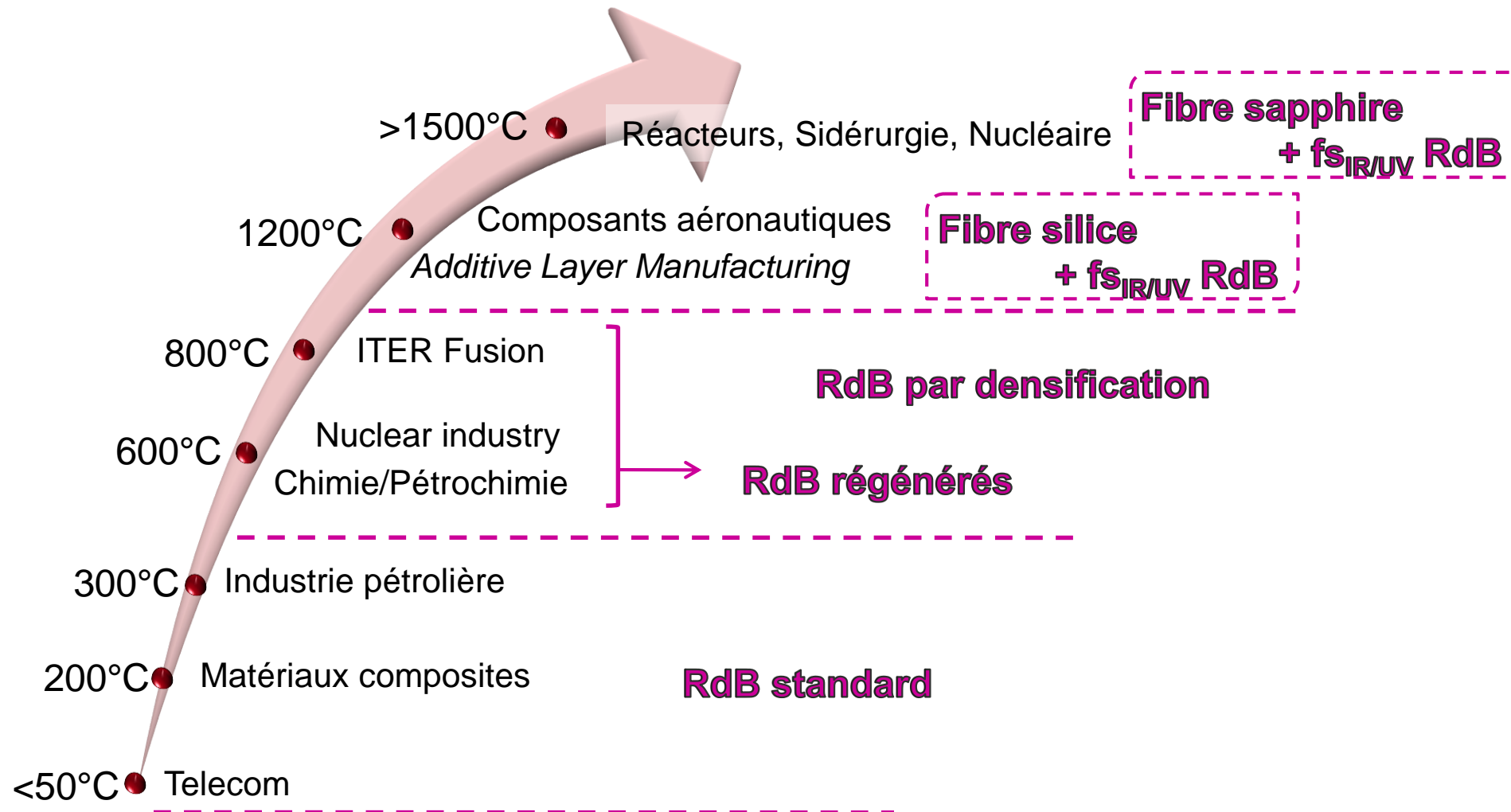
Comment obtenir un réseau de Bragg stable en haute température ?

$T^\circ \gg 500^\circ\text{C}$, typiquement 900°C - 1000°C

Avec pas d'effacement du motif, peu ou pas de dérives de λ_{Bragg}

Solutions technologiques développées au LSPM

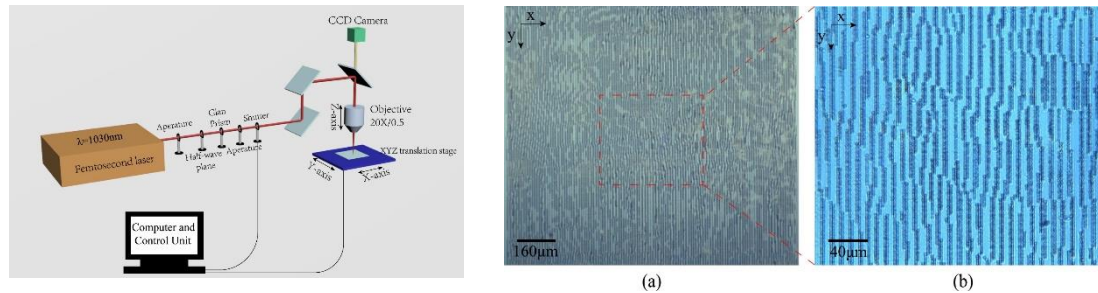
Toute une famille de réseaux de Bragg pour les environnements sévères (en particulier haute température)



Ecriture de composants photoniques par laser femtoseconde

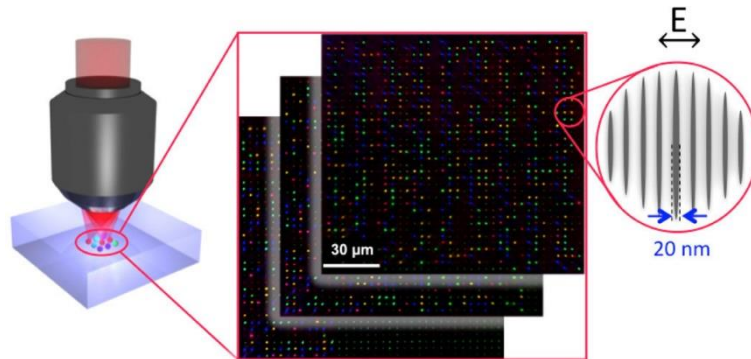
Direct laser writing

- Guides d'ondes dans les substrats planaires ou les fibres optiques
- Nanoréseaux pour créer des structures biréfringentes ou réaliser du stockage
- Impression 3D par polymérisation à deux photons
- ...mais aussi des réseaux de Bragg en structurant les fibres optiques



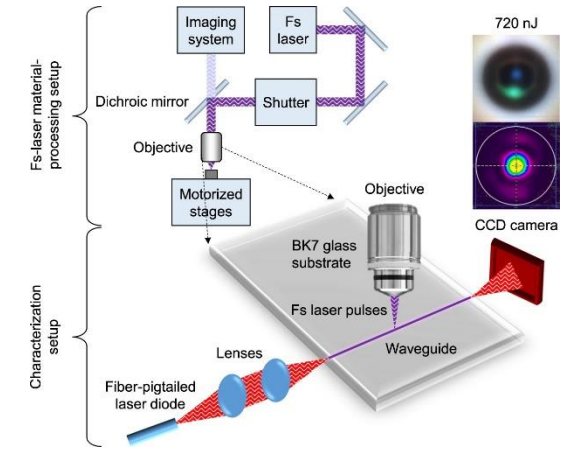
Gravure d'hologrammes

Fabrication of 3D computer-generated hologram inside glass by femtosecond laser direct writing, *Optical Materials*, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.113228>



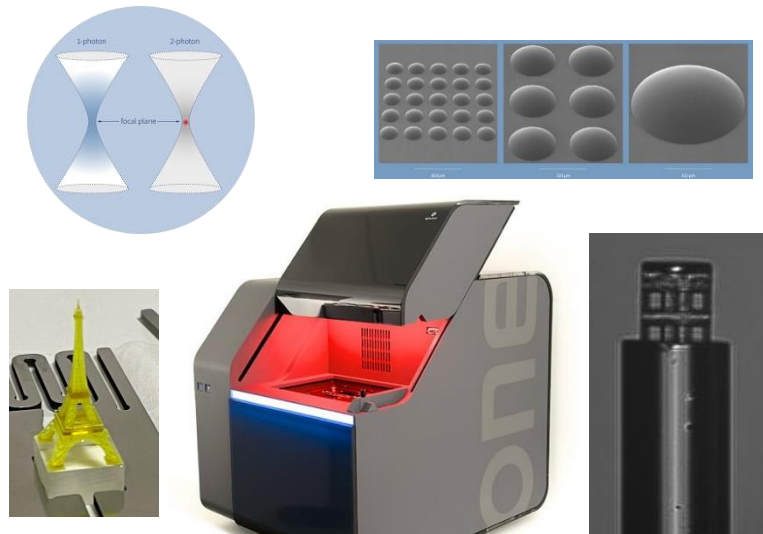
5D data storage

Eternal 5D data storage via ultrafast-laser writing in glass Kazansky et al. 2016



Ecriture de guides d'onde

Chen, G. Y., Piantadosi, F., Otten, D. et al. Femtosecond-laser-written Microstructured Waveguides in BK7 Glass. *Sci Rep* 8, 10377 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28631-3>

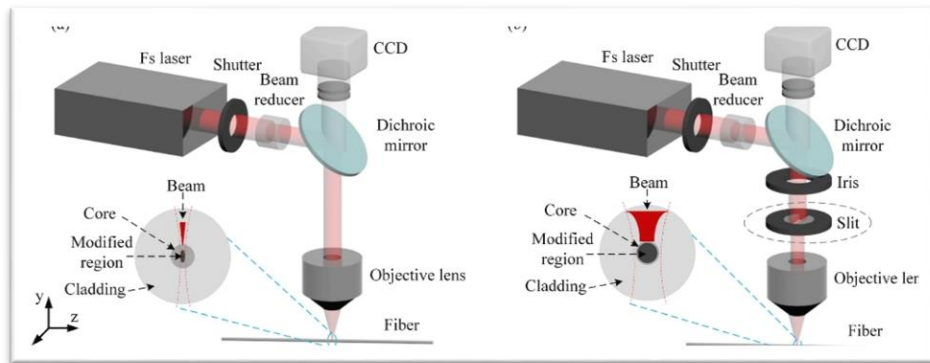


Equipex+ Add For Photonics Add4P
Présentation à suivre du PhLAM sur l'impression 3D de structures vitreuses

