

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea



UNIVERSITÉ
DE REIMS
CHAMPAGNE-ARDENNE

www.cea.fr



GRESPI

**Groupe de Recherche
En Sciences Pour l'Ingénieur**

PYROMÉTRIE OPTIQUE POUR LE SUIVI DE TEMPÉRATURE DE GAINÉ EN APRP SIMULÉ (RJH)

Liana Ramiandrisoa, N. Horny, G. Cheymol, T. Duvaut

Journée technique SFT 2014 | DEN/DANS/DPC/SEARS/LISL – URCA/GRESPI

13 FÉVRIER 2014

Thèse janvier 2011 – mai 2014 > post-doctorat?

Etude et développement d'une mesure pyrométrique en cœur de réacteur pour le suivi de la température d'une gaine de combustible : application à l'étude des accidents de perte de réfrigérant primaire (APRP) au cours d'essais de simulation dans le réacteur expérimental Jules Horowitz (RJH)

Participants

Groupe de Recherche en Science pour l'Ingénieur (URCA GRESPI/CATHERM)

Directeur de thèse Thierry Duvaut, co-encadrant Nicolas Horny

CEA

Laboratoire Ingénierie des Surfaces et des Lasers (DEN/DANS/DPC/SEARS/LISL)

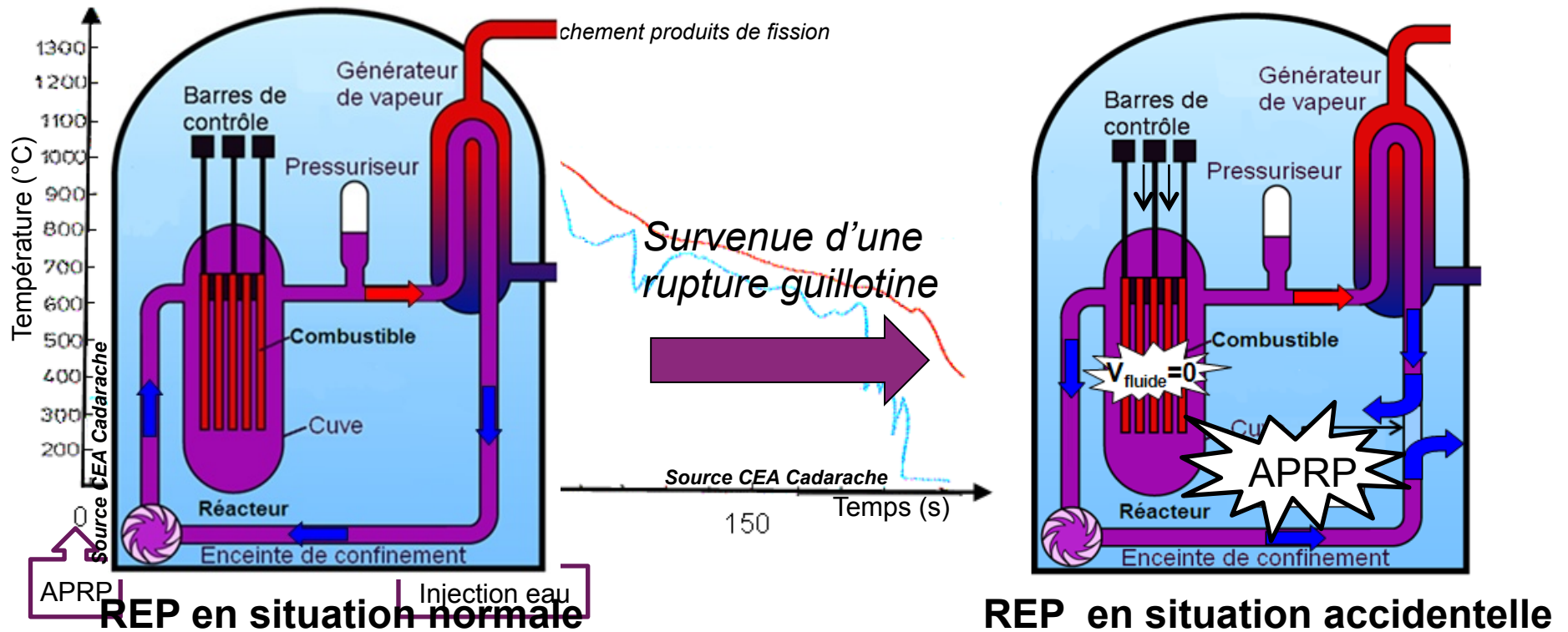
Encadrant CEA Guy Cheymol

Département Matériaux Nucléaires (DEN/DANS/DMN/SRMA)

Service Physique Expérimentale (DEN/CAD/DER/SPEX)

Service Réacteur Jules Horowitz (DEN/CAD/DER/SRJH)

Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP)

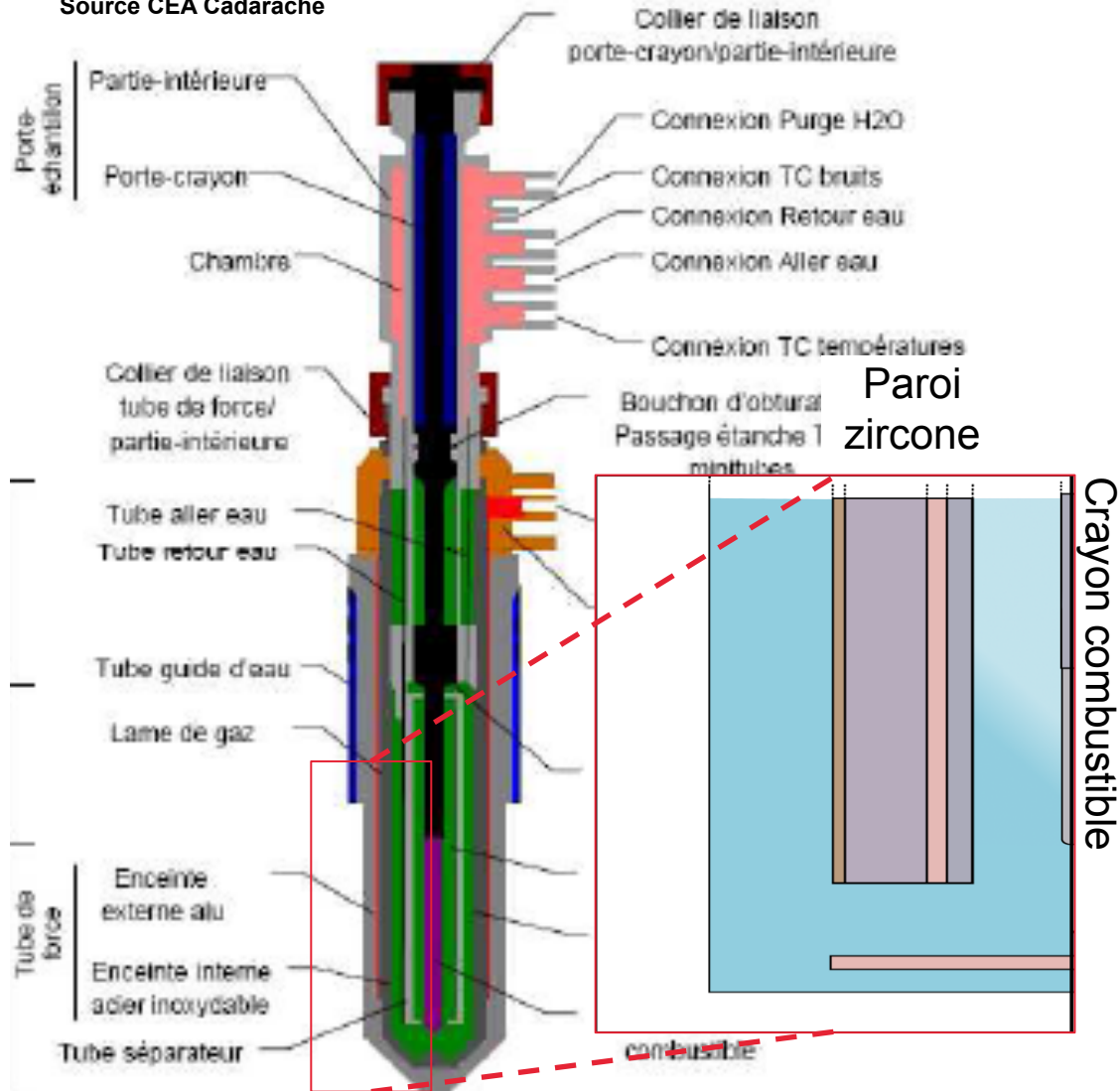


- Primaire:** Transitoire APRP
- $P = 155 \text{ bars}$
 - $T_f = 295^\circ\text{C}$
 - $T_c = 325^\circ\text{C}$

- Primaire:**
- Chute pression
 - Éjection vapeur eau
 - Vidange cœur

REP = Réacteur à Eau Pressurisée

Source CEA Cadarache



Modèle : le dispositif Griffon

LORELEI

LORELEI (Light water One Rod Equipment for Loca Experimental Investigation) dispositif expérimental pour simulation de transitoire APRP sur un unique crayon combustible au Réacteur Jules Horowitz (Cadarache):

- Thermomécanique
- Contamination

Objectif

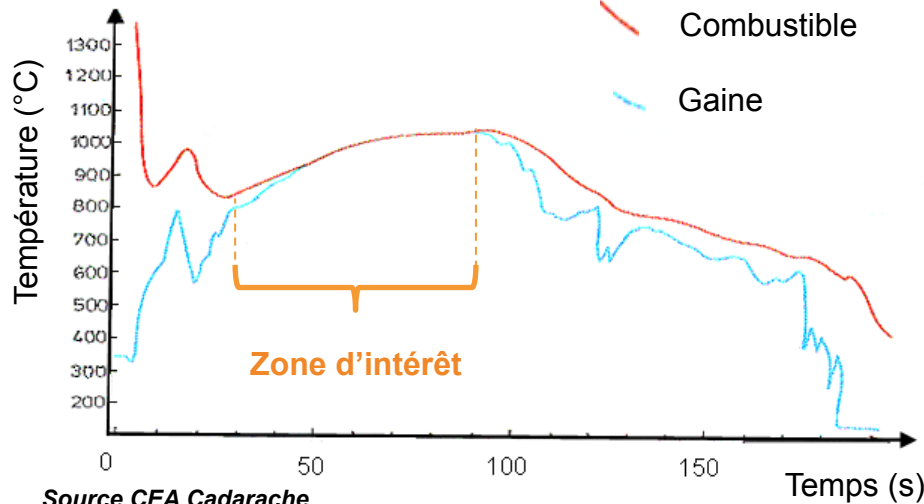
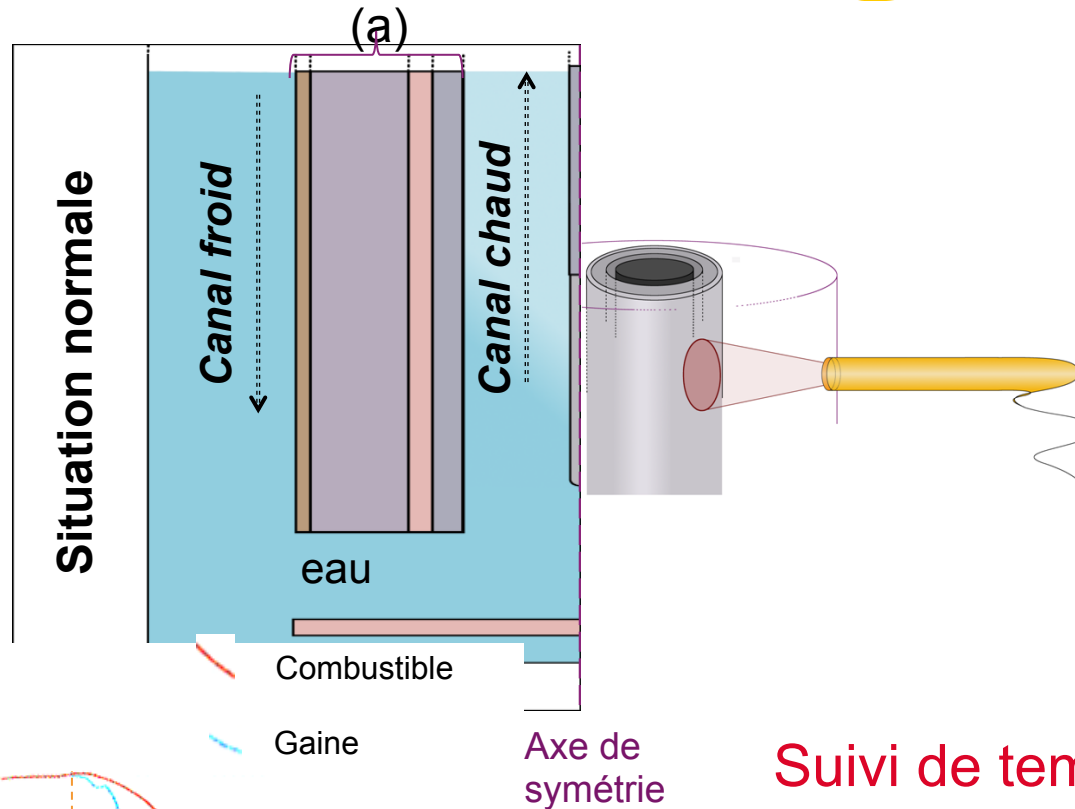
Défis Techniques

Pyrométrie (expérimental)

APRP LORELEI

Légende

- (a) Paroi zircono
- (b) Crayon combustible



Source CEA Cadarache

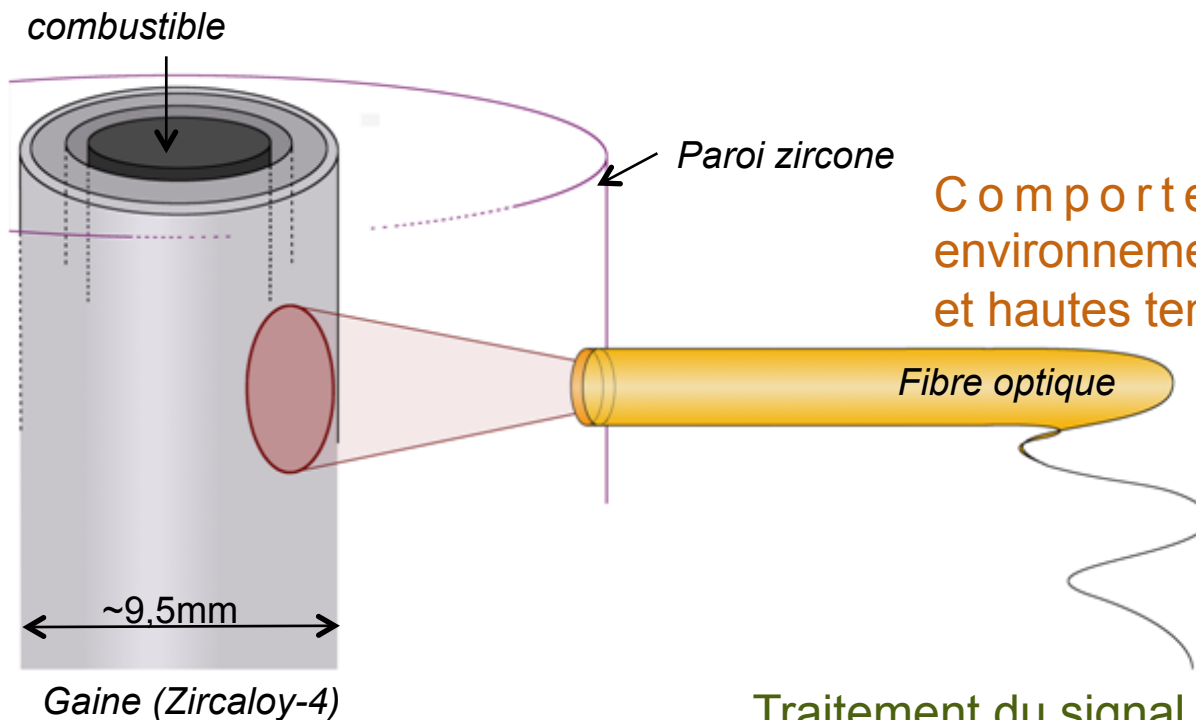
Transitoire APRP

Suivi de température

- Mesure à distance de la température gaine déportée par fibre optique
- Temps réel (max ~1s)
- Plage : 700 à 1200 °C
- Incertitude : +/-10°C

Démarche adoptée

Compréhension du signal émis par la gaine 1/3



Comportement des fibres en environnement sévère (fortes irradiations et hautes températures) 2/3

Traitement du signal par pyrométrie 3/3

Objectif

Défis Techniques

Pyrométrie (expérimental)

COMPRÉHENSION DU SIGNAL GAINÉ (DÉFI 1/3)

Luminance émise par gaine (loi de Planck)

$$L_{CN}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \times (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} [W / m^2 / sr / m] \quad \epsilon_{gaine} \leq 1$$

$$L_{gaine}(\lambda, T) = L_{CN}(\lambda, T) \times \epsilon_g [W / m^2 / sr / m]$$

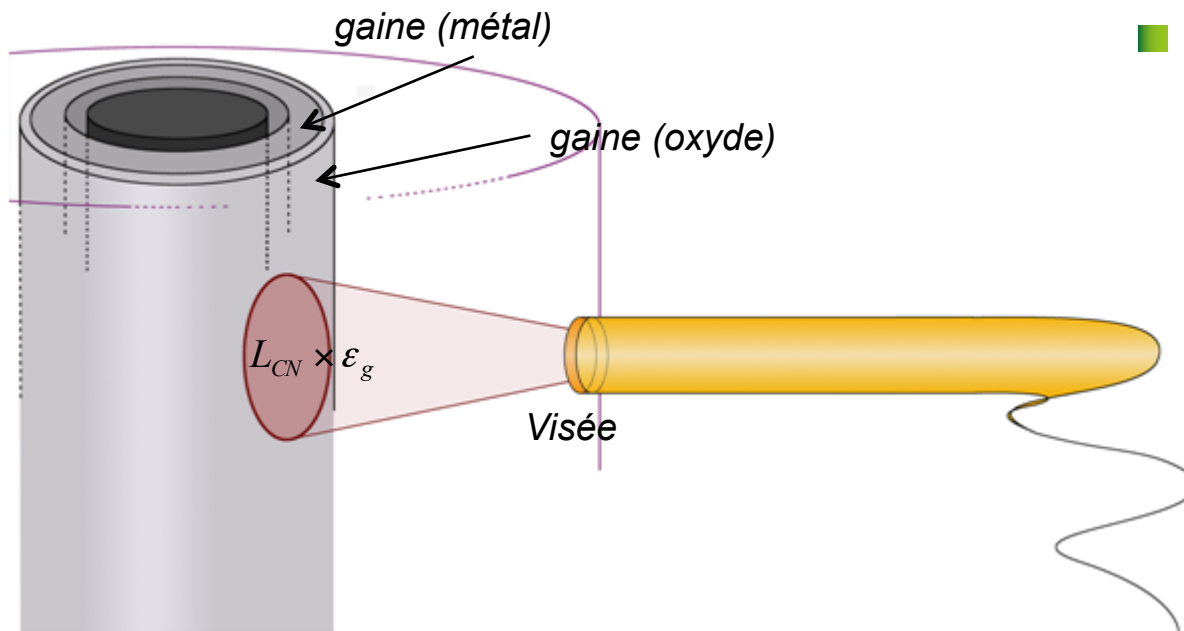
ϵ_{gaine}

Visée

- Angle d'incidence
- Longueur d'onde

Physico-chimie

- Matériau (alliage Zr) → Zircaloy-4
- Température
- Transition de phase solide/solide
- Atmosphère



Surface

- Épaisseur d'oxyde
- Rugosité
- Fissuration

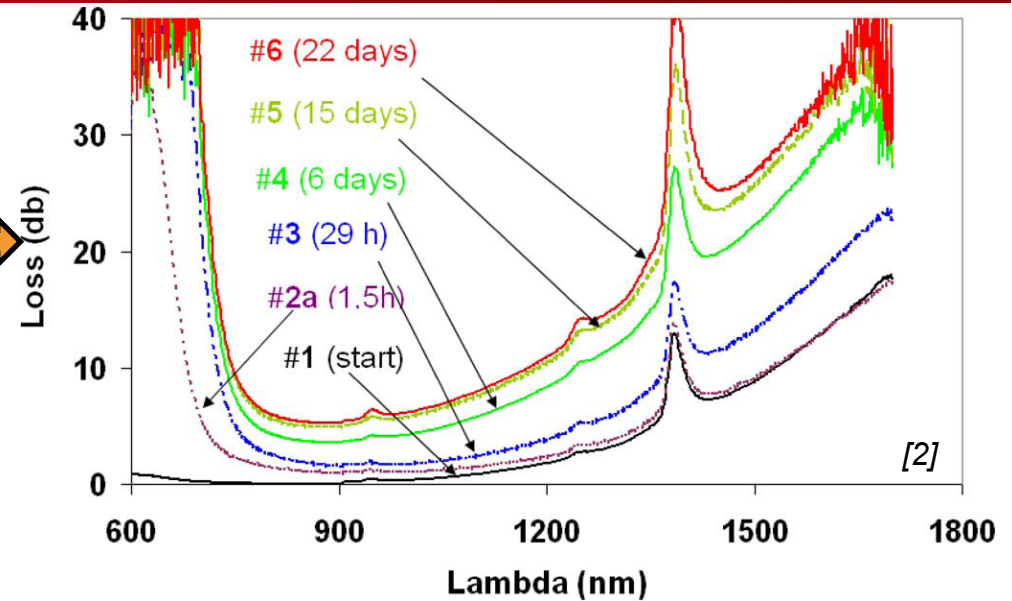
→ Multiplication capteurs?

COMPORTEMENT DES FIBRES (DÉFI 2/3)

Comportement des fibres optiques en environnement sévère (irradiation et température)

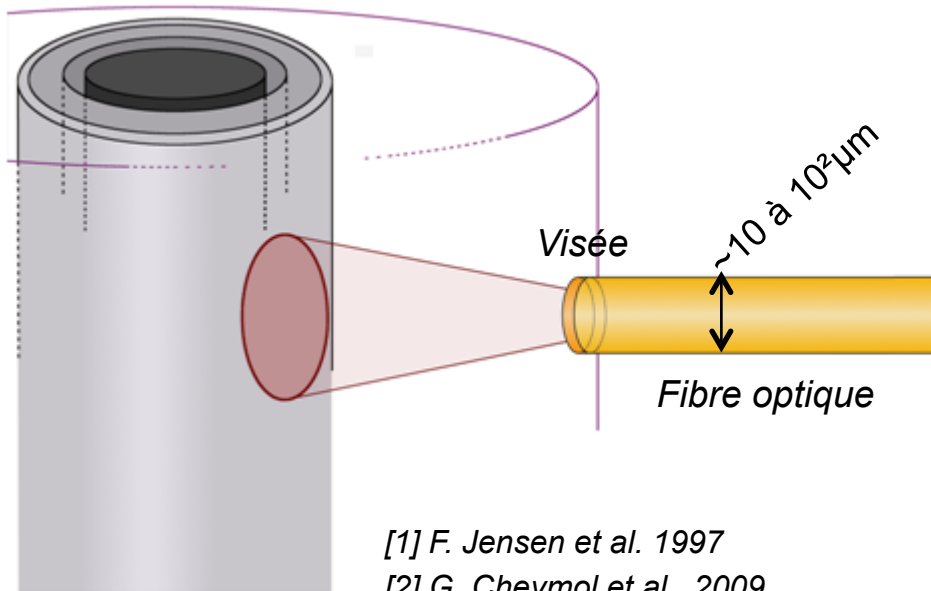
- Radiation Induced Attenuation (RIA)
- Luminescence
- Pics scintillation & absorption

↳ *Domaine limité 800-1700 nm [1]*



Ci-dessus: évolution des pertes en transmission de la fibre STU2 (50cm) durant le cycle 1. Ci-dessous: description des conditions expérimentales

Meas.	Date	Elapsed exposure time	Thermal fluence (n _{th} /cm ²)	Neutral fluence (n _{fast} /cm ²)	Ionizing dose (GGy)
1	Jan 19 th -13 h	0	0	0	0
2a	Jan 19 th -14 h30	1.5 h	8.2 10 ¹⁷	9.2 10 ¹⁶	0.011
2b	Jan 19 th -15 h	2 h	1.1 10 ¹⁸	1.2 10 ¹⁷	0.014
3	Jan 20 th -18 h	29 h	1.6 10 ¹⁹	1.8 10 ¹⁸	0.21
4	Jan 25 th	6 days	7.9 10 ¹⁹	8.8 10 ¹⁸	1
5	Feb 3 rd	15days	2 10 ²⁰	2.2 10 ¹⁹	2.6
6	Feb 10 th	22days	2.9 10 ²⁰	3.2 10 ¹⁹	3.8