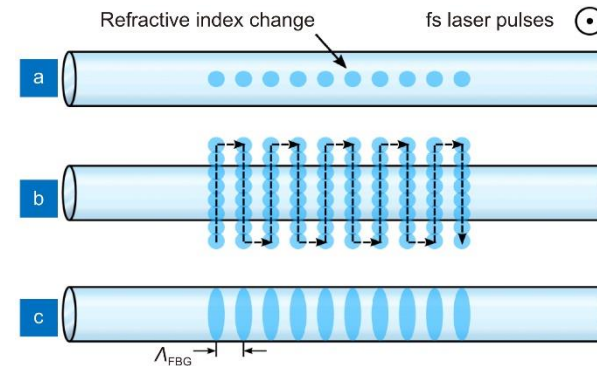
Ecriture directe par laser femtoseconde

Ecriture directe de réseaux de Bragg par laser femtoseconde

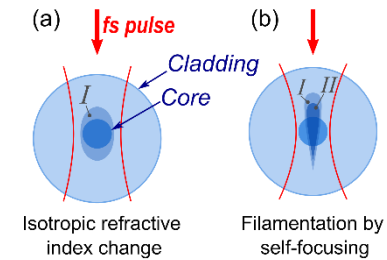
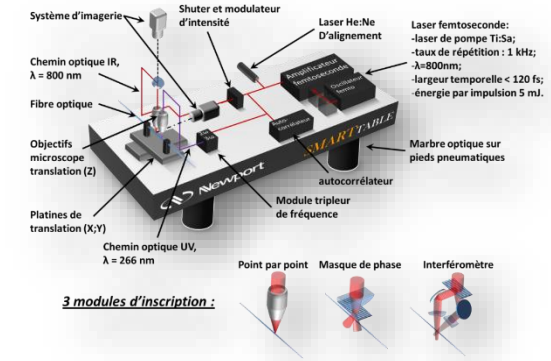
- Focalisation des impulsions lasers ultracourtes au coeur des fibres optiques
- Claquage localisé du matériau (microplasma, absorption multiphotonique)
- Création de nano/micro-structures → chapelets de micro-bulles



D'après Zhao et al., 2022, doi 10.1016/j.optlastec.2021.107473



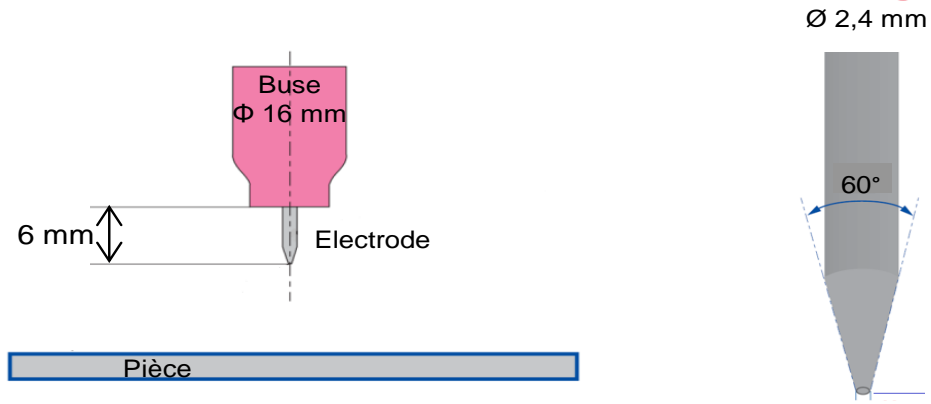
Advances in femtosecond laser direct writing of fiber Bragg gratings in multicore fibers: technology, sensor and laser applications. Opto-Electron Adv 5, 210055 (2022)



Pour quels avantages ?

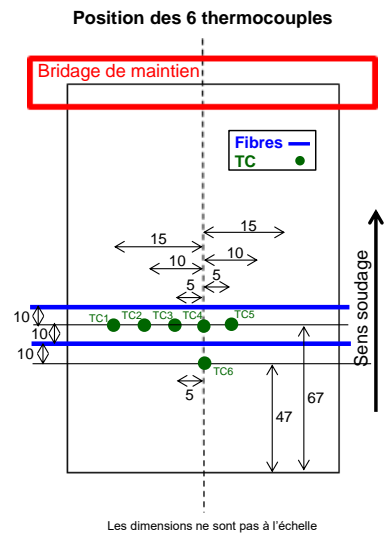
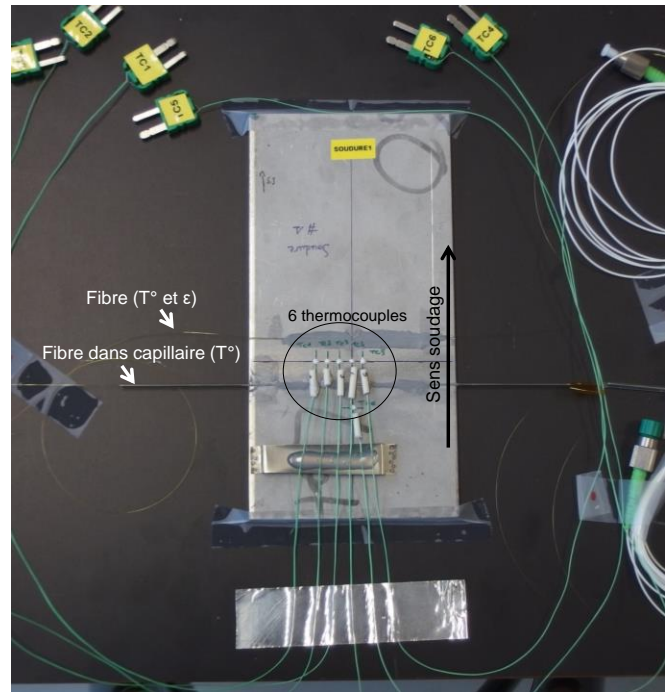
- Gravure dans tout type de verres (ou matériaux semi-transparents) → pas besoin d'un verre photosensible
- Localisation à volonté du motif gravé au sein de la fibre optique
- **Stabilité intrinsèque excellente en température (1000°C), et aux radiations ionisantes (MGy/Ggy, neutrons rapides → densification silice)**
- Améliorée par des pré-traitements
- Ecriture à travers les revêtements protecteurs → amélioration de la fiabilité mécanique (proche de la fibre prystine)
- Multiplexage spectral conservé
- Apodisation possible pour une réponse spectrale optimale (détection de pics)

Suivi d'un procédé de soudage TIG



CARACTÉRISATION D'UN CORDON DE SOUDURE

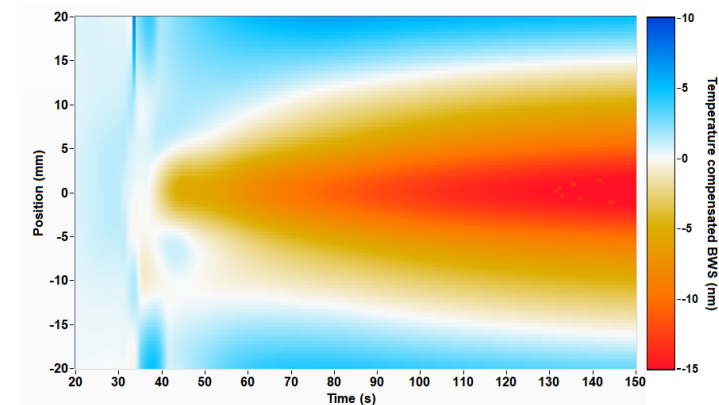
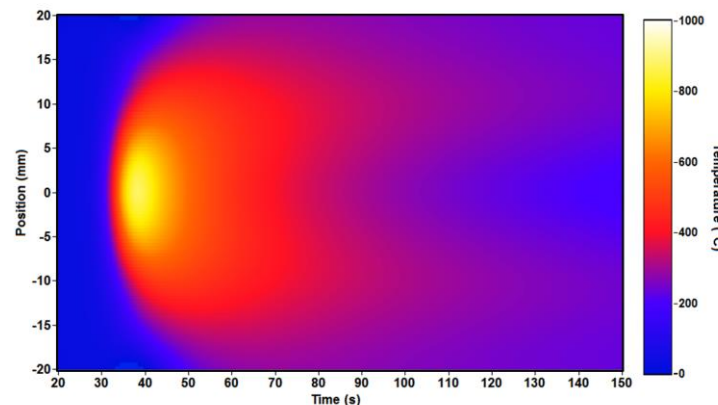
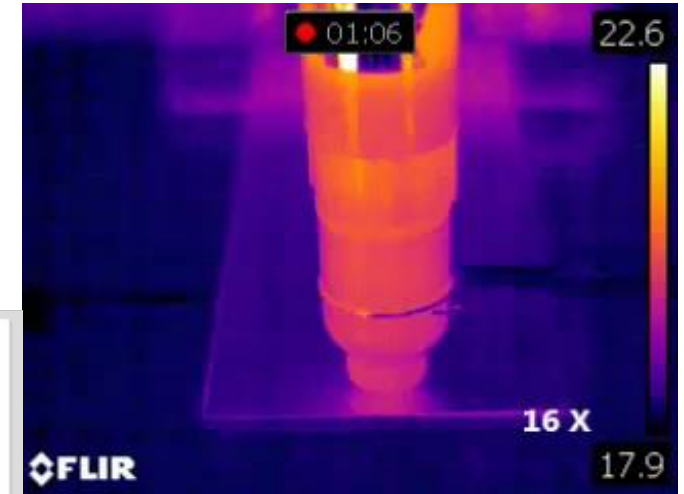
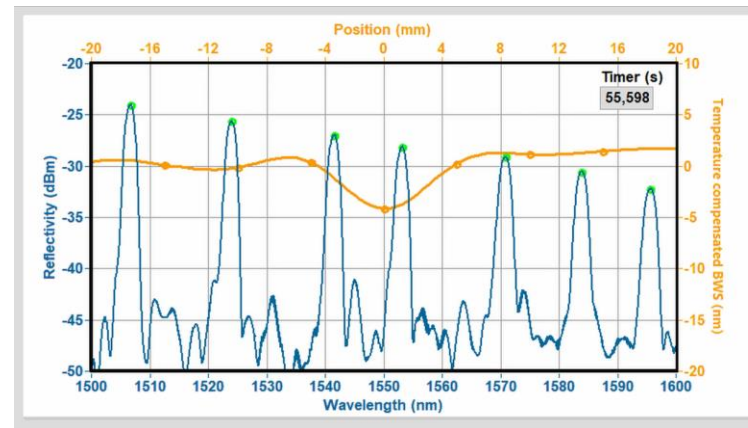
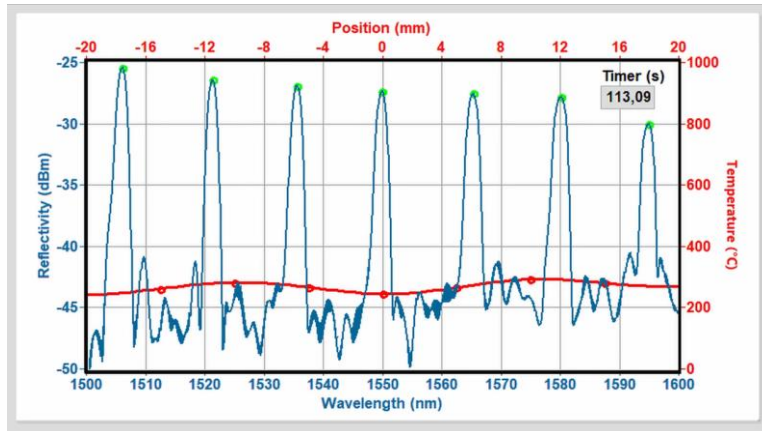
Plaque en 304L, Epaisseur 5 mm
Chapelets de 7 RdBragg femto λ -mux