[1] F. Jensen et al. 1997

[2] G. Cheymol et al., 2009

Méthodes pyrométriques (CDC $\pm 10^\circ\text{C}$)

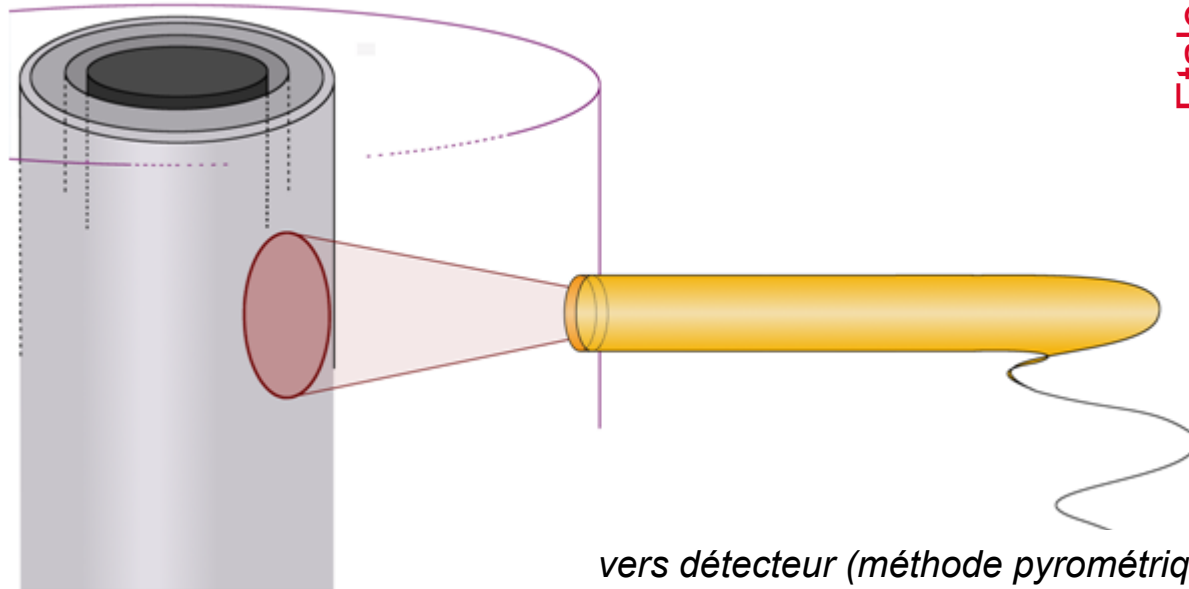
- Comparaison méthodes
- Propagation des incertitudes
- Etalonnage

Méthodes

- Monochromatique
- Bichromatique
- Polychromatique (méthode inverse)

Incertitudes

- GUM
- Bayes



Etalonnage

- Corps noir in situ ?
- Températures « ambiantes »
 - ↓
 - Capteur température
- Transmission fibre
 - ↓
 - Fibre dédiée

Simulation

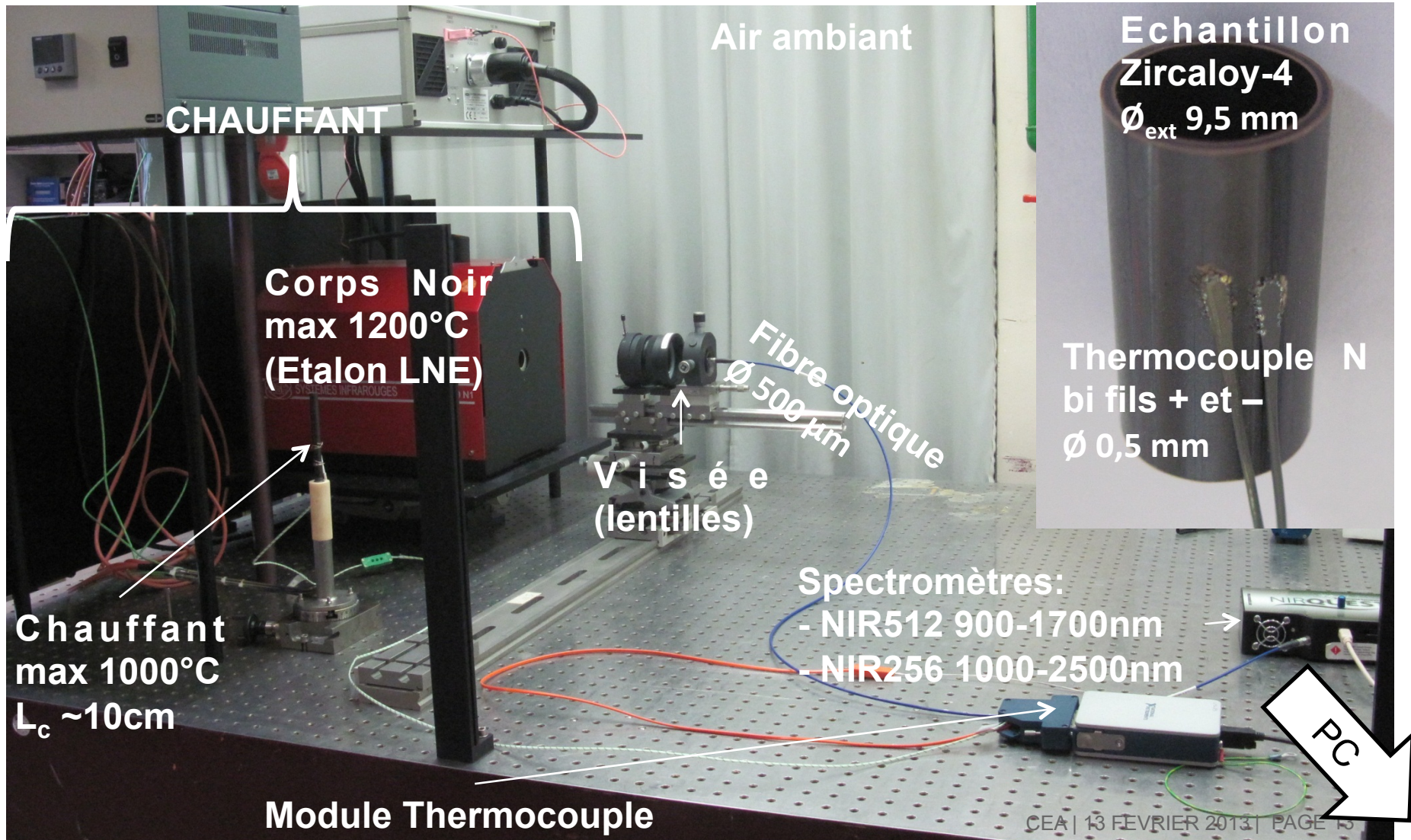
Objectif

Défis Techniques

Pyrométrie (expérimental)

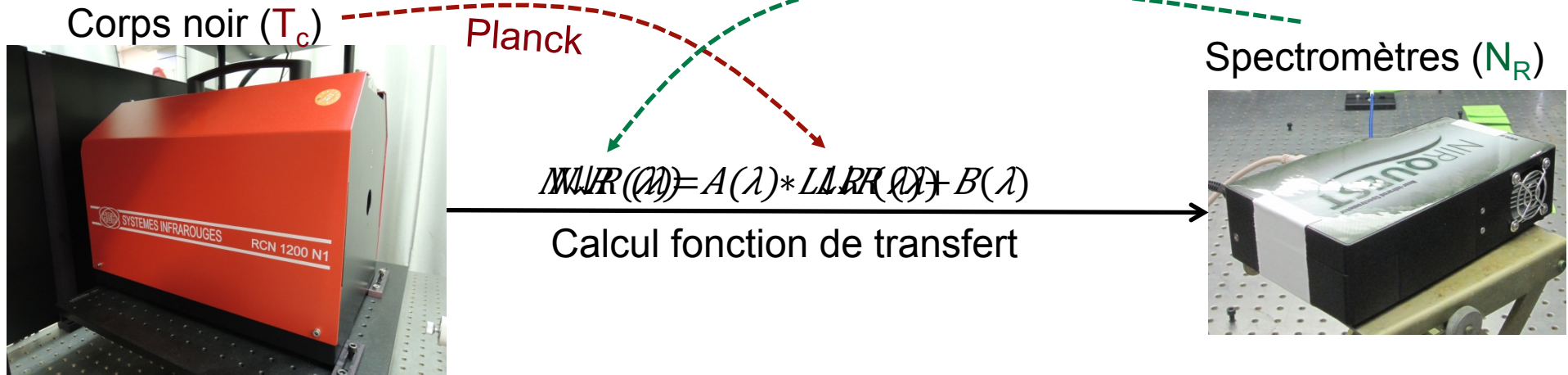
ÉLABORATION D'UN BANC DE MESURE

Banc de mesure T & $\epsilon(\lambda)$ d'échantillons de gaine Zircaloy-4



PRINCIPE DE MESURE DU BANC

Temps intégration fixé



Température échantillon?



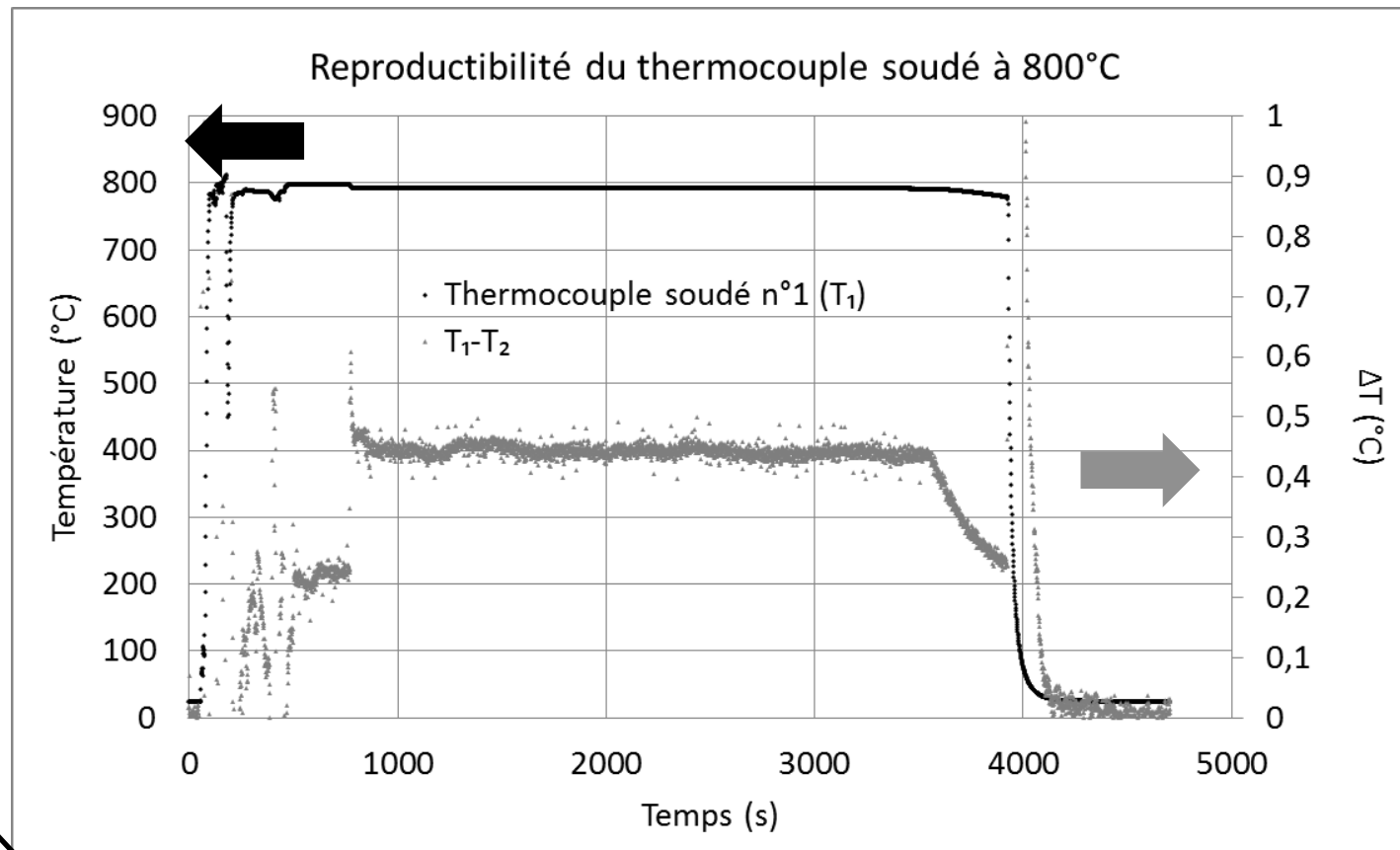
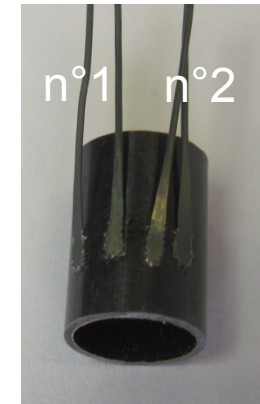
$$L\downarrow ech(\lambda) = N\downarrow ech(\lambda) - B(\lambda) / A(\lambda)$$

$$dL\downarrow ech / CN(\lambda) = \sqrt{(L\downarrow ech(\lambda) / A(\lambda))^2 dA^2 + (1/A(\lambda))^2 dB^2 + 2L\downarrow ech(\lambda) / A(\lambda)}$$

$$\underbrace{\hspace{10em}}_{\sigma_{Lcn}^2}$$

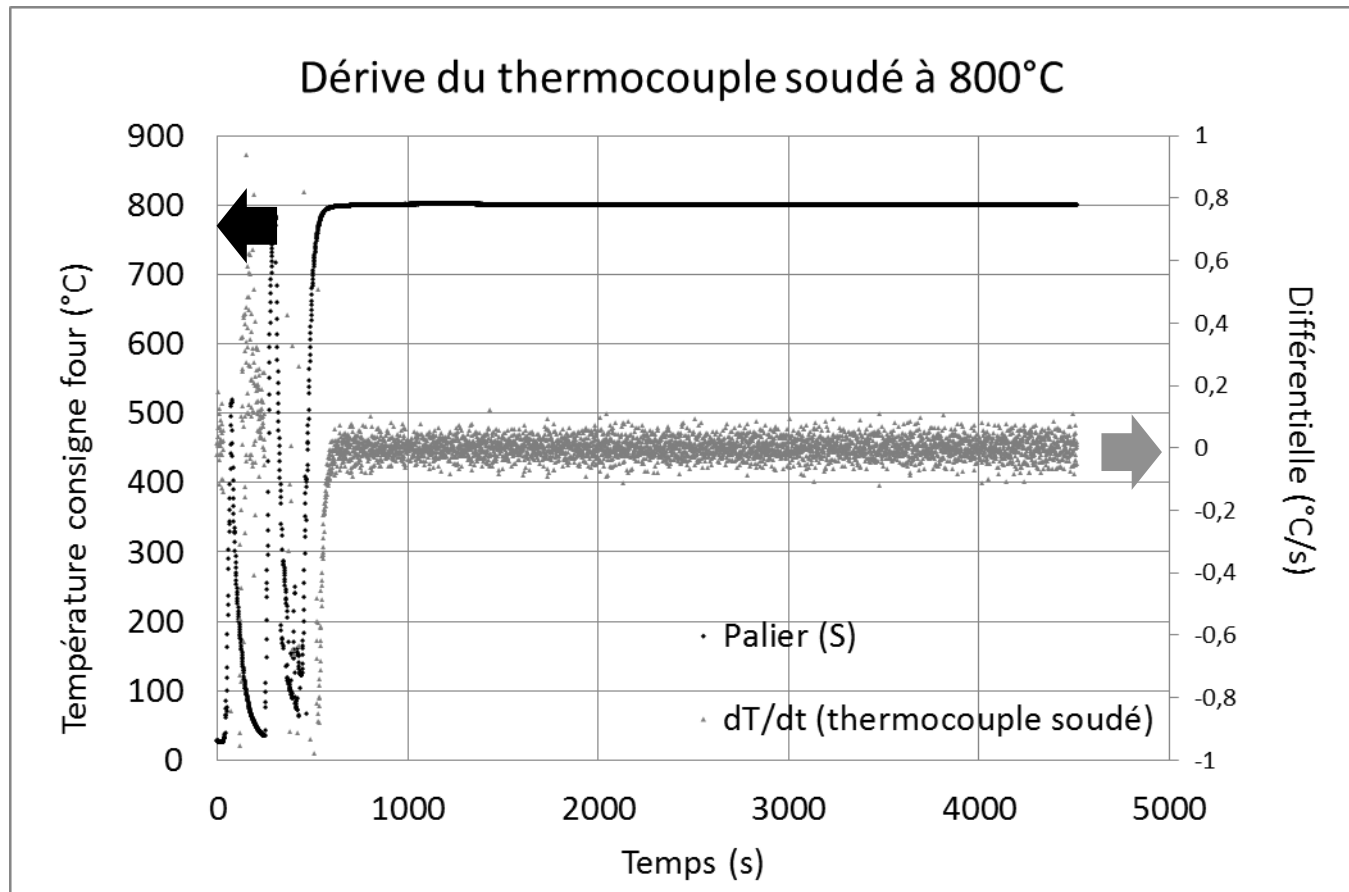
Reproductibilité du thermocouple soudé

Thermocouples n°1 (T_1) et n°2 (T_2) soudés sur le même échantillon puis introduits dans un four à 800°C.



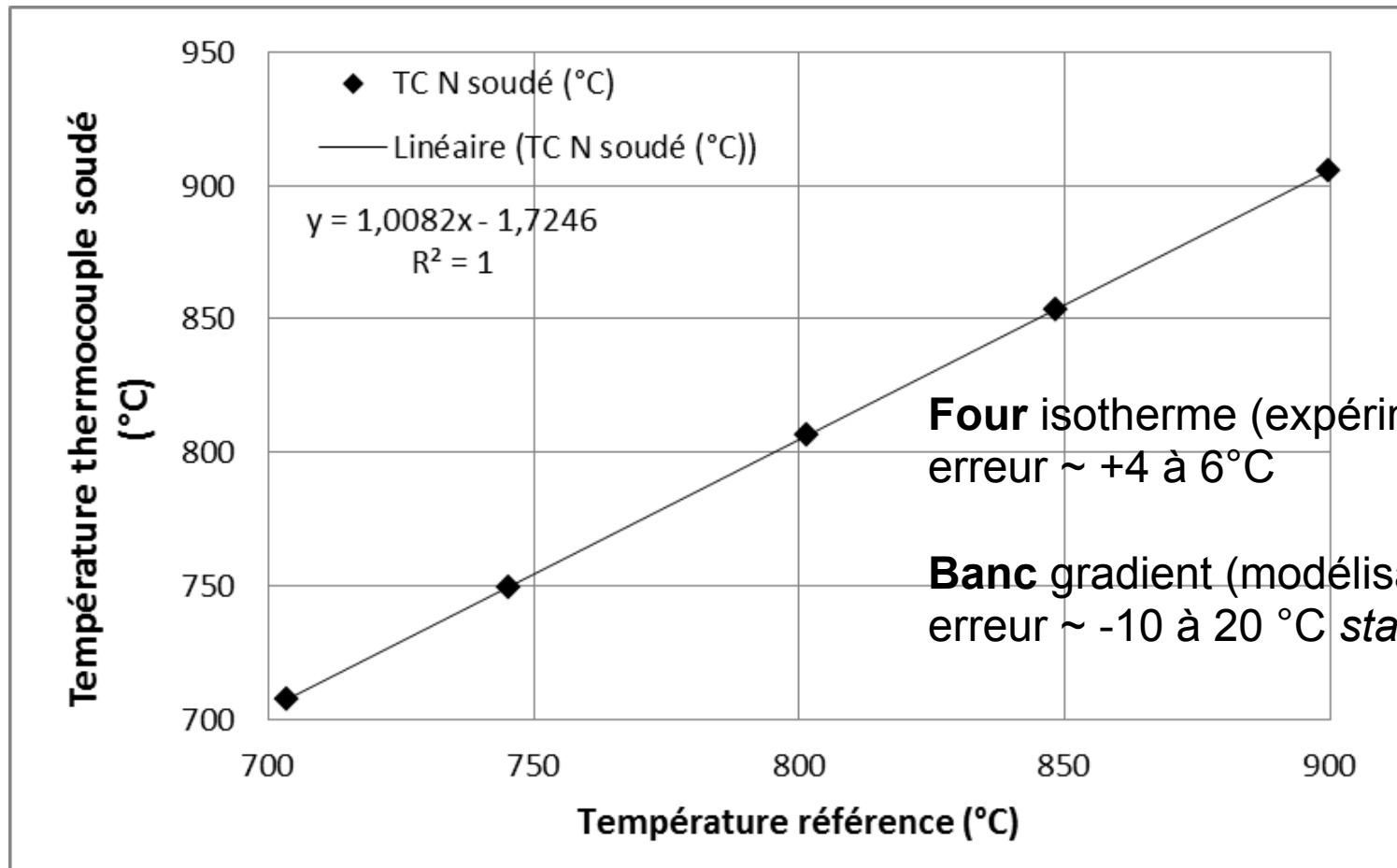
Reproductibilité à 0,45°C

Dérive du thermocouple soudé



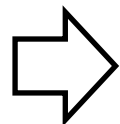
➔ Dérive nulle sur ~1h

Etalonnage du thermocouple soudé / thermocouple certifié de type N



Four isotherme (expérimental)
 erreur ~ +4 à 6°C

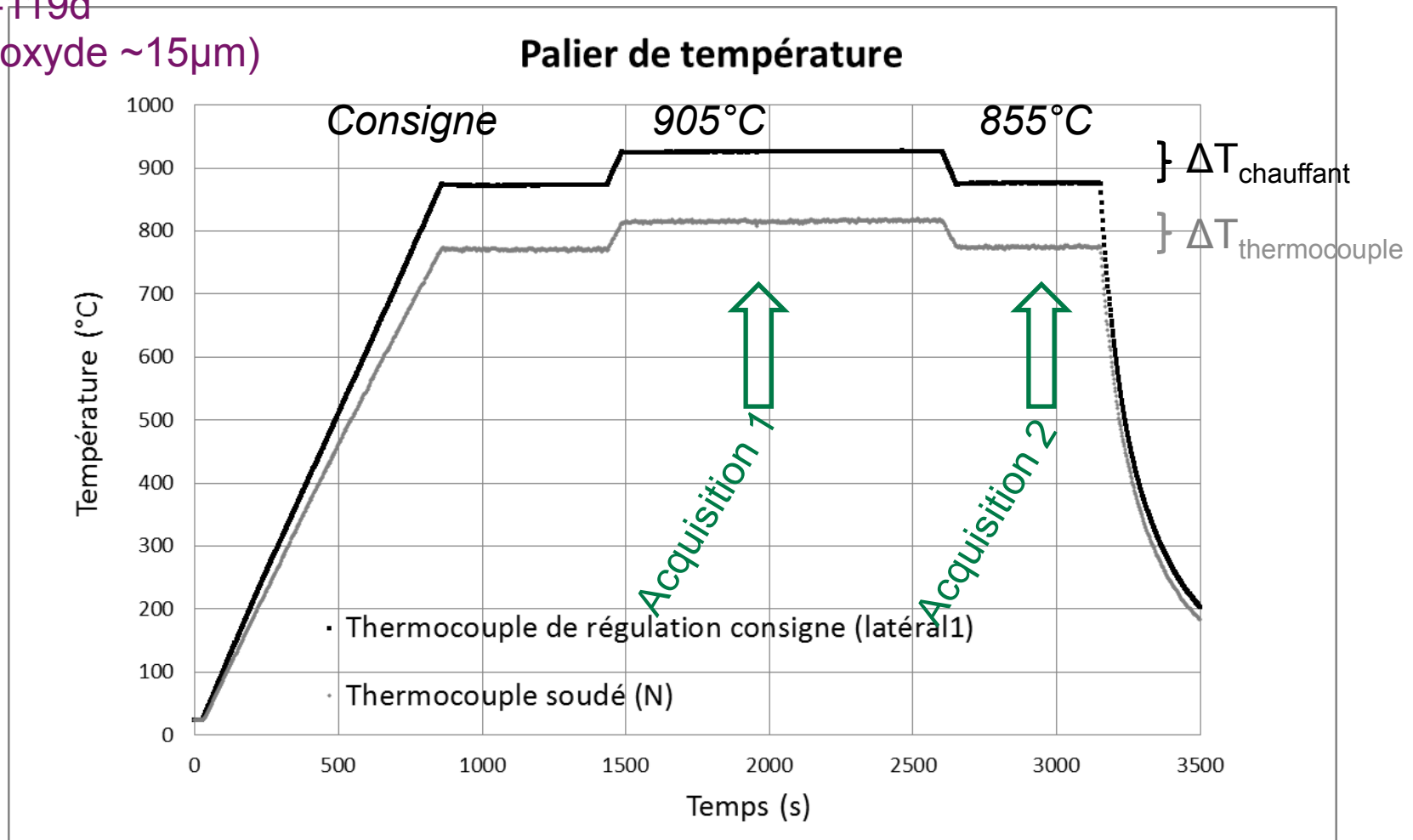
Banc gradient (modélisation Comsol)
 erreur ~ -10 à 20 °C *stage T. Fritel*