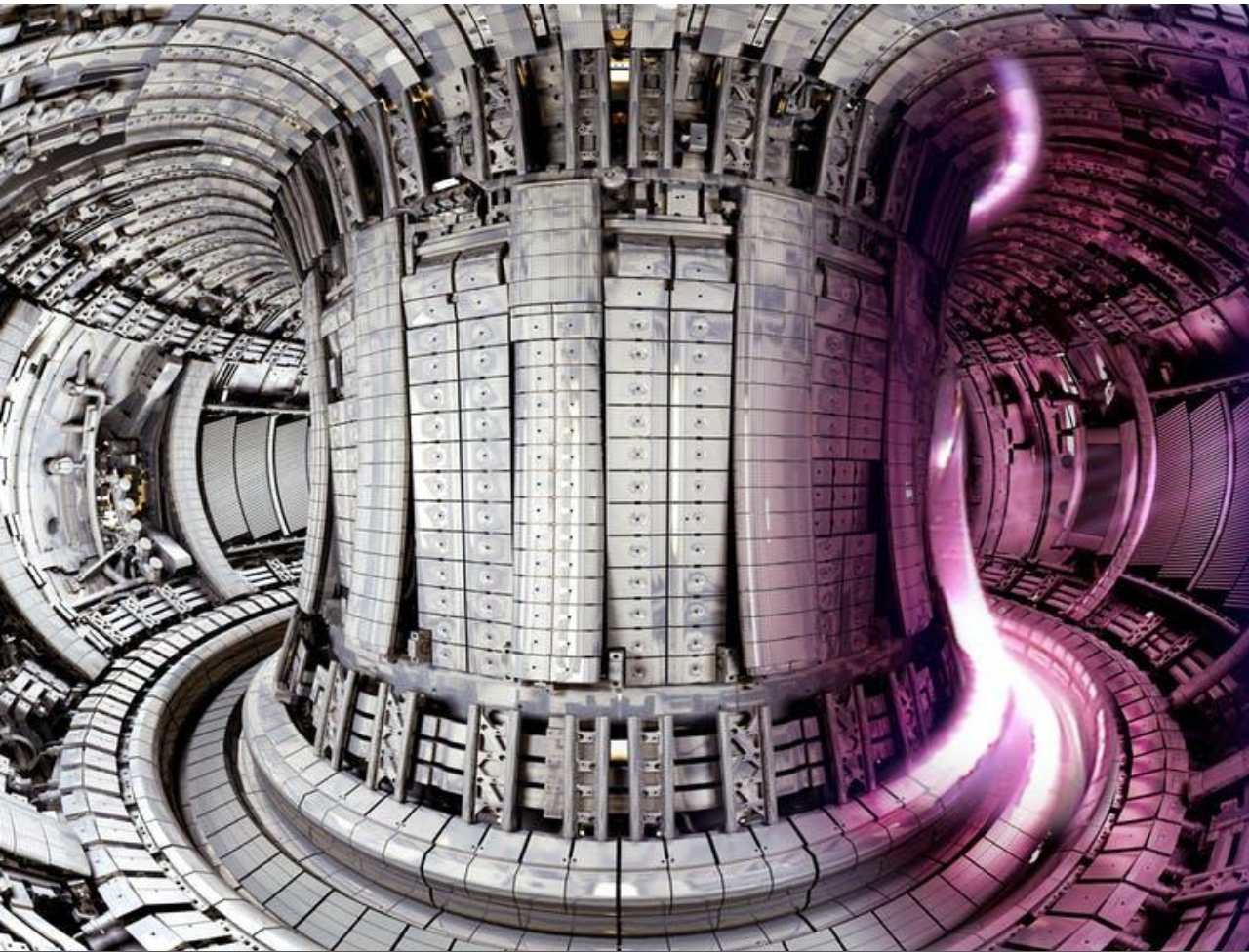


Suivi d'un procédé de soudage TIG

Instrumentation d'un procédé TIG

- Caméra thermique
- Thermocouples
- Mesures RdBragg (1 spectre par minute)
- Compensation thermique de RdBragg collés par une ligne de RdBragg insensible aux déformations





TOKAMAK WEST (CADARACHE, FRANCE)

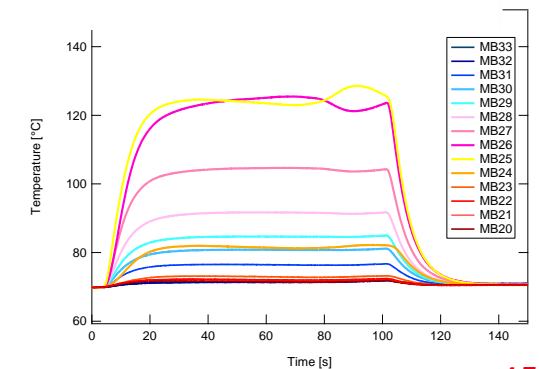
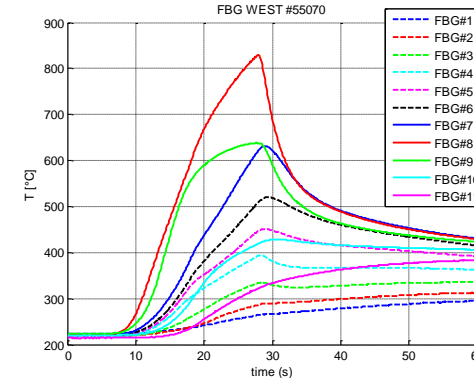
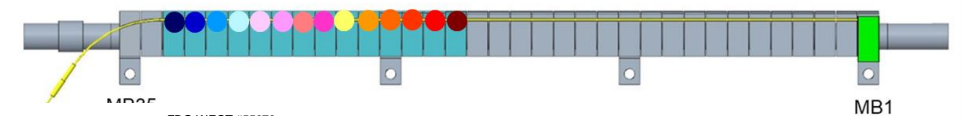
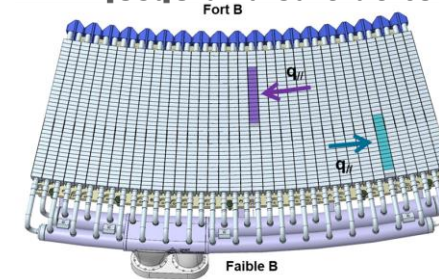
DIAGNOSTIC THERMIQUE DANS WEST $>800^{\circ}\text{C}$ BLOCS DE TUNGSTÈNE D'UN SECTEUR DU DIVERTOR DE WEST

Flux de chaleur 5 MW/m^2

A la surface du soleil $\sim 60\text{ MW/m}^2$, Sur la plage $0,001\text{ MW/m}^2$

INSTRUMENTATION COMPLÈTE

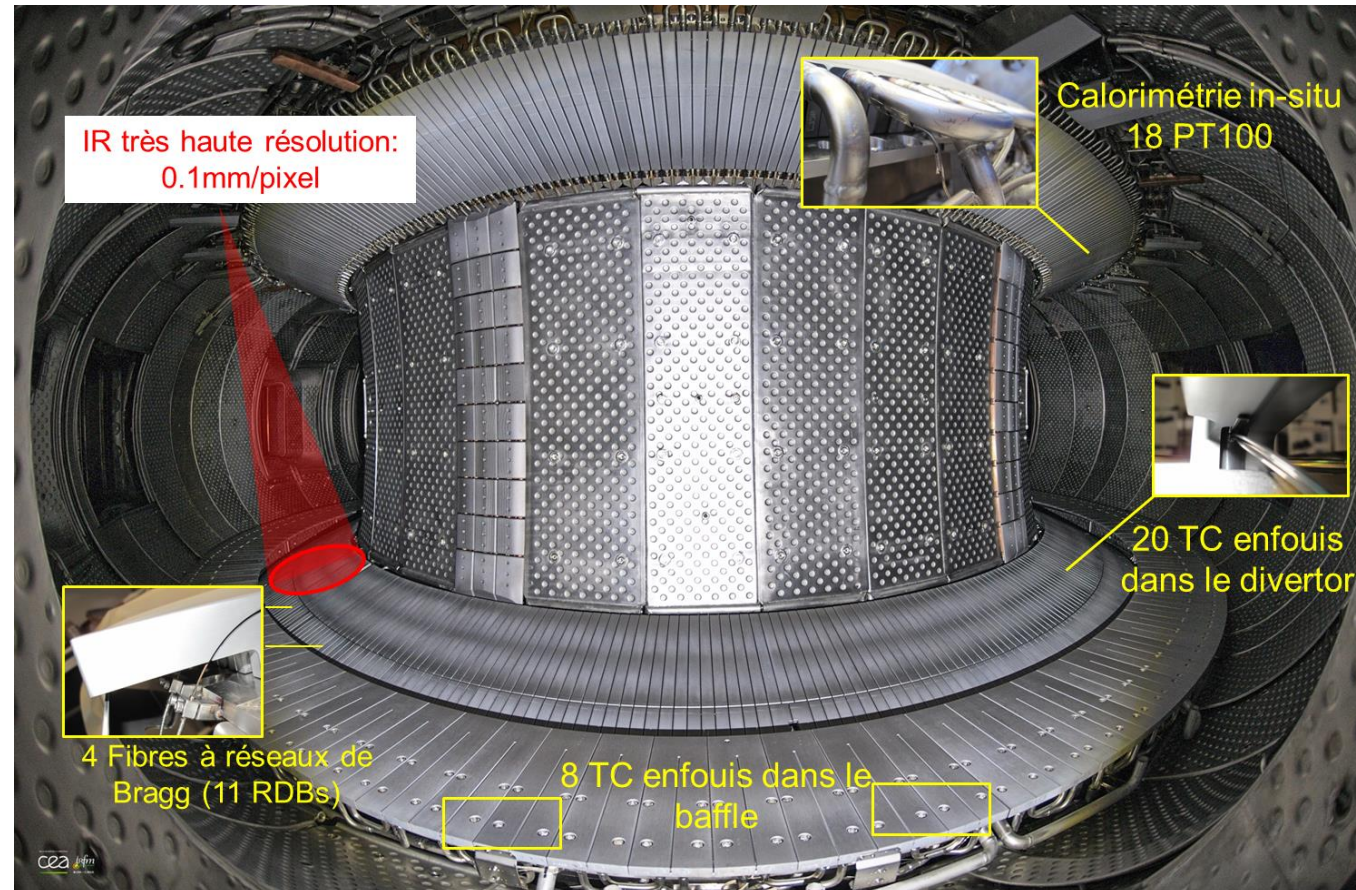
RdBragg conditionnés, Passages étanches, Ligne de déport, Interrogateur et IHM jusqu'à la salle de commande