Gradient : thermocouple soudé plutôt fidèle mais pas représentatif de la zone optiquement visée (~10°C)

Palier de consigne (température interne de l'élément chauffant)

G74-119d
(pré-oxyde $\sim 15\mu\text{m}$)

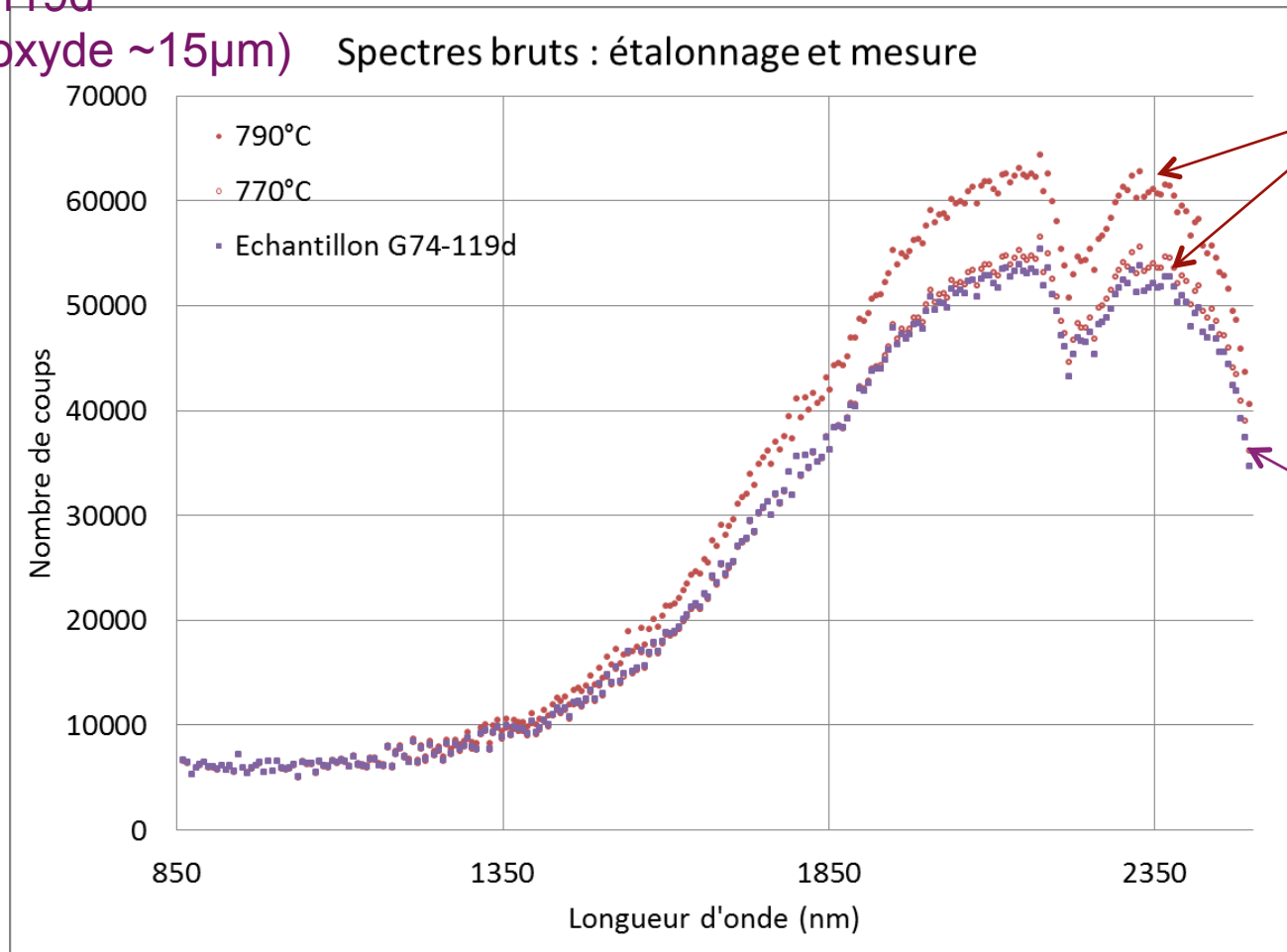


Spectromètre NIRquest256 (temps intégration 17ms) *Acquisition 1*

G74-119d

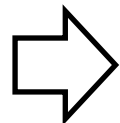
(pré-oxyde $\sim 15\mu\text{m}$)

Spectres bruts : étalonnage et mesure



Corps Noir
(consigne)

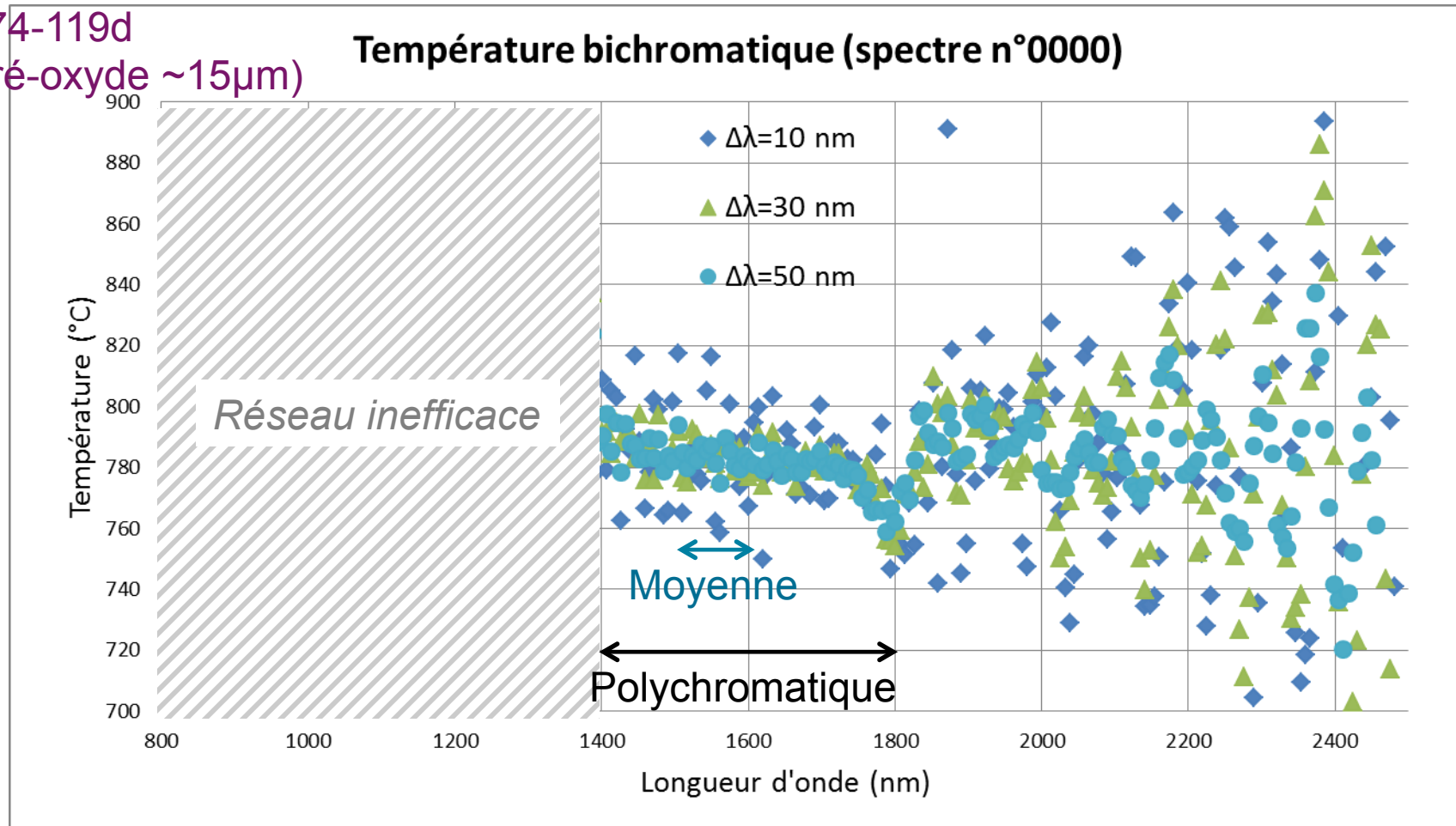
Echantillon
à 855°C en
consigne



Hypothèse ϵ constante > calcul bichromatique ($\lambda, \lambda + \Delta\lambda$)

Spectromètre NIRquest256 (temps intégration 17ms) *Acquisition 1*

G74-119d
(pré-oxyde ~15µm)



Rappel
Bichromatique
(Wien)

$$\frac{1}{T} = \frac{\lambda'}{c_2} \ln \left(\frac{L_{CN}^1 \varepsilon_2 \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^5}{L_{CN}^2 \varepsilon_1} \right) [K^{-1}]$$

avec $\lambda' = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_1 - \lambda_2)$ et ici $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$

Spectromètre NIRquest256 (temps intégration 17ms) *Acquisition 1*

G74-119d

(pré-oxyde $\sim 15\mu\text{m}$)

Méthode de mesure	Acquisition 1	Acquisition 2	ΔT (°C)
Élément chauffant (central)	925	875	-50
Thermocouple soudé*	815	774	-41
Bichromatique* ($\lambda=1,5-1,6\mu\text{m}/ 50 \text{ nm}$)	821	783	-38
Polychromatique* (1,4-1,8 nm)	822 ($\epsilon \approx 0,872$)	784 ($\epsilon \approx 0,877$)	-38 ($\Delta\epsilon = 0,005$)

* Moyenne temporelle

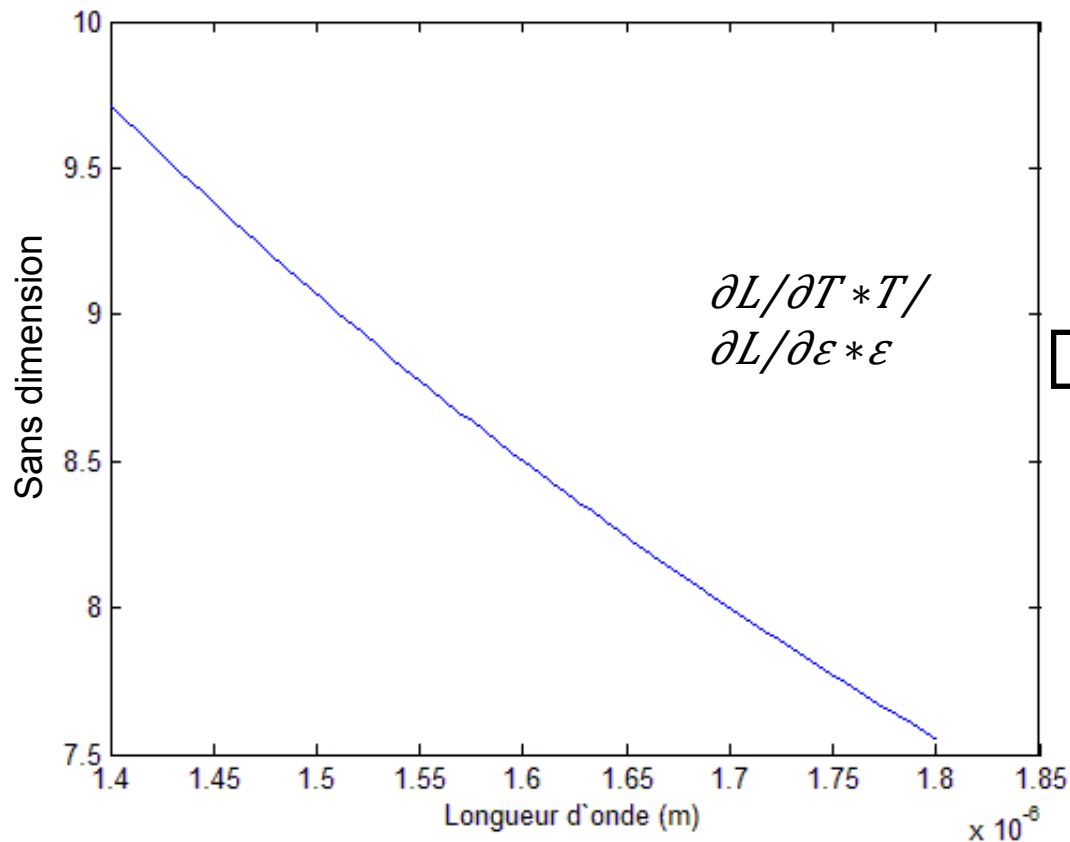
Concordance des ΔT

Spectromètre NIRquest256 (temps intégration 17ms) *Acquisition 1*

G74-119d

(pré-oxyde ~15 μ m)

Sensibilité du polychromatique (spectre n°0000)



- Paramètres suffisamment non corrélés

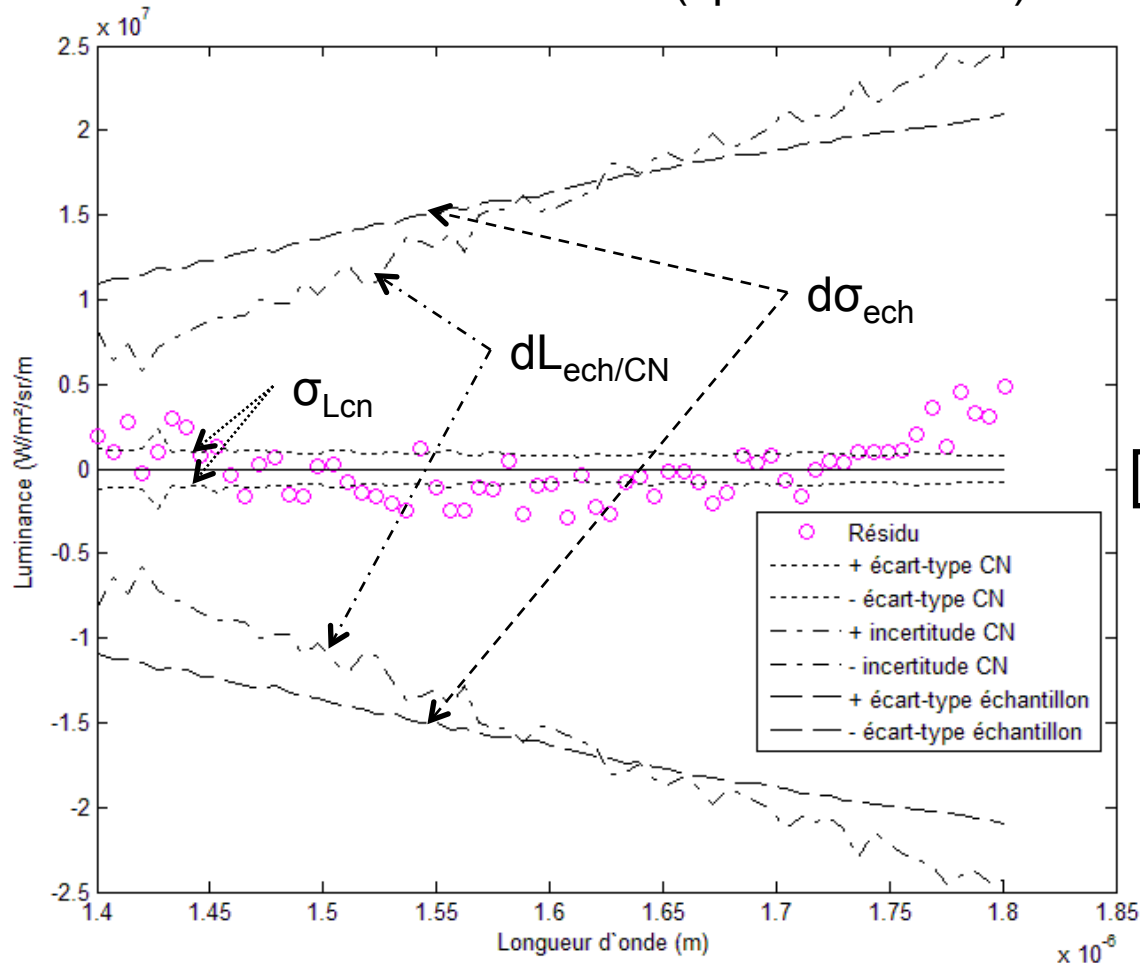
-Prédominance du paramètre température (x10) mais émissivité non négligeable

Spectromètre NIRquest256 (temps intégration 17ms) *Acquisition 1*

G74-119d

(pré-oxyde $\sim 15\mu\text{m}$)

Résidus du modèle constant (spectre n°0000)



Indication
Planck à $780^\circ\text{C} \sim 10^9 \text{ W/m}^2/\text{sr/m}$

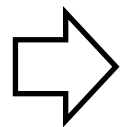
➔ Difficulté de valider les résidus car « bruit » échantillon surestimé

Spectromètre NIRquest256 (temps intégration 17ms) *Acquisition 1*

G74-119d

(pré-oxyde $\sim 15\mu\text{m}$)

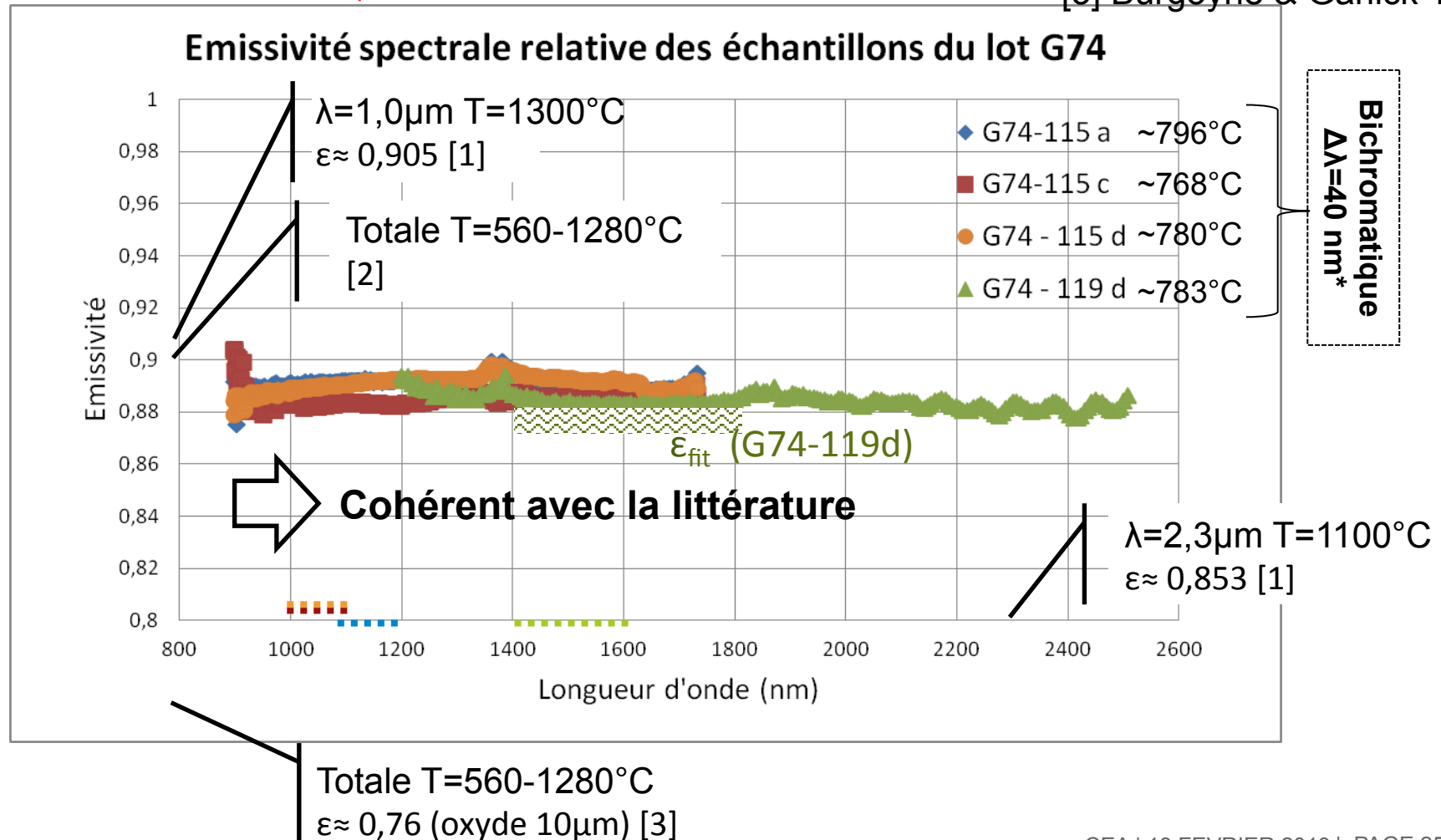
- Thermocouple valide en relatif (ΔT) plus qu'en absolu
- Polychromatique plausible sur la zone « stable » en bichromatique (sensibilité)
- Bi- et polychromatique
 - ΔT cohérent avec thermocouple
 - Températures semblables $< 1^\circ\text{C}$
 - Températures cohérentes avec le gradient Comsol



ϵ constante sur plage 1.4-1.8 μm = hypothèse réaliste

Résultats expérimentaux – mesure d'émissivité relative (Hypothèse $T_{\text{bichromatique}}$)

- [1] Mathew 1989
- [2] Kovalev & Melnikov 1979
- [3] Burgoyne & Garlick 1976



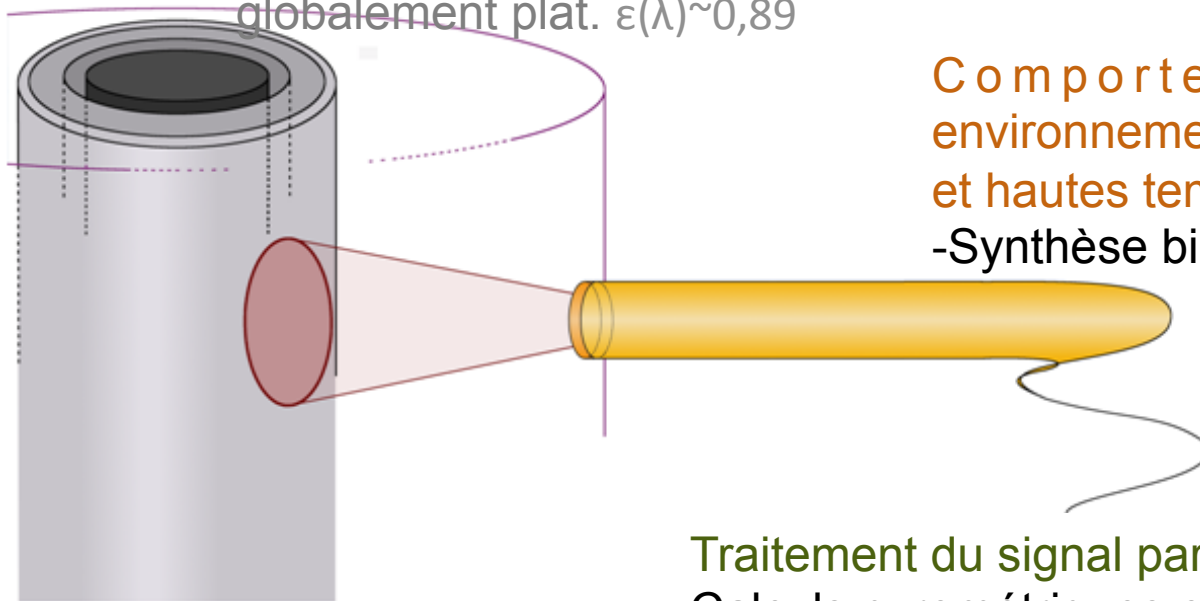
* Moyenne temporelle

Points en cours

Compréhension du signal émis par la gaine **1/3**

Mesure émissivité spectrale en air du Zircaloy-4

Pré-oxyde à $15\mu\text{m}$ stable en émissivité de 780 à 820°C avec un profil globalement plat. $\epsilon(\lambda) \sim 0,89$