Fusion et Tokamaks

Diagnostics thermiques dans West

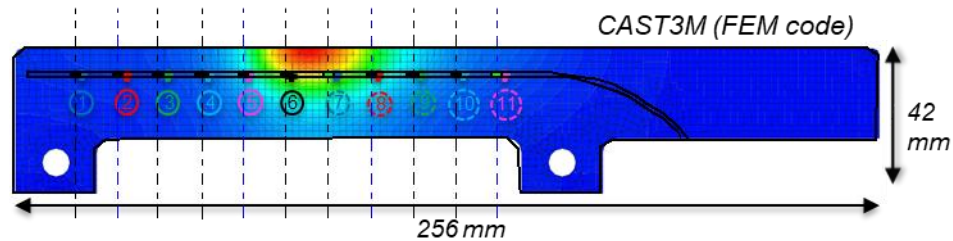
- Thermographie IR, TC
- RdBragg intégrés au Divertor
- Assurer un fonctionnement sécurisé durant des pulse plasma longs et intenses
- Contribution à l'étude de la Physique des plasmas



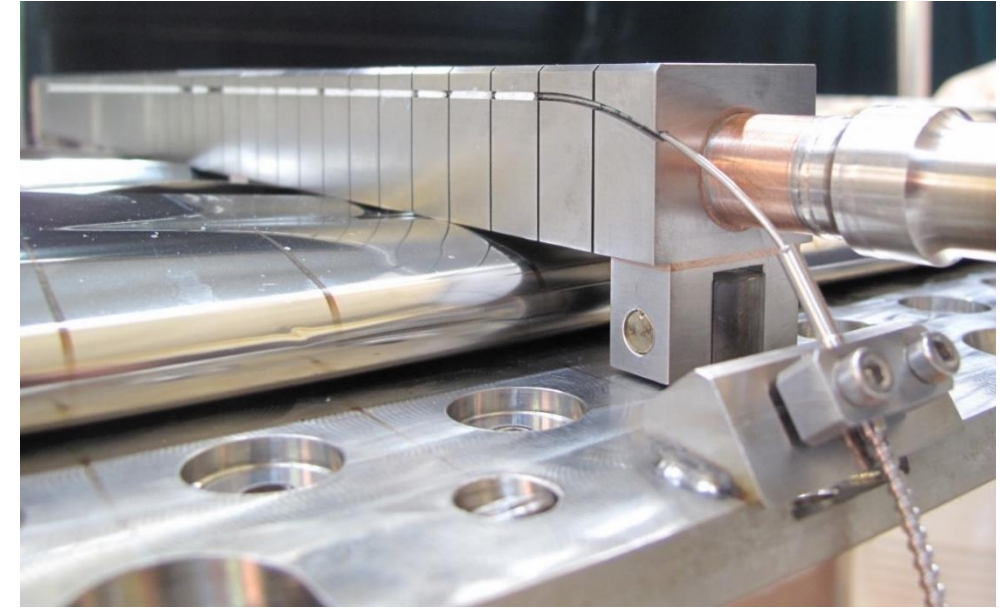
Fusion et Tokamaks

Instrumentation des aiguilles PFU di divertor de West

- Chapelets de RdBragg en capillaire métallique (sous vide)
- Reprise d'effort en sortie de divertor
- Déport puis traversée étanche pour sortir de l'enceinte sous vide
- Instrumentation déportée et données remontées en salle commande



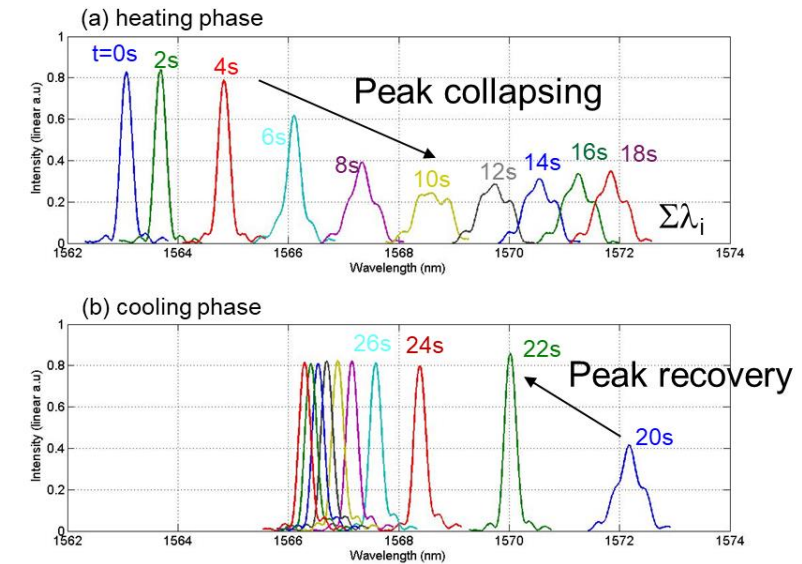
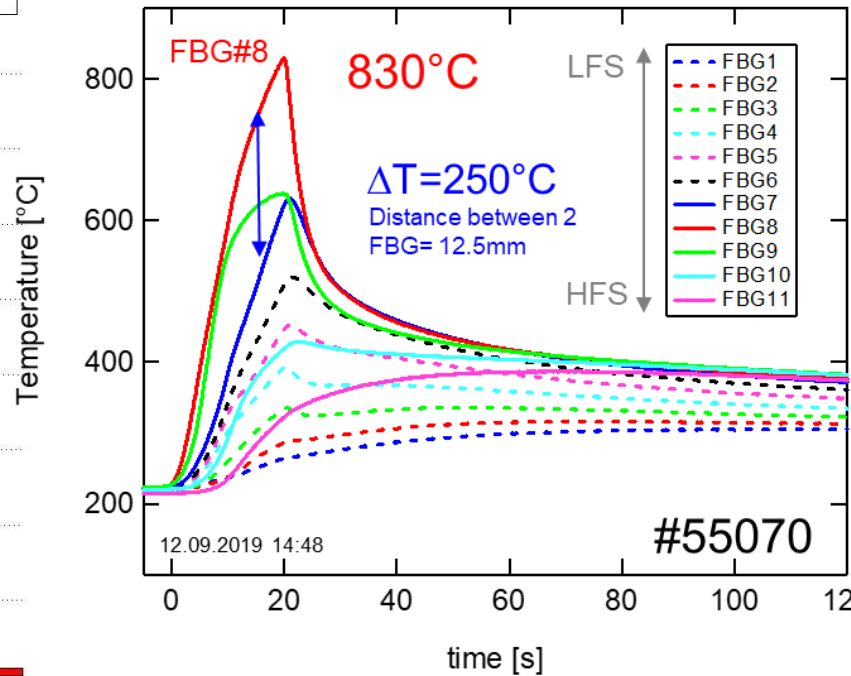
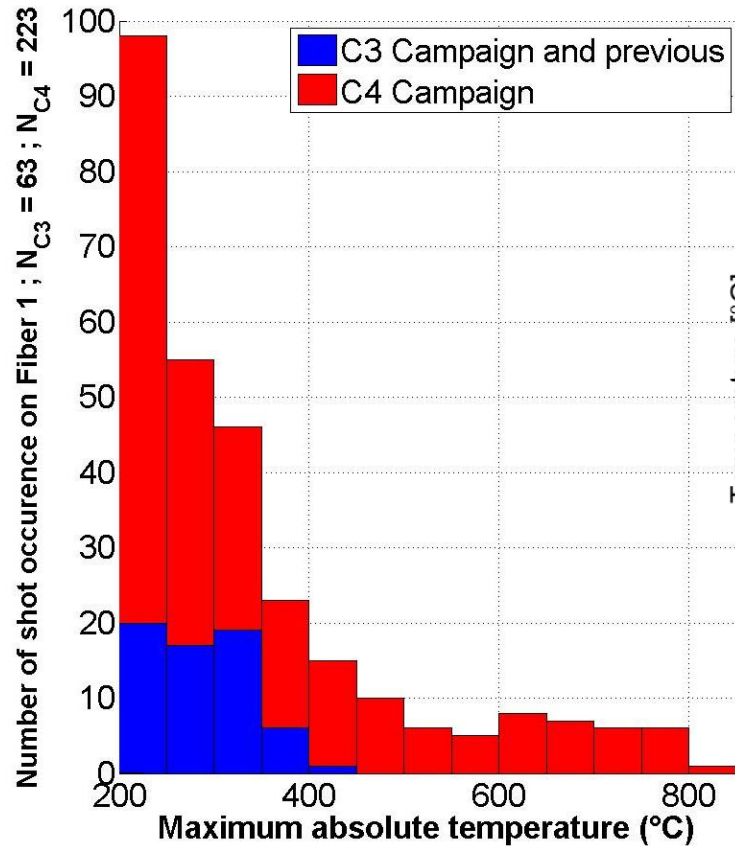
$\sim 11 \lambda_B$ espacées de 7 nm
Pour tolérer des gradients $> 40^\circ\text{C}/\text{mm}$
 540°C entre voisins distants de 12.5 mm



Fusion et Tokamaks

Beaucoup de données cumulées → Fiabilité de la mesure

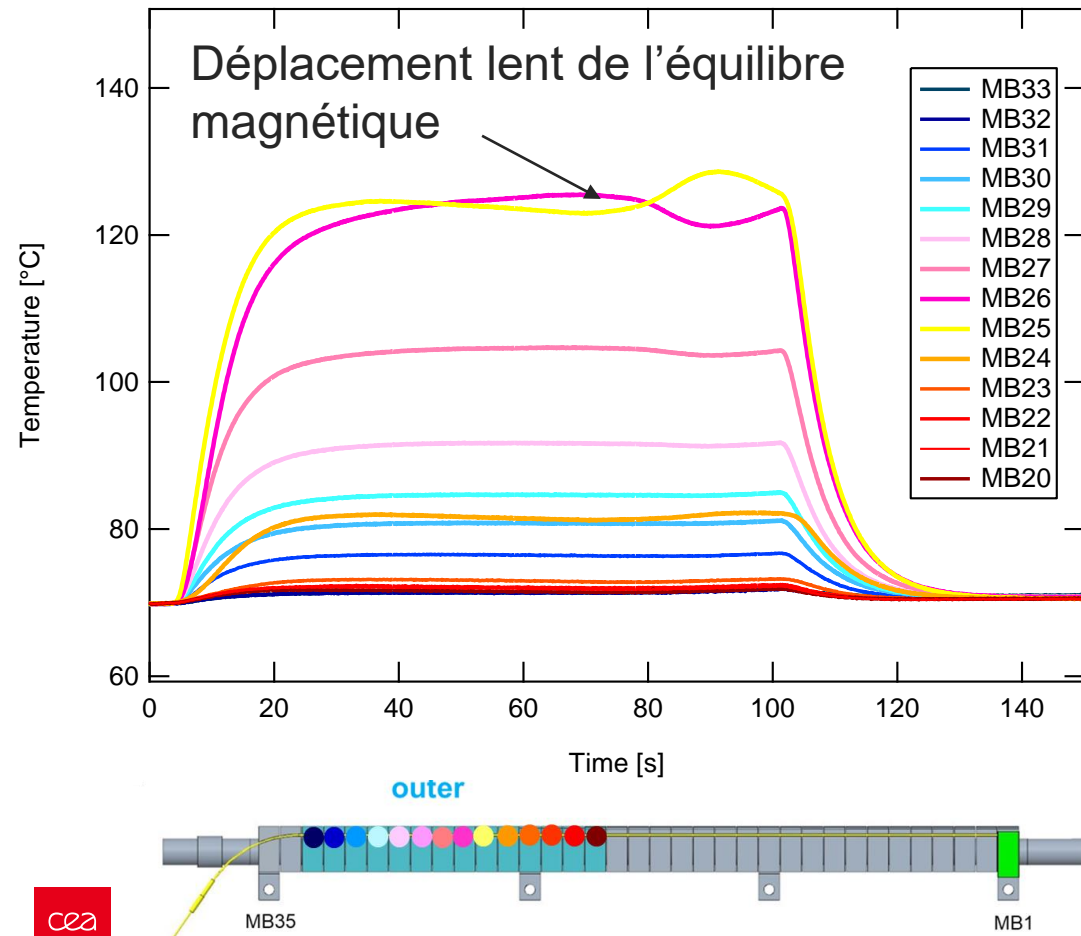
- Des pulses haute température, très puissants
- Impact des gradients de température sur la forme des pics de Bragg → algos optimisés en conséquence
- Record de gradient : 20°C/mm



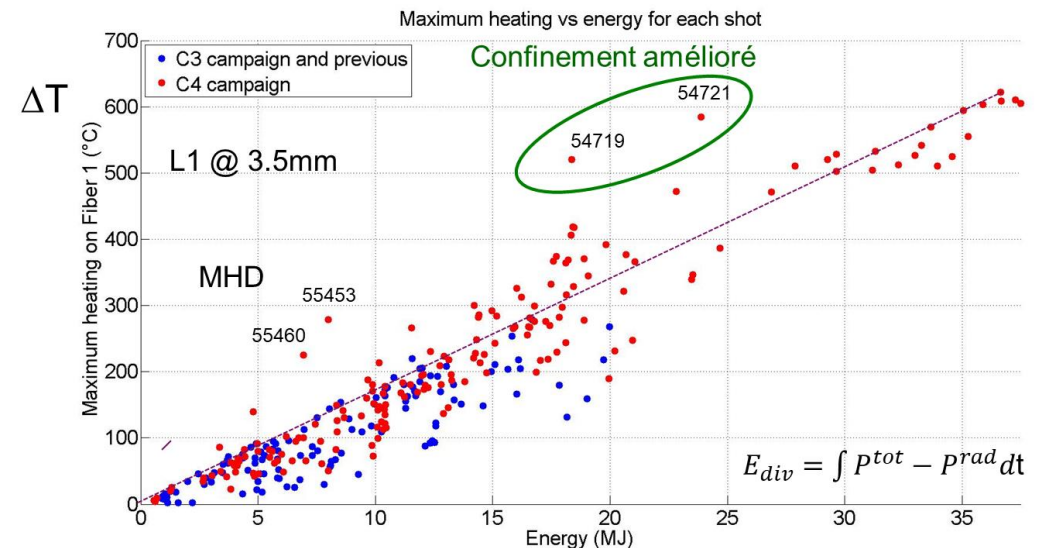
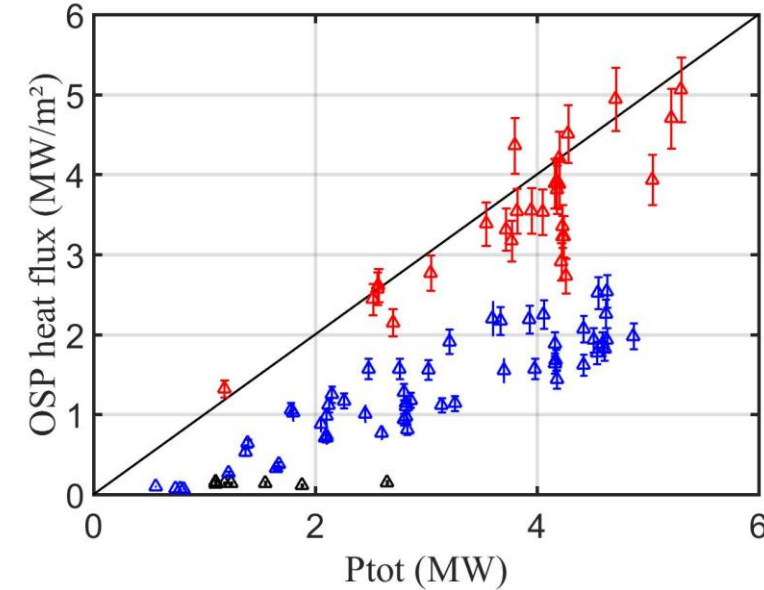
Fusion et Tokamaks

Quelques interprétations des données Bragg dans West

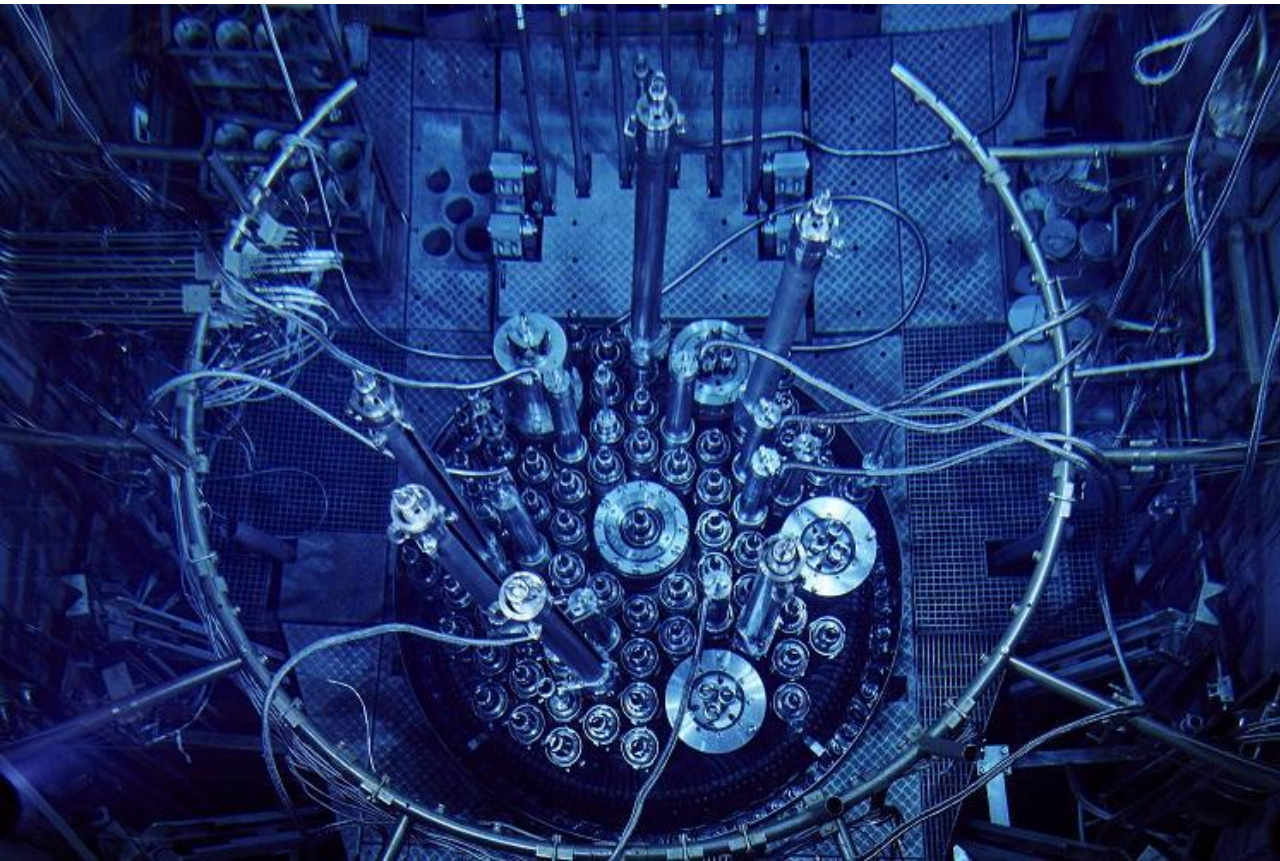
- Fournir des données d'étalonnage pour les mesures par Thermographie IR (émissivité des métaux mal connu sur toute la gamme de T°)
- Profil de température pour localiser le plasma
- Données d'entrée pour méthode inverse de calcul du flux de chaleur déposé en surface



Calcul du flux de chaleur par méthode inverse



Comportement cohérent avec les caractéristiques et performances des plasmas (rayonnement, piquage...)



CAPTEURS À FIBRES OPTIQUES POUR LA MESURE SOUS RADIATIONS IN-CORE / EX-CORE

Réseaux de Bragg haute T° (régénérés, femto)
Sondes Rayleigh amplifiées
Coating sur fibre
Traversées étanches et routage
Instrumentation Bragg, IHM et Interfaçage

Tenue aux radiations

Design de Fos « durcies » pour mesures conventionnelles (T°, Déf.,
Pression Non Intrusive, Fuite Sodium)

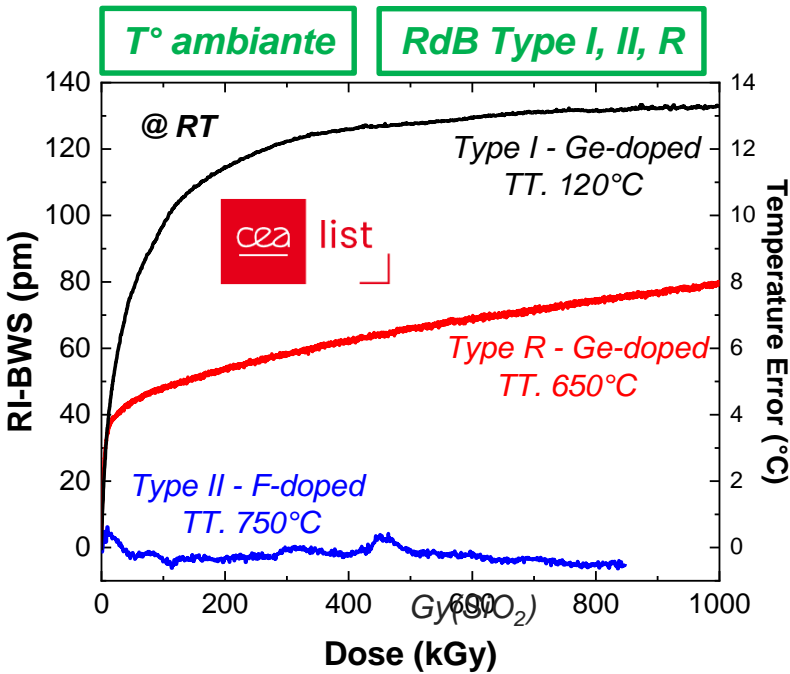
... ou bien « sensibles » pour la dosimétrie distribuée et répartie