Comportement des fibres en environnement sévère (fortes irradiations et hautes températures) **2/3**

-Synthèse bibliographique

Traitement du signal par pyrométrie **3/3**

Calculs pyrométriques et incertitudes

Bichromatique valide sur bandes étroites

(Polychromatique valide sur bandes plus larges)

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

COMMUNICATION

ANIMMA 2013

Pyrometry Techniques for Temperature Monitoring in simulated LOCA (JHR)

RRFM IGORR 2012

*In-core Optical Thermometry for the future LORELEI
LOCA test of the JHR (MTR)*

Journée Fibre optique sous irradiation 2011

Contraintes des fibres optiques en milieu sévère

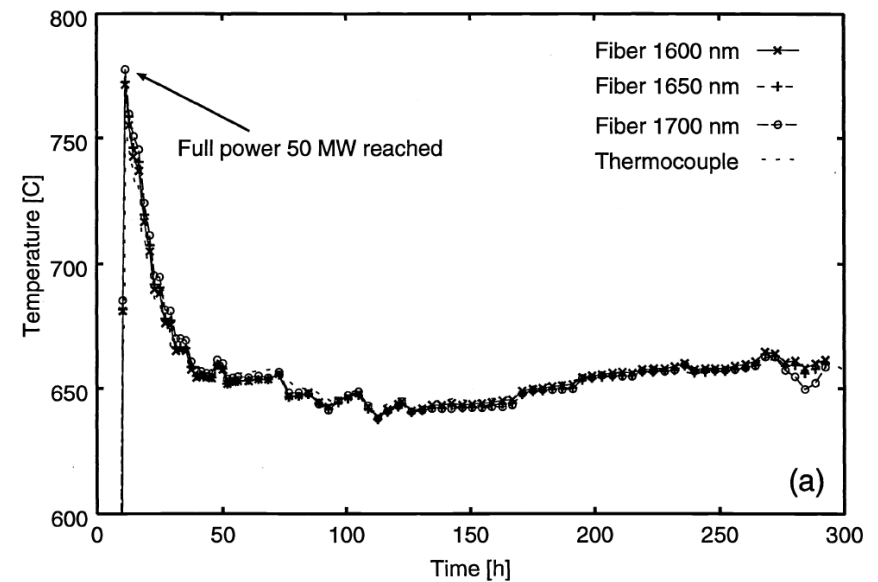
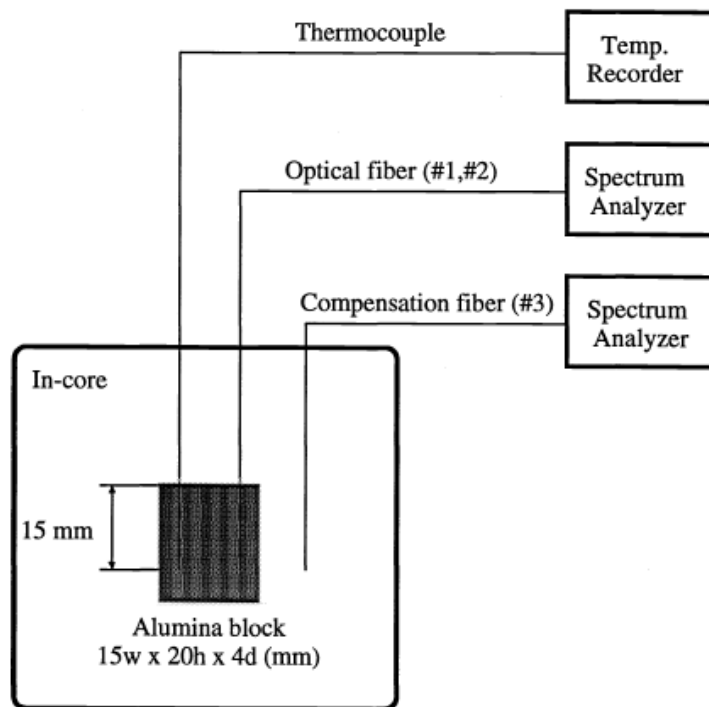
Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Centre de Saclay | 91191 Gif-sur-Yvette Cedex
T. +33 (0)1 69 08 77 72 |

DEN
DPC
SEARS

Etablissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019

Bibliographie pyrométrie optique en cœur de réacteur

- JENSEN et al. 1997 (Japon)
 - Capteur extrémité de fibre
 - Thermométrie par fibre dopée OH 900ppm
 - Tenue des fibres jusqu'à 800°C



Ci-dessus
Comparaison entre le thermocouple et la
température optiquement déterminée

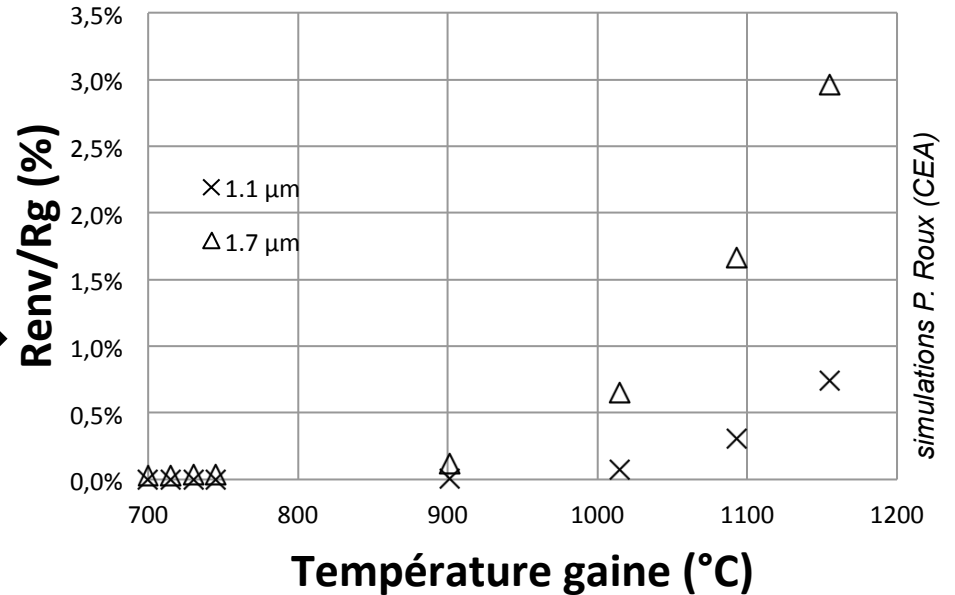
Luminance émise par gaine (loi de Planck)

$$R_{CN}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \times (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} [W / m^2 / sr / m] \quad \epsilon_{gaine} \leq 1$$

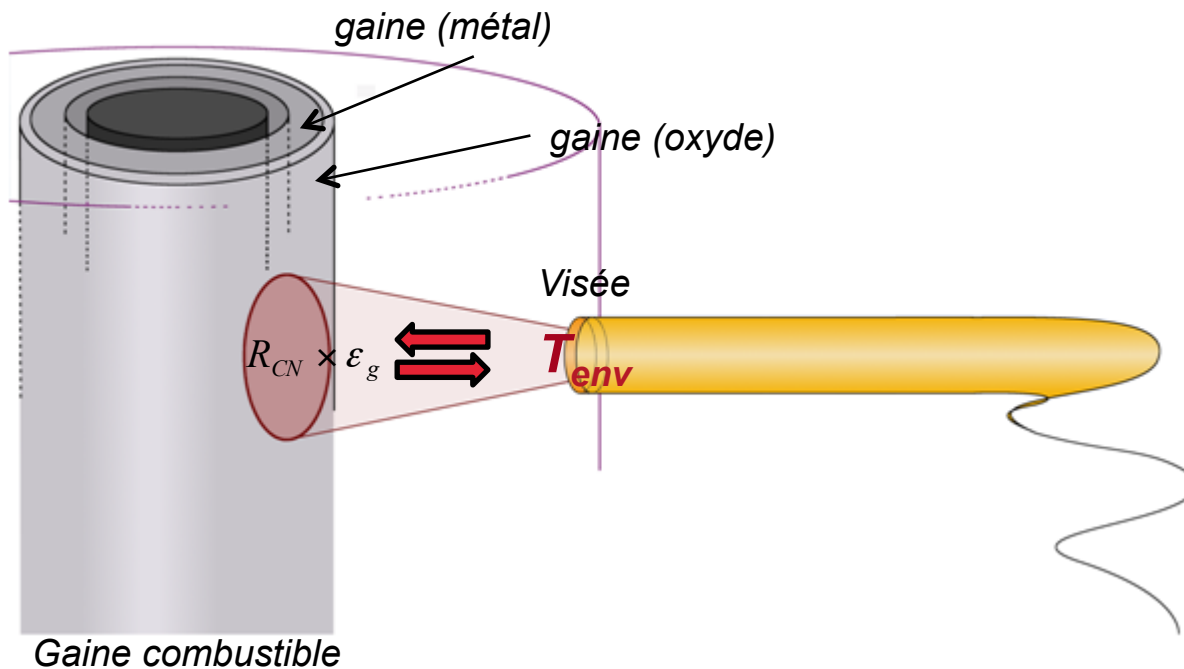
$$R_{gaine}(\lambda, T) = R_{CN}(\lambda, T) \times \epsilon_g [W / m^2 / sr / m]$$

+ Signal parasite environnement

$$R_{env}(\lambda, T) = R_{CN}(\lambda, T_{env}) \times (1 - \epsilon_g) [W / m^2 / sr / m]$$



simulations P. Roux (CEA)



Signal parasite

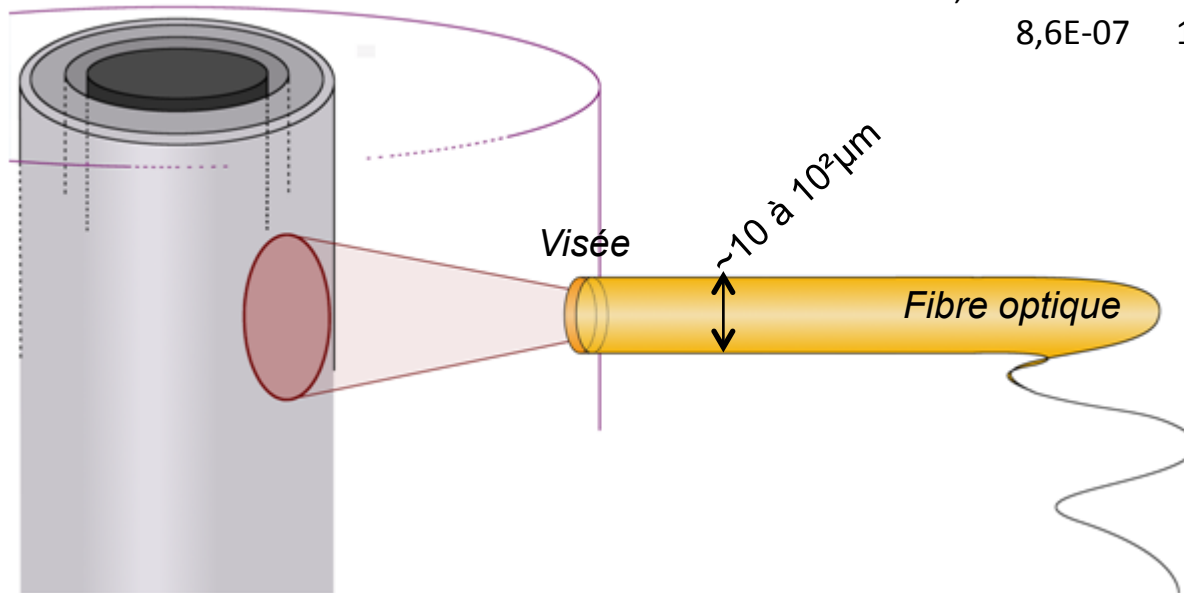
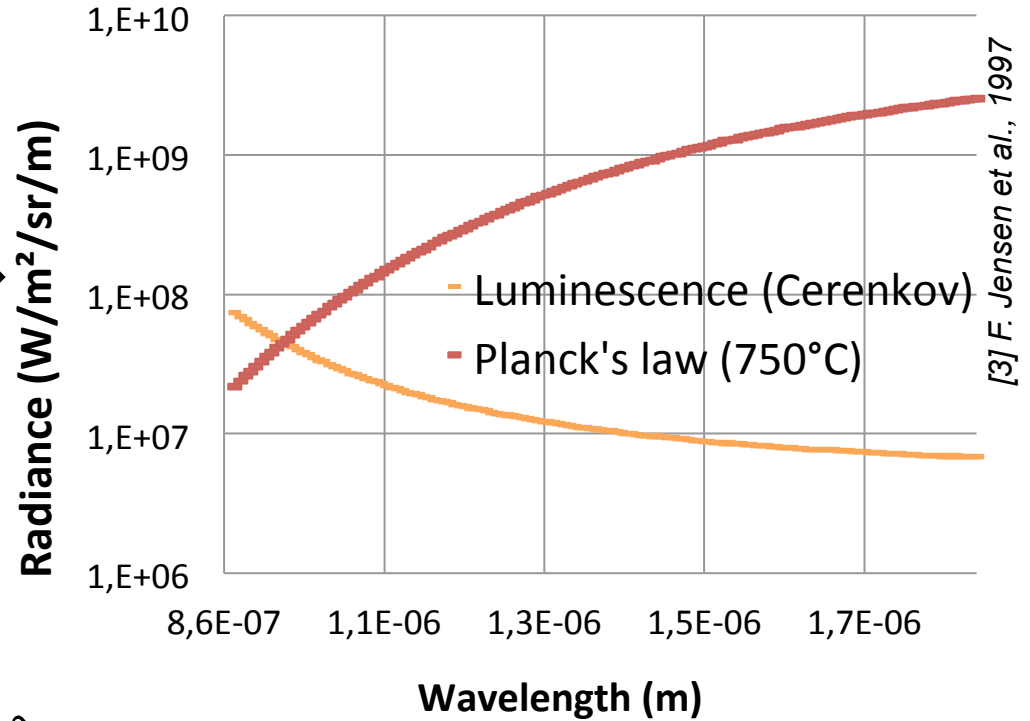
■ Température ambiante

→ Capteur température paroi

Comportement des fibres optiques en environnement sévère (irradiation et température)

- Radiation Induced Attenuation (RIA)
- **Luminescence**
- Pics scintillation & absorption

↳ Transmission possible 800-1700 nm



Lorsque T_{gain} augmente

■ T_{env} reste constant (design)

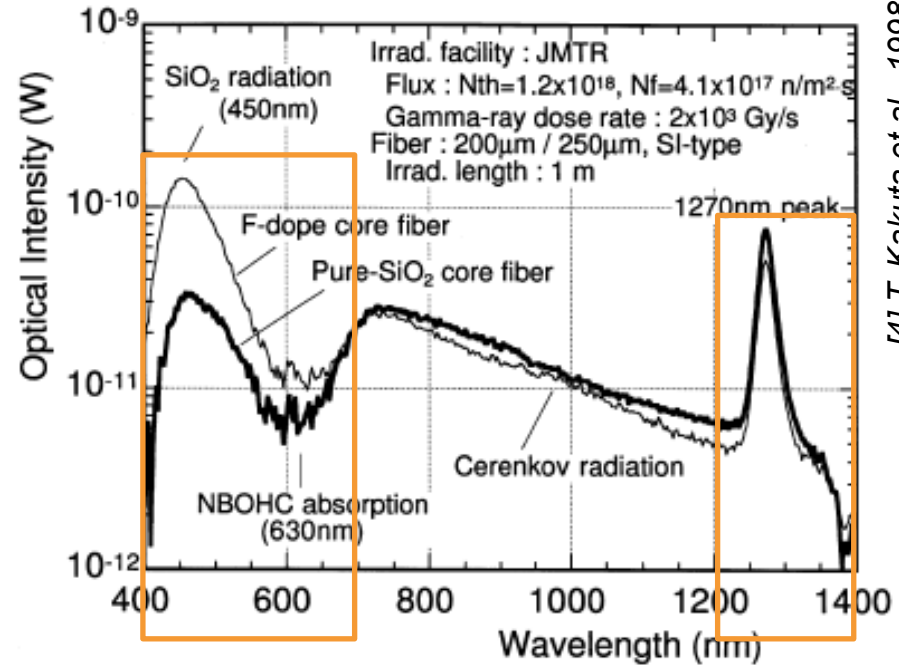


■ $\frac{R_{\text{Cerenkov}}(\lambda, T)}{R_g(\lambda, T)}$ diminue

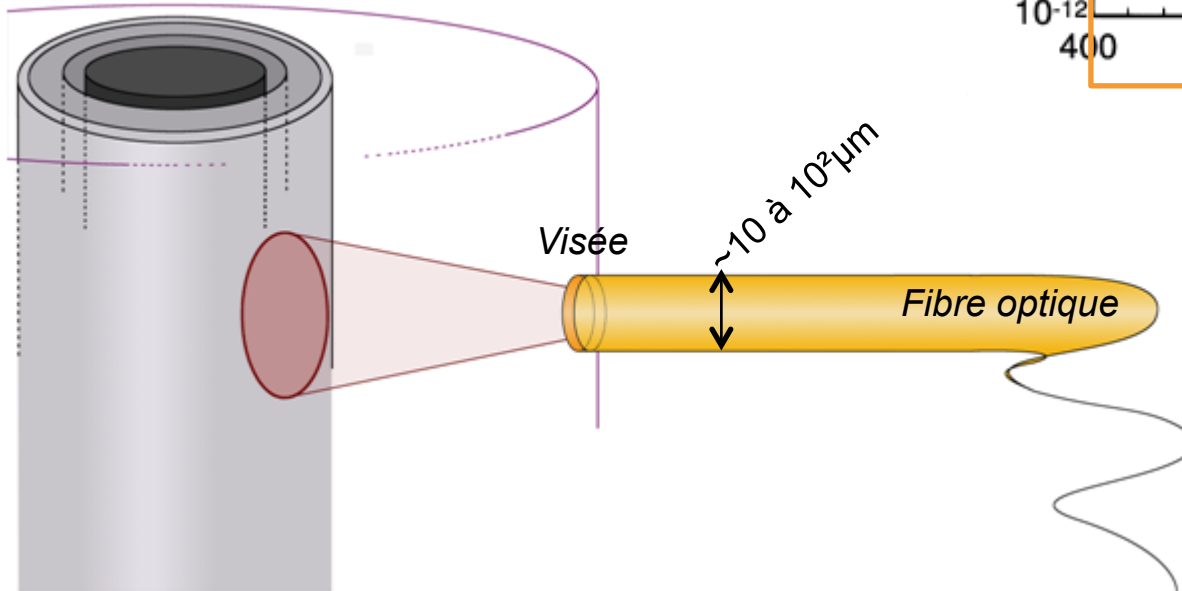
Comportement des fibres optiques en environnement sévère (irradiation et température)

- Radiation Induced Attenuation (RIA)
- Luminescence
- **Pics scintillation & absorption**

↳ Transmission possible 800-1700 nm



[4] T. Kakuta et al., 1998



Zone d'absorption/scintillation dépendant de la composition gaine

Design du capteur

**Protection
fibre: hublot**

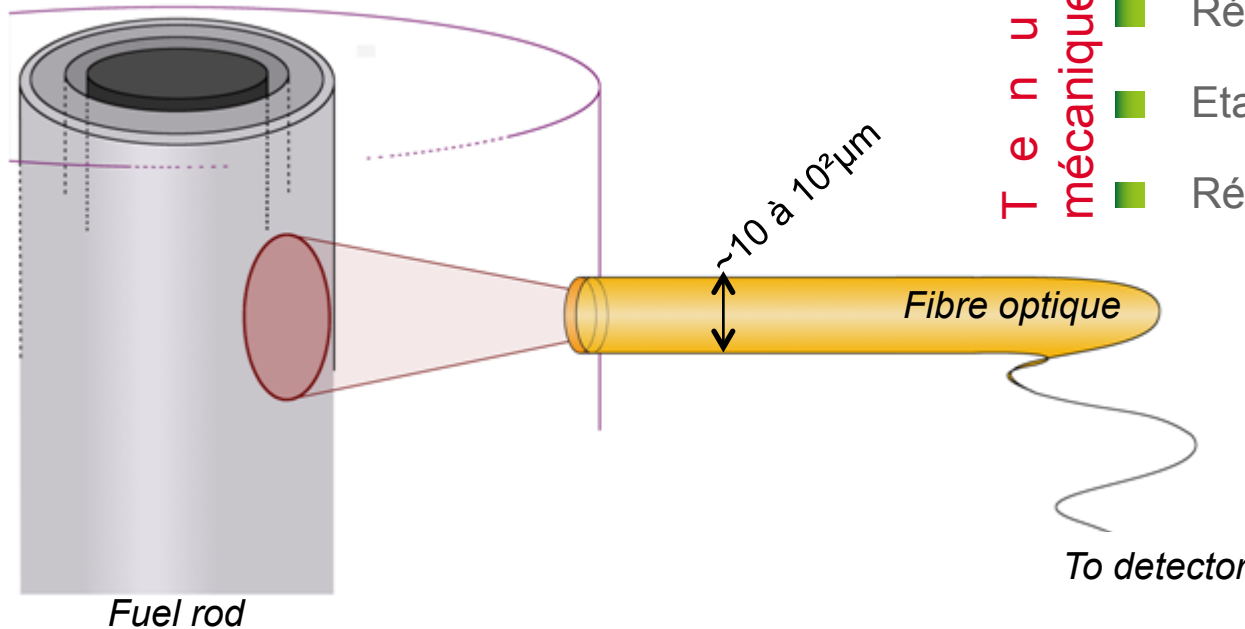
- Transparent
- Résistant température et irradiations
- Résistant milieu oxydant

Miniaturisation

- Diamètre fibre et courbure
- Design visée (miroir, lentille)
- Résistant milieu oxydant

**T e n u e
mécanique**

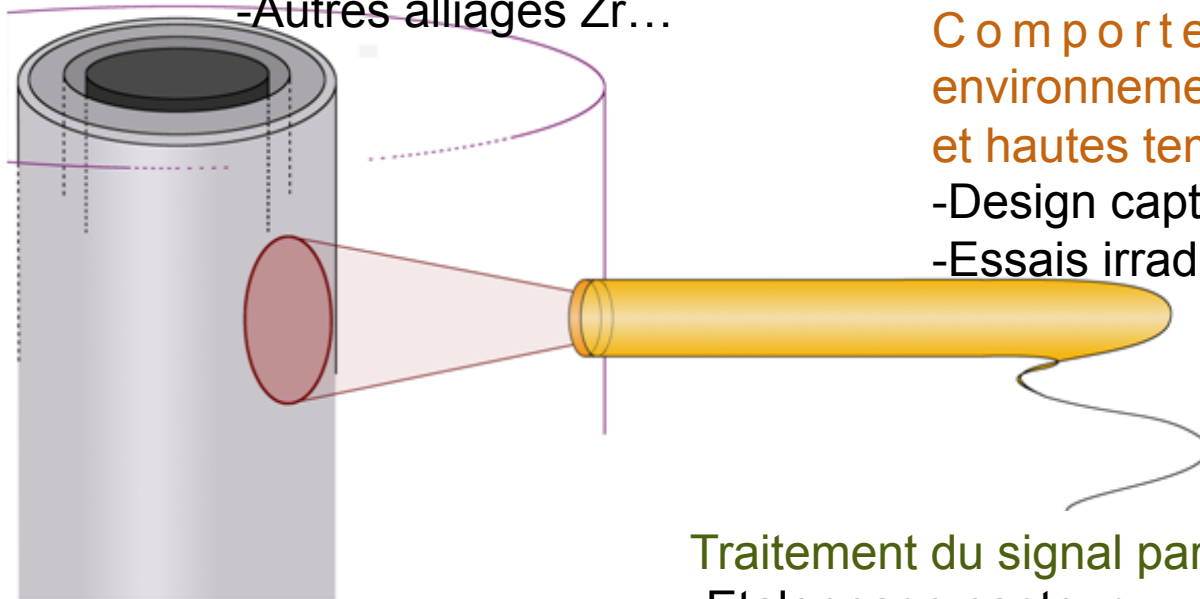
- Résistant vibrations
- Etanchéité
- Résistant température (300 – 800°C)



Points à traiter

Compréhension du signal émis par la gaine 1/3

- Extension mesure émissivité spectrale sous vapeur d'eau
- Rugosité et fissuration
- Autres alliages Zr...



Comportement des fibres en environnement sévère (fortes irradiations et hautes températures) 2/3

- Design capteur
- Essais irradiation du capteur...

Traitement du signal par pyrométrie 3/3

- Etalonnage capteur