MESURES IN-CORE PAR RÉSEAUX DE BRAGG
Expérimentation TESCA, Réacteur BR2 SCK/CEN
MIT Reactor (USA) 670°C / $>10^{20}$ neutrons.cm²

Nucléaire civil

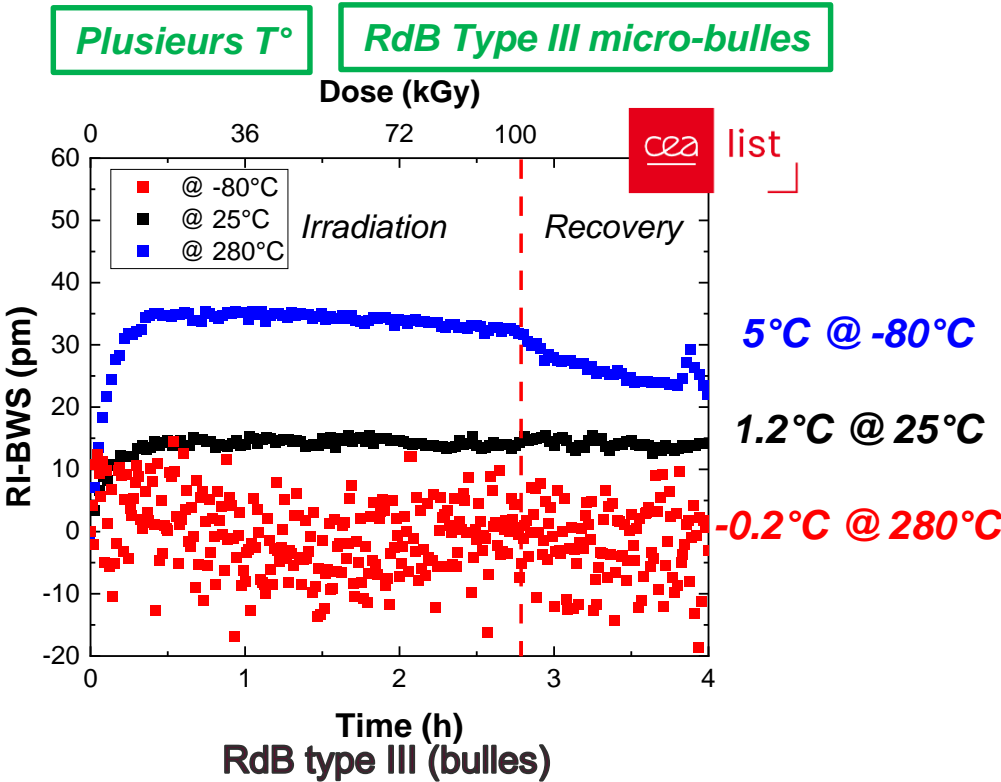
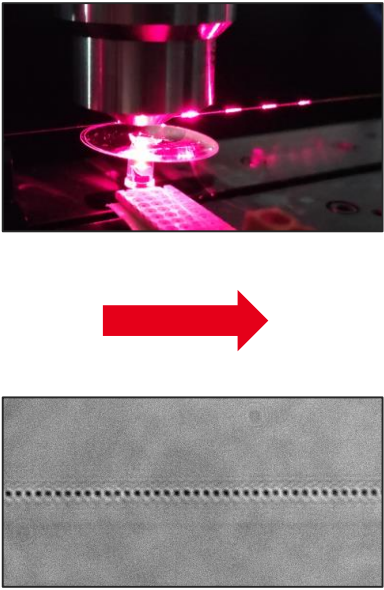
Etude du comportement des CFO sous radiations (X, Gamma, neutrons rapides) et à haute température

- Etude des dérives des mesures (dose, débit de dose) $\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_{B,0}} = \frac{\Delta n_{rad}}{n_{eff}} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda}$
- Atténuation induite sous radiation ionisante
- Aller vers la modélisation du comportement des capteurs, prédiction de durée de vie
- Collaboration avec Univ. Saint-Etienne / LabHC



RdBragg inscrits sur les plateformes du CEA List
Irradiation @LabHC

Bonne stabilité, Tenue à haute T°
Traitement thermique à haute T° nécessaire pour
stabiliser la réponse des RdBragg sous radiation X



Tenue radiation/hte T° sans aucun pré-traitement
Stabilité à haute/basse T°
Inscription dans tout type de fibre optique (radhard, silice pure, ...)



HEALTH MONITORING FOR AERONAUTIC

STRUCTURAL HEALTH MONITORING *CONTRÔLE SANTÉ INTÉGRÉE DES STRUCTURES* INSTRUMENTATION DES STRUCTURES COMPOSITES/MÉTAL INSTRUMENTATION POUR MOTEUR D'AVION

Tomographie par ondes élastiques guidées ultrasonores

RdBragg = récepteur acoustique

Interrogateur pour RdBragg dédié (~MHz)

RdBragg femtosecondes pour capteurs moteur

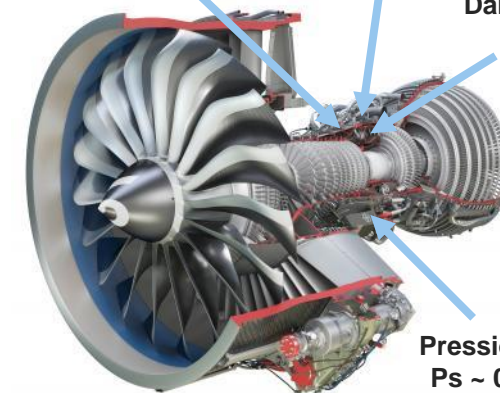
Sondes de T°/Déformations @ > 800°C

Transducteur de pression fibré (RdBragg + Fabry-Perot)

Mesure sur le carter
T < 1000°C

Paroi chambre
de combustion
T ~ 1000°C

Dans la chambre de
combustion
T ~ 2000°C



Pression statique
Ps ~ 0 à 50 bars

Moteur LEAP (SAE)

Exemples de vecteurs aériens et composants concernés

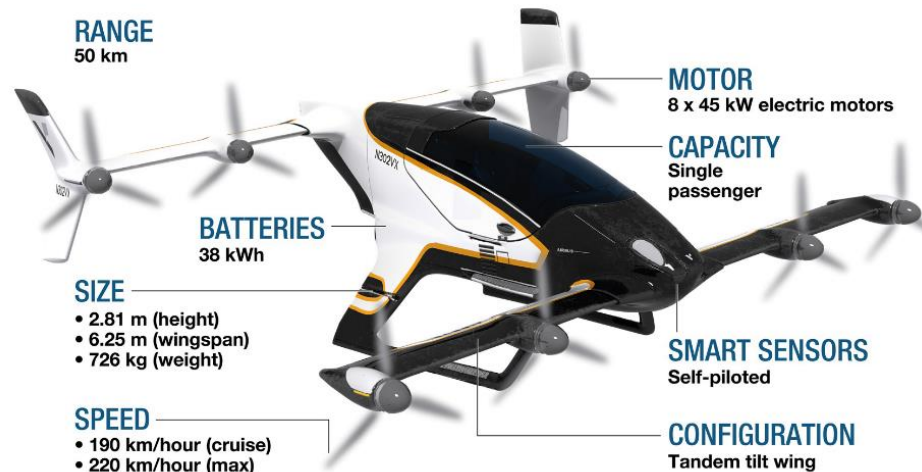


« One-size-fits-all approach » n'est plus valide
Diversité de nouveaux fuselages

Structure composite ++ → ! Endommagement/Fatigue
Portance et trainée → Shape sensing, pression

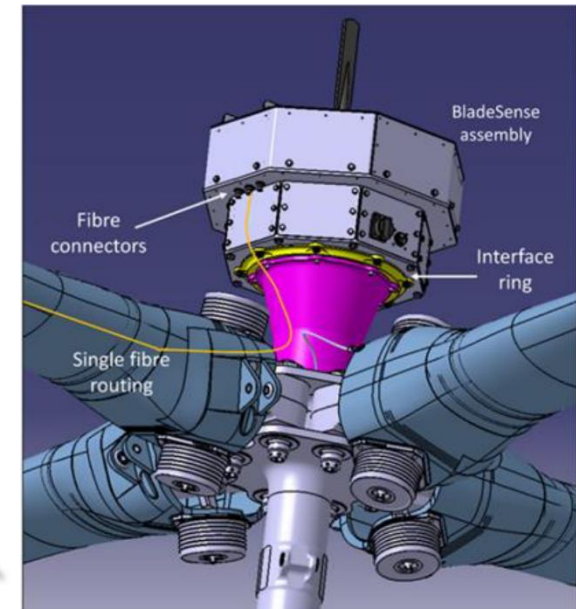


Open rotor, moteurs à fort taux de dilution
→ Aubes



Concept Vahana, « tout électrique »

Confidentiel CEA

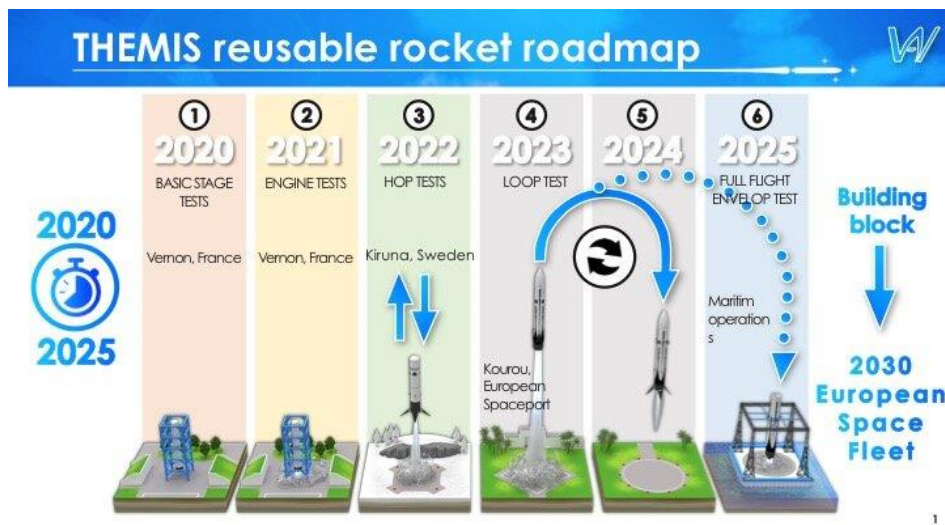


Rotor instrumenté

... aussi pour le spatial

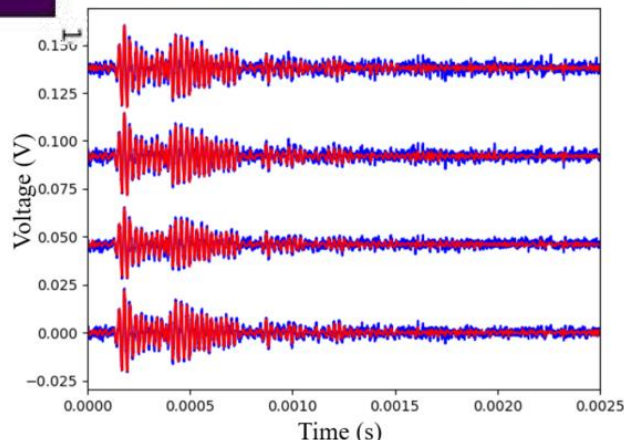
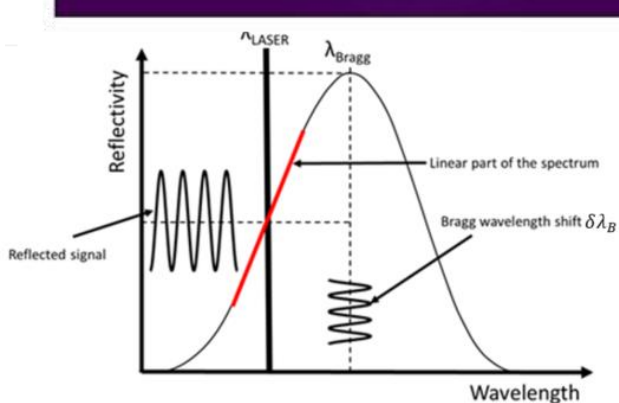
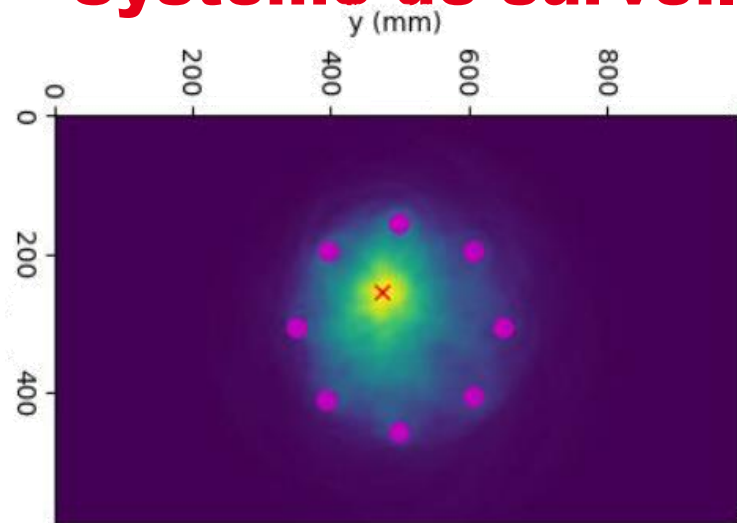
Lanceurs réutilisables : réduire les coûts d'accès à l'espace

- Space X ...
- **ESA : Themis et moteur Prometheus**
- Optimiser la maintenance et revalider les lanceurs entre deux tirs (composite ++, bouclier thermique, réservoir)
- Suivi durant les phases de vol
- Contrôler l'intégrité des éléments du moteur (Prometheus)
- **A croiser avec des besoins pour les lanceurs « militarisés », systèmes hypersoniques**
- Capteurs intégrés, systèmes embarqués, calcul embarqué, cadence d'échantillonnage, transmission
- CFO régulièrement mis en avant pour la partie capteurs, avec besoin de systèmes très intégrés
- Hautes températures mais aussi T° cryogéniques, Déformations, Vibrations, Radiations ionisantes



©AirbusGroup Holding

Système de surveillance santé intégré des structures

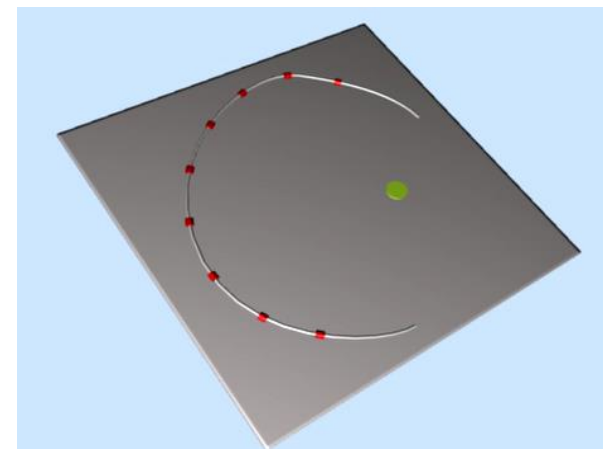


**RÉCEPTEURS ULTRASONORES À RDBRAGG
POUR LE SHM**

RÉCEPTEURS ULTRASONORES À RÉSEAUX DE BRAGG TOMOGRAPHIE PAR ONDES ELASTIQUES GUIDÉES

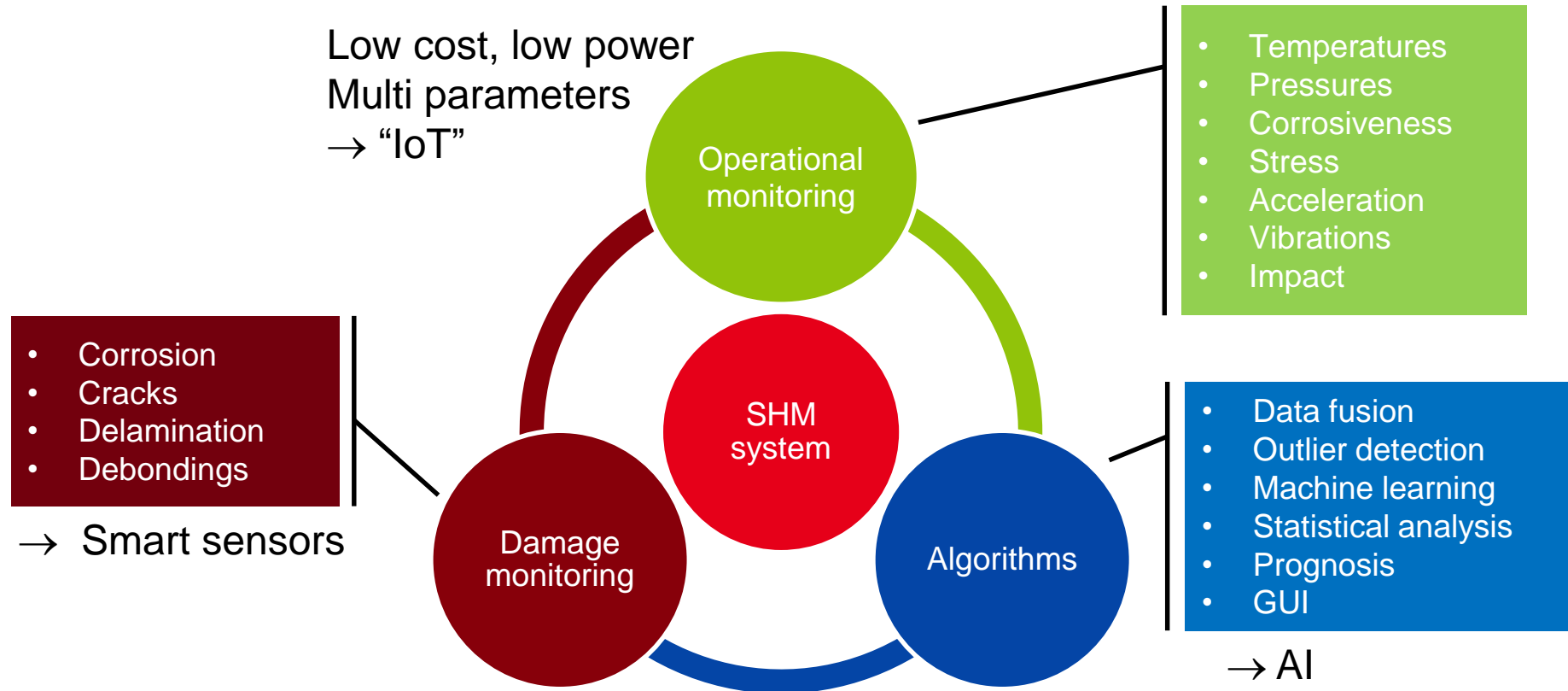
Développement de CFO (réseaux de Bragg)
peu intrusifs et multiplexables
pour effectuer de la tomographie par ondes guidées

- Mesure quasi-distribuée d'ondes élastiques guidées ultrasonores (plaques, coupons, pipes métal/composite, ...)
- Tomographie active/passive (bruit ambiant)
- Domaines d'application: Aéronautique, Spatial, Naval/sous-marin, Oil & Gas, Génie Civil



Système de surveillance santé intégré des structures

Contrôle santé intégré, Contrôle santé des structures, Structural Health Monitoring

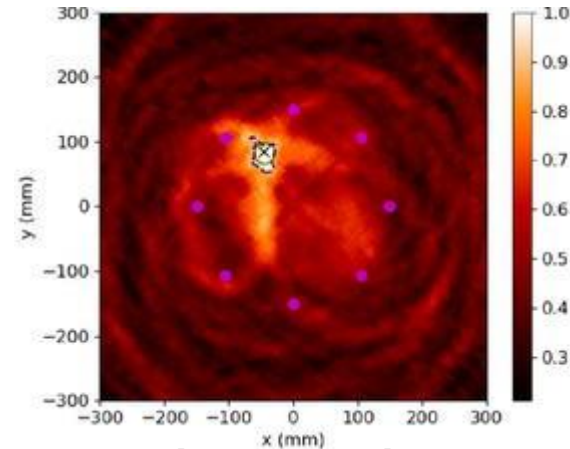
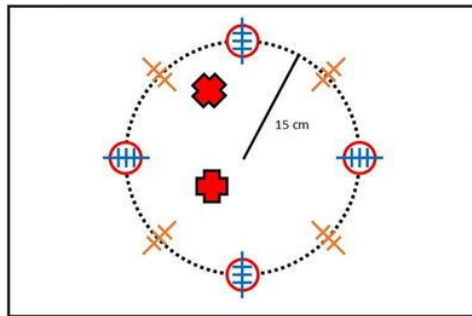


→ Parution décembre 2022

Tomographie passive par RdBragg pour la détection de défauts

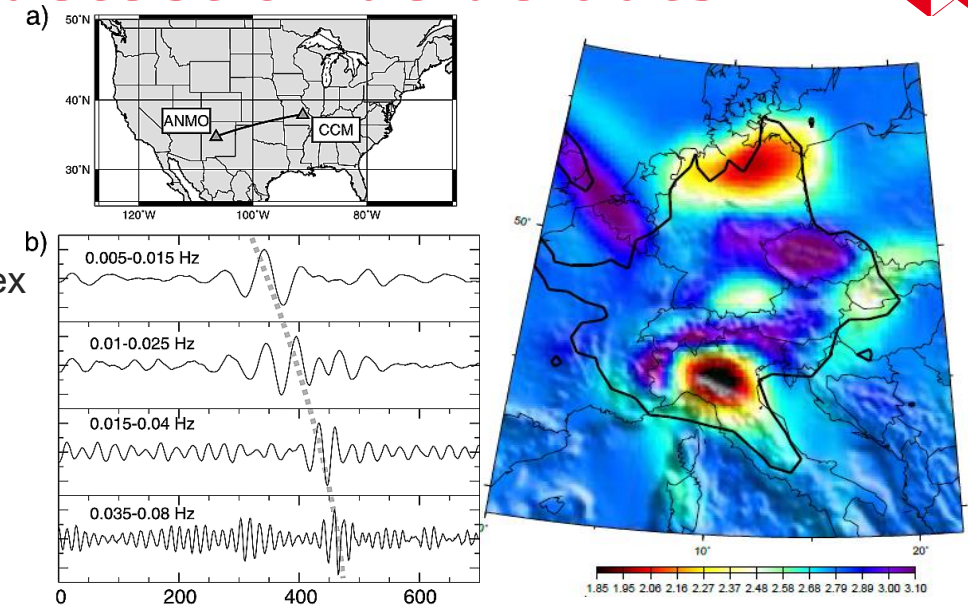
Tomographie passive (Aéronefs, Tuyauterie pour Oil&Gas/Nucléaire)

- Méthode issue de la Géophysique (analyse des ondes sismiques, Pr. M Campillo)
- Utilise le bruit ambiant (généré par la structure en fonctionnement/opération)
- La structure crée son propre signal d'interrogation (pas besoin d'émetteurs PZT par ex)
- Signal "sonde" = Onde élastique guidée @ fréquences ultrasonores
- Réseaux de Bragg multiplexés en longueur d'onde utilisés comme récepteurs acoustiques ultrasonores
- Système de mesure pour réseaux de Bragg opérant à des f ultrasonores

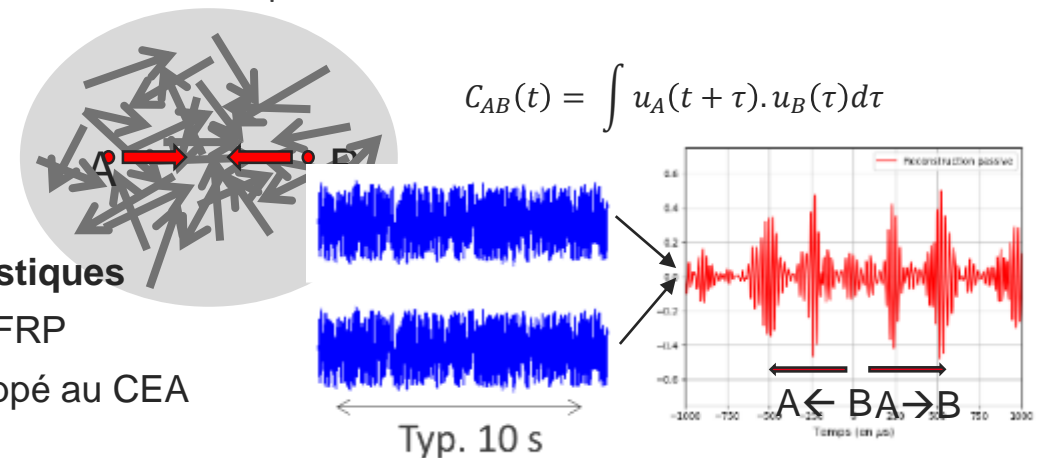


Tomo passive par réseaux de Bragg (8) utilisés comme récepteurs acoustiques

- Dommage artificiel (paire d'aimants) détecté sur un panneau composite CFRP
- Réseaux de Bragg interrogés à $f_{ech} = 1$ MHz avec transimpédance développé au CEA
- Bruit = jet d'air comprimé balayant la surface



→ (Gauche) Ondes de Rayleigh identifiées après une propagation sur plusieurs milliers de km (Droite) Tomographie extraite du bruit sismique

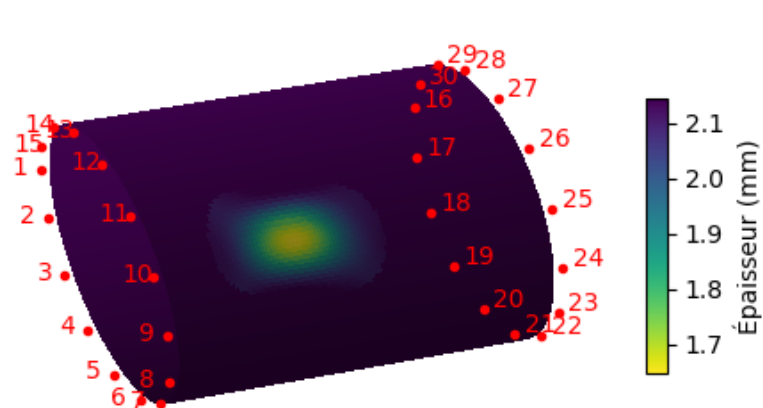


Détection de corrosion sur tuyauterie

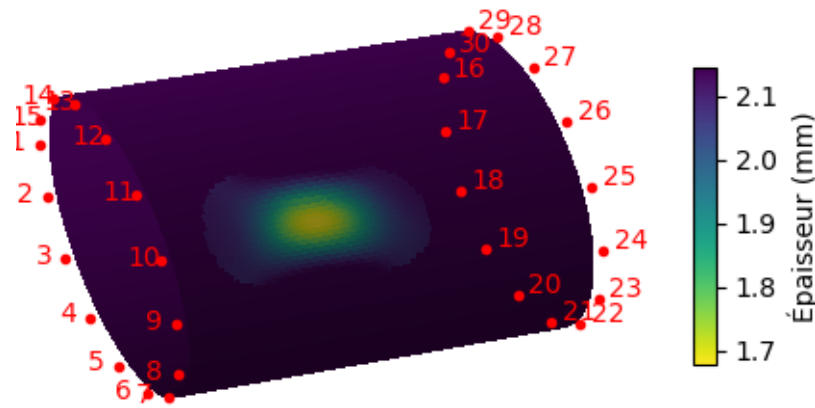
Comparaison méthode active / méthode passive

■ Défaut : corrosion

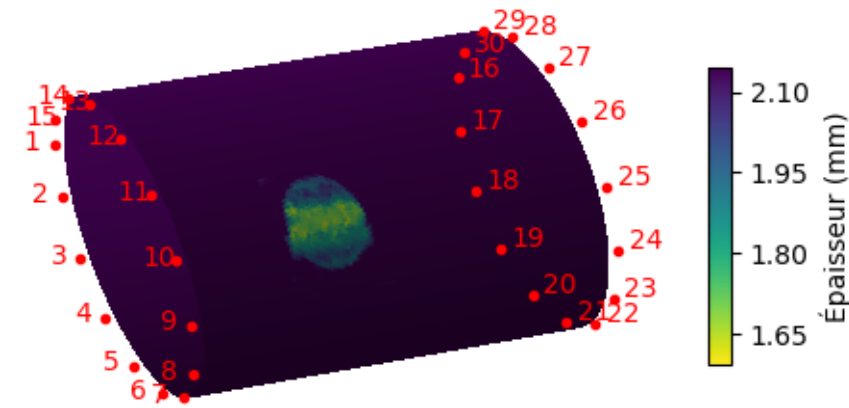
Reconstruction de tomographie active



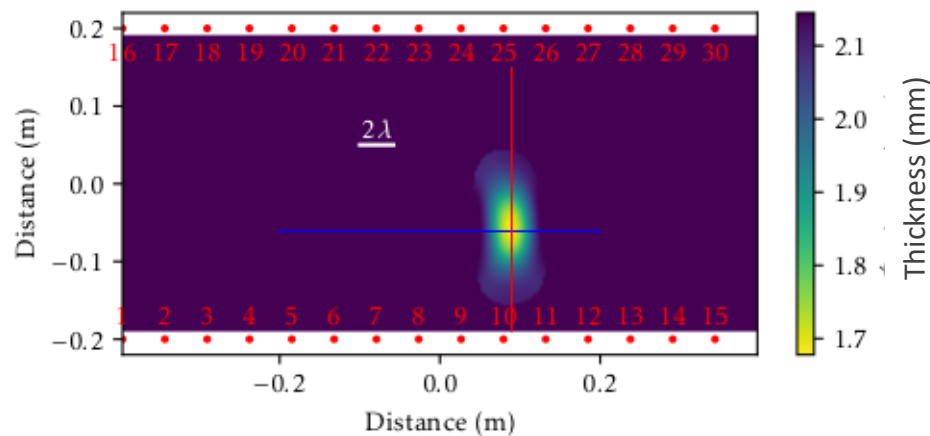
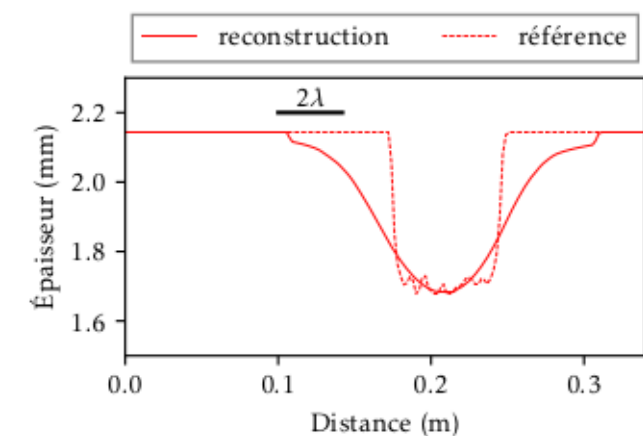
Reconstruction de tomographie **passive**



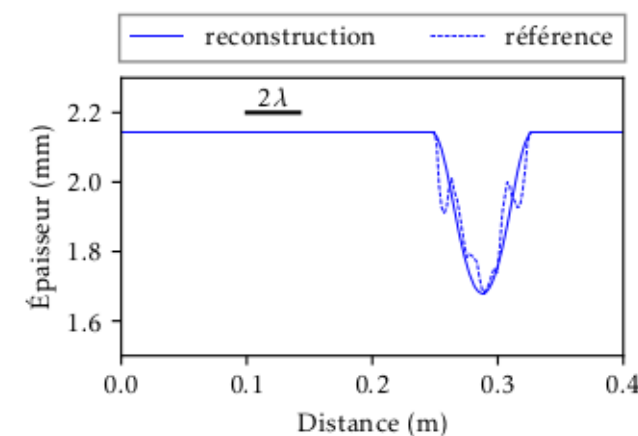
Scan 3D de référence



Profil axial



Profil circconférentiel



Perspectives

- **SHM Structural Health Monitoring par Fibre Optique/Réseau de Bragg** en contexte lanceur réutilisable
 - Tomographie active/passive mais aussi Monitoring de paramètres environnementaux (T°/Déformations/Vibrations/Accélération)
 - Maintenance prédictive et IA, durée de vie des composants
- **Instrumentation des boucliers thermiques** (par ex vs érosion haute T° ← Solution brevetée CEA sur le sujet)
- **Instrumentation systèmes propulsifs**
- **Instrumentation des réservoirs ("Jaugeage carburant")**
- **Dosimétrie par fibre optique et Monitoring environnemental en contexte vol spatial** (missions longues durées)
- **Instrumentations de mesures** compactes, robustes et de faible consommation MAIS performantes métrologiquement (stabilité)
 - Travaux CEA sur les interrogateurs en optique intégrée (Puce Photonique)
- **Algorithmes de traitement du signal, codes embarqués**



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE