

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



list
www.cea.fr

Investigations radiologiques de pré-démantèlement du Réacteur Nouvelle Génération (RNG)

par dosimétrie OSL/FO

S. MAGNE ¹, P.G. ALLINEI ²

***¹ CEA, LIST, Laboratoire Capteurs Architectures Electroniques,
F-91191 Gif-sur-Yvette, France***

01 69 08 90 47 sylvain.magne@cea.fr

***² CEA, DEN-DTN-STMA, Laboratoire Mesures Nucléaires,
F-13108 St Paul-lez-Durance, France***

04 42 25 29 83 pierre-guy.allinei@cea.fr



5^{ème} FORUM EUROPÉEN DE RADIOPROTECTIQUE
5-7 octobre 2016
Palais des Congrès de La Grande Motte - France

Organisé par l'Association pour les Techniques et les Sciences de Radioprotection, avec le soutien de



PVSI
PÔLE DE VALORISATION
DES SITES INDUSTRIELS



CEA



LANGUEDOC-ROUSSILLON
LA RÉGION MIDI-PYRÉNÉES

atsr-ri.com

OSL/FO : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Matériaux OSL

Unité de mesure multivoies OSL/FO « MAESTRO »

Sondes OSL/FO

PERFORMANCES OSL/FO

OSL/FO POUR L'ASSAINISSEMENT / DEMANTELEMENT (A&D)

ANALYSE DE PRE-DEMANTELEMENT DU RNG

Réacteur Nouvelle Génération (RNG)

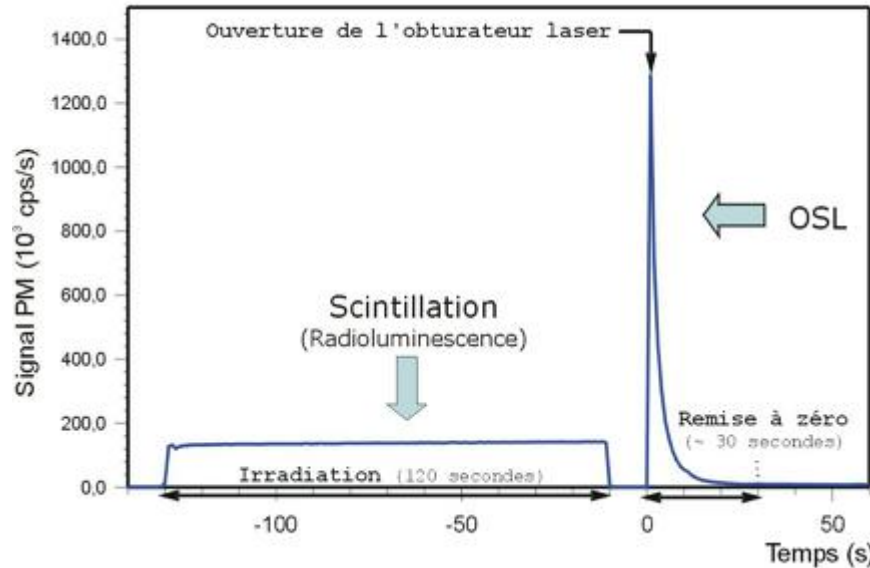
Analyse du problème

Mesures en intérieur cuve

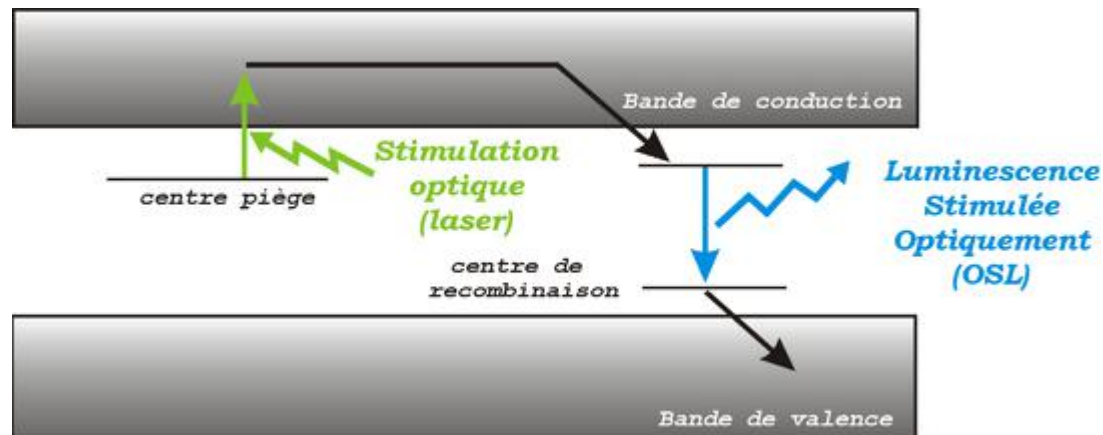
CONCLUSIONS / RETOURS D'EXPERIENCES RNG

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT OSL (1/4)

Interrogation & RAZ par stimulation optique (laser)



Cristal TLD500
 DdD $\sim 0,5$ Gy/min
 Dose ~ 1 Gy
 Puissance laser ~ 30 mW
 RAZ (99,9 %) : 30 s



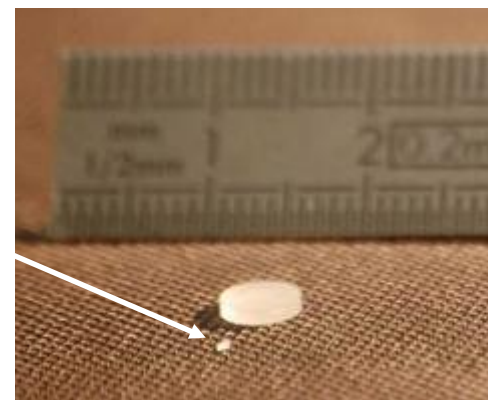
Matériaux OSL

- Détection infrarouge (sulfures alcalino-terreux dopés terres-rares : e.g. BaS ou MgS: Ce,Sm),
- Dosimétrie (e.g. $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$),
- Imagerie X (BaFBr: Eu, KBr: In, etc)
- Autres (mémoires optiques, etc).



*N.B. : Procédés de fabrication
dans le domaine public ...
(brevets des années 1940 à 1980)*

Cristaux submillimétriques
 Al_2O_3
($0.3 \times 0.3 \times 1 \text{ mm}^3$)



PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT OSL (3/4)

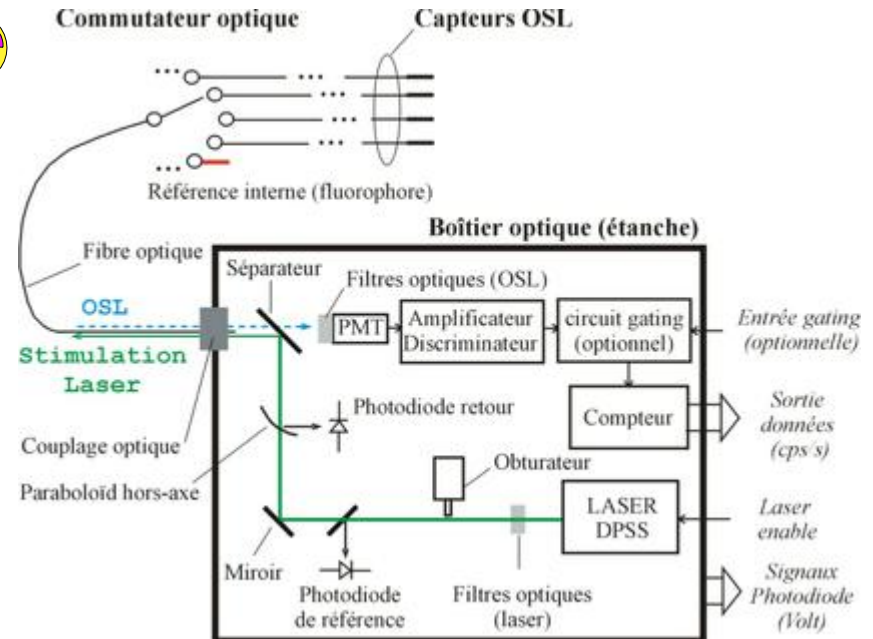
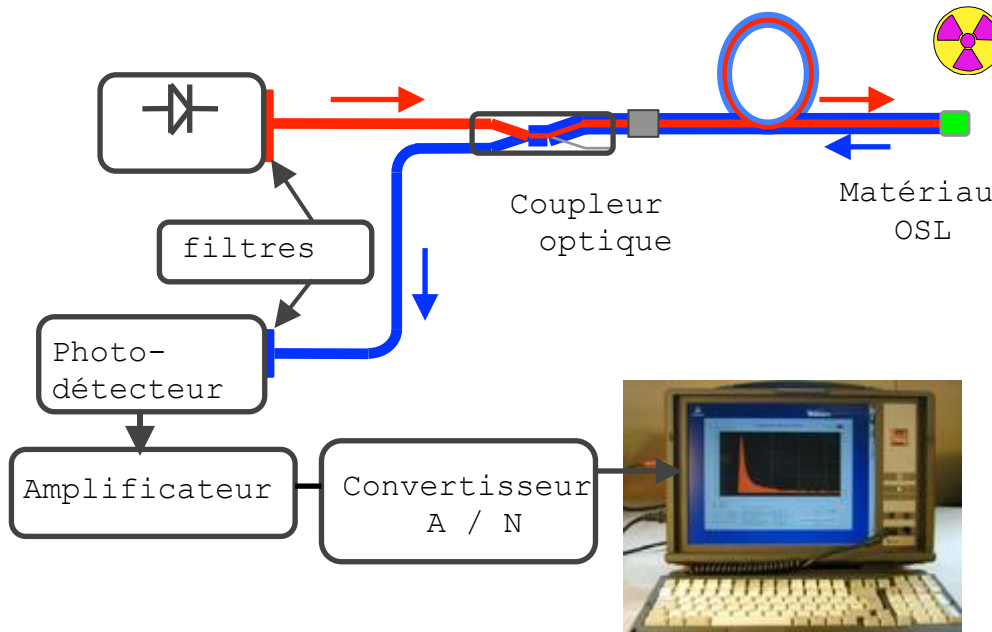
Unités OSL/FO



OSL 1 monovoie 1998

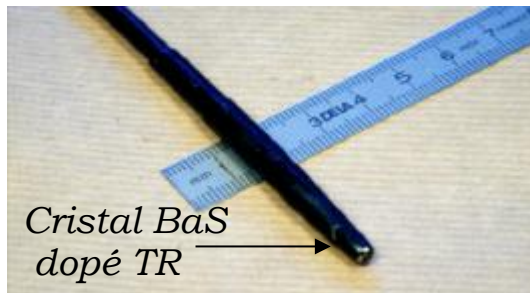


OSL 2 multivoies 2005



PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT OSL (4/4)

Sondes OSL/FO



S. Magne, P. Ferdinand,
*Fiber Optic remote gamma
dosimeters based on OSL:*
State-of-the-art at CEA,
IRPA 11, Madrid, 23-28 May 2004



Assainissement/Démantèlement (APM, 40 m)

Dosimétrie d'environnement (20 m)



E. Spasic et al., *Intracavitary IVD based on
multichannel fiber-coupled RL and OSL of Al₂O₃:C,*
ANIMMA 2011, Ghent



Radiothérapie (IGR, CLB, 8 m)



G. Ranchoux, S. Magne, J.P. Bouvet, P. Ferdinand,
Fibre Remote Optoelectronic gamma dosimetry based on OSL of $Al_2O_3:C$,
Radiat. Prot. Dosim., 100 (1-4), 2002, pp. 255- 260

S. Magne et al., *Multichannel dosimeter and $Al_2O_3:C$
OSL fibre sensors for use in radiation therapy –
Evaluation with electron beams,*
Radiat. Prot. Dosim., 131 (1), 2008, pp. 93-99

S. Magne et al., *Multichannel dosimeter and $Al_2O_3:C$
OSL Fiber Sensors for use in Radiation Therapy –
Evaluation with photon beams,*
IEEE Trans. Nucl. Sci., 58 (2), 2011, pp. 386-394

S. Magne et al., *Dosimétrie in vivo par OSL, en ligne par fibre optique,
pour l'assurance-qualité des traitements par radiothérapie externe :
le projet ANR-TECSAN CODOFER,*
IRBM 73, 2010, 82-86

OSL/FO : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Matériaux OSL

Unité de mesure multivoies OSL/FO « MAESTRO »

Sondes OSL/FO

PERFORMANCES OSL/FO

OSL/FO POUR L'ASSAINISSEMENT / DEMANTELEMENT (A&D)

ANALYSE DE PRE-DEMANTELEMENT DU RNG

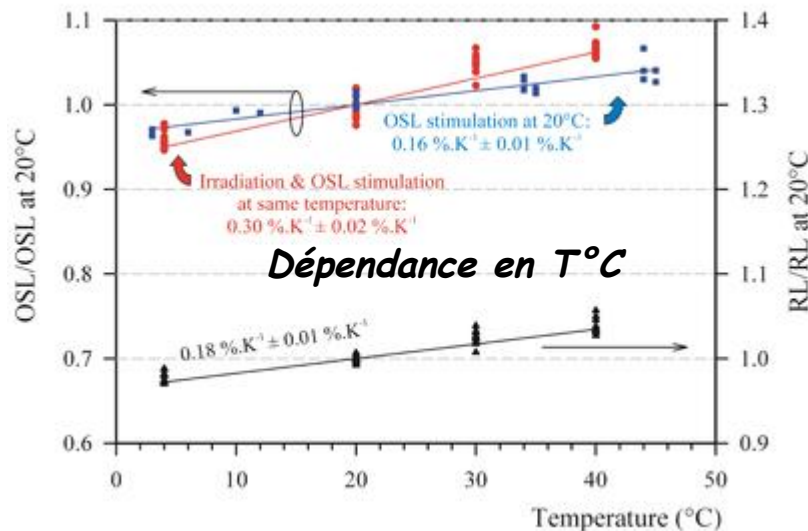
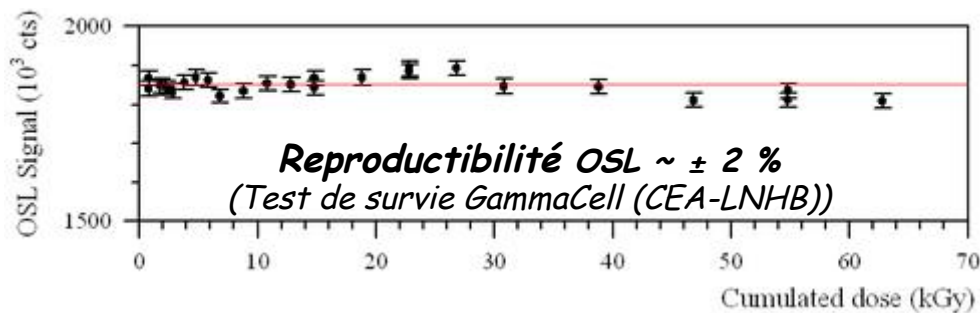
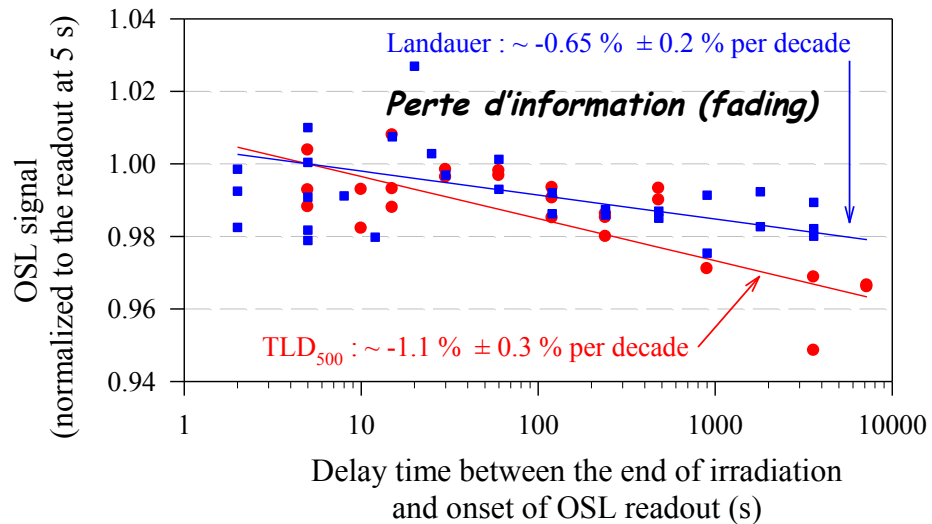
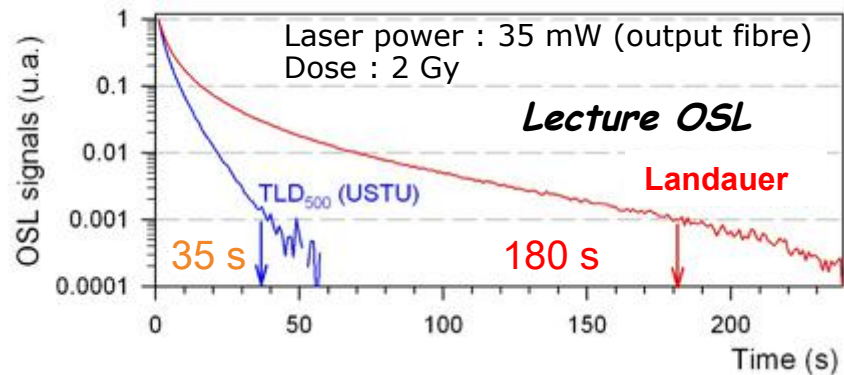
Réacteur Nouvelle Génération (RNG)

Analyse du problème

Mesures en intérieur cuve

CONCLUSIONS / RETOURS D'EXPERIENCES RNG

PERFORMANCES OSL/FO (1/3)



Performance de détection (sonde OSL/FO RP)

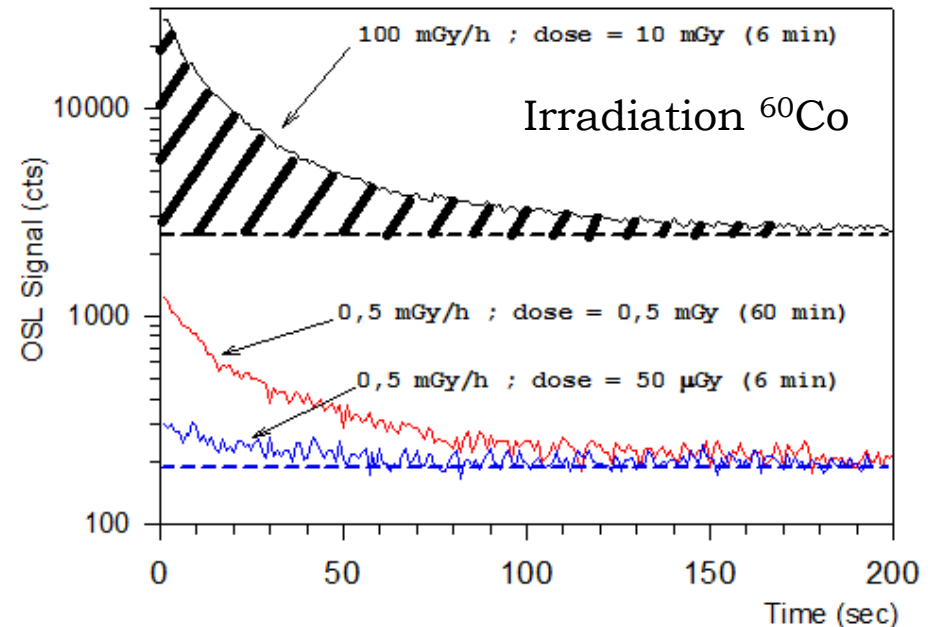
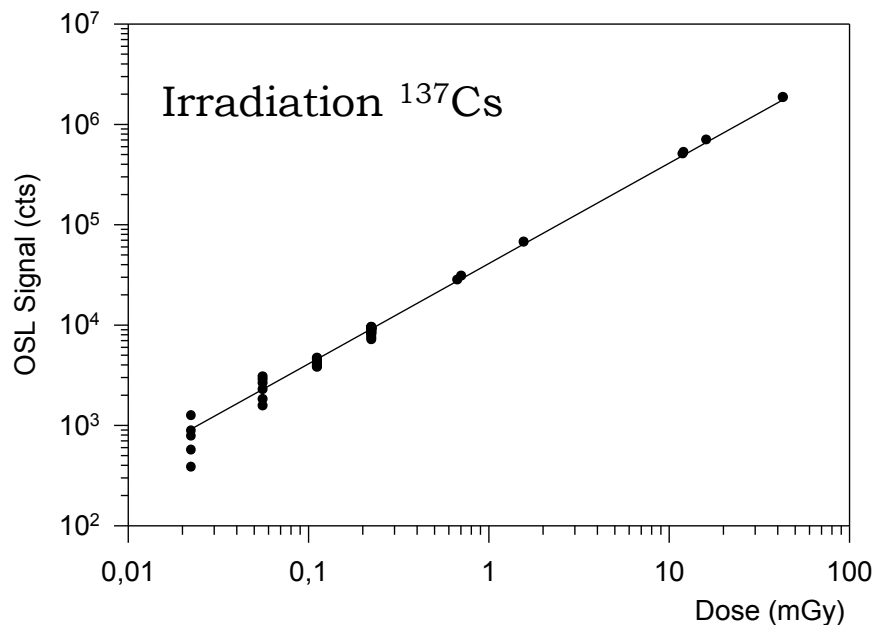
Capteur $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{C}$

- ✓ Lecteur OSL 2nde génération (monovoie),
- ✓ Fibre silice ($\varnothing = 1 \text{ mm}$, $\text{ON} = 0,5$, $\alpha_{400 \text{ nm}} = 0,05 \text{ dB/m}$),
- ✓ Longueur de fibre : 20 mètres,
- ✓ Résolution en dose $\sim 50 \mu\text{Gy}$,
- ✓ Résolution en débit de dose (moyen) \sim
 - $50 \mu\text{Gy/h}$ (intégration 1 h)
 - $5 \mu\text{Gy/h}$ (intégration 10 h)

Performances 2002

→ améliorations récentes
(puissance laser ↗)

Signal OSL = zone hachurée
(auto-compensation Cerenkov)



Mesures	en ligne (OSL) et temps réel (RL)
Nombre de voies	16
Durée de lecture (TLD500)	~ 30 s par capteur
Volume de détection	~ mm ³
Dépendance en température	entre 0,16 %.K ⁻¹ et 0,3 %.K ⁻¹
Perte d'information (<i>fading</i>)	Très faible ~ -1 % par décade en temps à 20 °C
Répétabilité (à 1 Gy)	± 1 %
Reproductibilité (à 1 Gy)	± 2 % (dose cumulée de 64 kGy)
Stabilité sous irradiation	Excellente
Dépendance en énergie (sonde polymère)	± 0,25 % sur [9 MeV, 18 MeV] et ± 0,5 % sur [6 MV, 20 MV]
Dépendance angulaire	± 1,5 % sur [-70°, 70°] (PMMA); ± 2 % sur [-70°, 70°] (laiton)
Dépendance au débit de dose	Aucune (capteur intégral)
Gamme de dose (TLD500)	[6 mGy, 6 Gy]
Dépendance au facteur de sortie	Faible (± 5 % sur [4 cm, 25 cm])
Transparence au rayonnement (sonde polymère)	excellente
Dimension typique d'une sonde	Ø ~ 5 mm, longueur ~ 30 mm
Immunité électromagnétique	Totale (lecteur hors zone)
Coût d'un capteur ponctuel (0D)	Modéré (estimé à 500 €)

OSL/FO : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Matériaux OSL

Unité de mesure multivoies OSL/FO « MAESTRO »

Sondes OSL/FO

PERFORMANCES OSL/FO

OSL/FO POUR L'ASSAINISSEMENT / DEMANTELEMENT (A&D)

ANALYSE DE PRE-DEMANTELEMENT DU RNG

Réacteur Nouvelle Génération (RNG)

Analyse du problème

Mesures en intérieur cuve

CONCLUSIONS / RETOURS D'EXPERIENCES RNG

Fonctionnalité innovante : *Dosimétrie à distance, en situation d'accès restreints et/ou difficiles, sur longue portée.*

Suivi radiologique des conduites, internes de cuves, réacteurs, piscines d'entreposage, etc.

→ Zones où la caméra gamma ne peut pas aller ...

→ Zones où les inspections s'avèrent complexes, chronophages, coûteuses.

Exemple : conduites $\varnothing < 1$ cm et de faible rayon de courbure ($R \sim 3$ à 5 cm).



Photos CEA (APM, 1998)

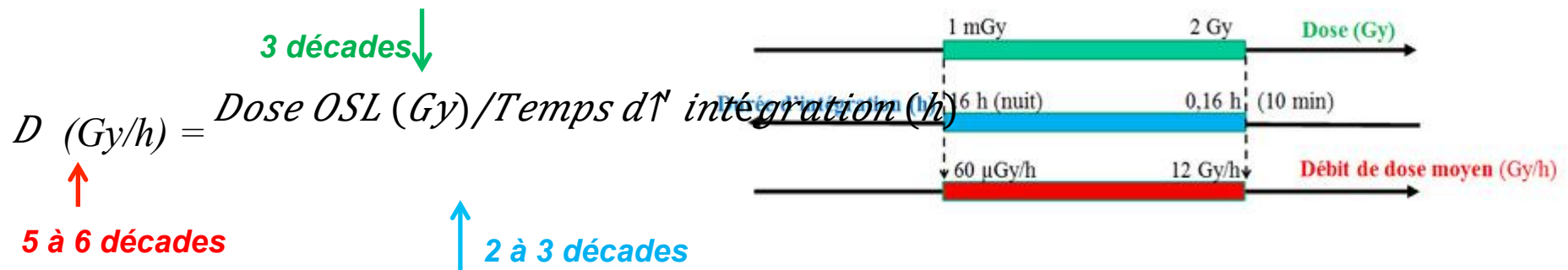
Dosimétrie 0D conventionnelle :

Détecteurs actifs (e.g. compteur GM, « stylo » CZT)

- Equivalence-tissu non nécessaire,
- Tenue aux radiations satisfaisante,
- Détecteur de médiocre tenue aux chocs (GM).
- Compromis miniaturisation \leftrightarrow performance (Gy/h),
- Miniaturisation compromise par la dimension du détecteur (GM), par le blindage EM, ou bien par les électroniques (alimentation, conditionnement du signal, thermalisation) (CZT),
- Dégradation du signal sur longue portée (> 20 m), câbles Triax souvent nécessaires,
- Selon les technologies : gamme potentiellement limitée en débit de dose et en énergie de photon.
- Gamme en débit de dose \sim typ. 3 décades.
- Présence de haute tension.

Intérêts OSL/FO pour l'A&D

- Sondes OSL/FO miniatures, souples, sans alimentation électrique locale,
 - Sondes manoeuvrables à distance par câble acier (manuel ou treuil),
 - Résistance à la traction-poussée et à l'écrasement,
 - Radiorésistance élevée,
 - Unité de lecture placée hors zone (non contaminable), déplaçable sur différents sites,
 - Facilité d'utilisation (retours positifs de CEA Marcoule et CEA Cadarache),
 - Dosimétrie passive mais opérationnelle (lectures et RAZ à distance en opération),
 - *Fading* très faible → large gamme de temps d'intégration (de 10 min à plusieurs jours, si besoin),
 - Gamme étendue en débit de dose : 5 à 6 ordres de grandeur (10 μGy/h → 10 Gy/h).
 - Gamme en énergie (sonde en câble acier) : [50 keV > 6 MeV].
 - Immunité électromagnétique (mesure optique).
-
- Miniaturisation ⇒ dégradation de performance de détection (volume actif ∇).
 - OSL/FO : compensation par augmentation du temps d'intégration.
 - Limite pratique : organisation du travail et logistique imposée par l'exploitant.



OSL/FO : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Matériaux OSL

Unité de mesure multivoies OSL/FO « MAESTRO »

Sondes OSL/FO

PERFORMANCES OSL/FO

OSL/FO POUR L'ASSAINISSEMENT / DEMANTELEMENT (A&D)

ANALYSE DE PRE-DEMANTELEMENT DU RNG

Réacteur Nouvelle Génération (RNG)

Analyse du problème

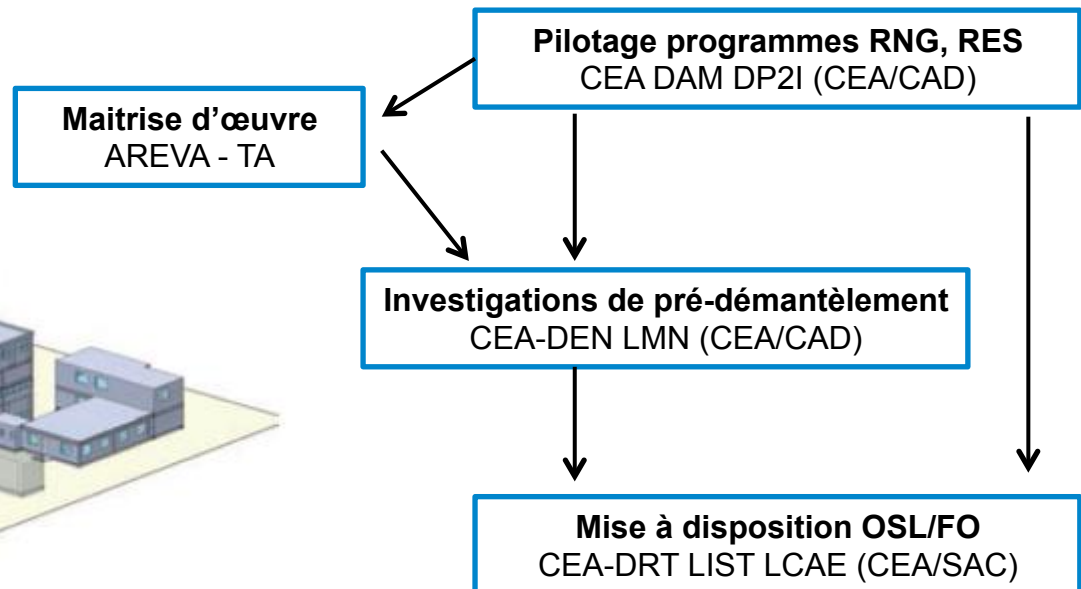
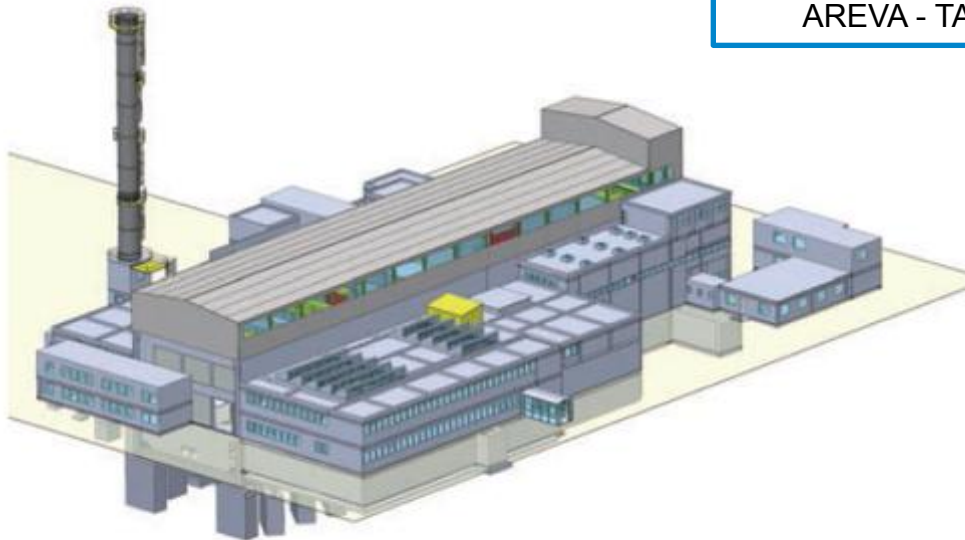
Mesures en intérieur cuve

CONCLUSIONS / RETOURS D'EXPERIENCES RNG

Réacteur Nouvelle Génération (RNG)

Qualification des concepts & technologies des filières de réacteurs embarqués sur bâtiments à propulsion nucléaire de la Marine Nationale

- Programmes d'études RNG et RES futur : pilotage CEA-DAM DPN,
- Réacteur à terre développé par AREVA-TA,
- CEA/CADARACHE (INBS-PN, Bt 400),
- MAD en 2005.

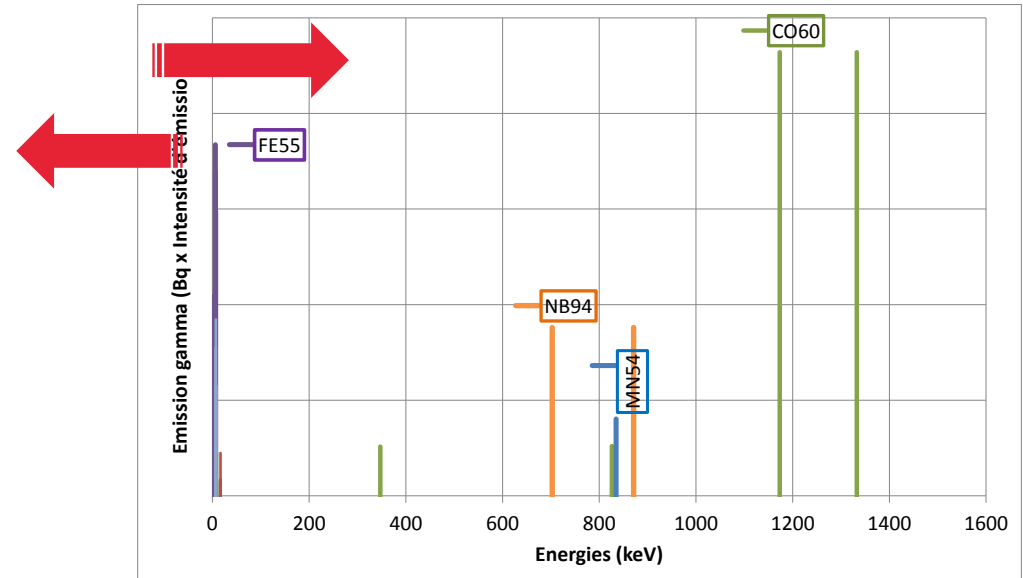


Modélisation 3D du bâtiment 400 de l'INBS PN

(document ONET Technologies)

Analyse du problème

- Estimation de l'activité des internes de cuve du RNG par CND
- Réacteur à l'arrêt depuis 10 ans
- ⇒ Spectro γ : non nécessaire



- Deux voies d'accès :

- Extérieur cuve - mais :
 - **perçage structures, position capteur ~, présence d'écrans ~**
- Intérieur cuve par instrumentation thermocouple – mais :
 - **capteur compact ($\varnothing < 8mm$), DED élevés, dynamique importante**

Mesures en intérieur cuve : 3 technologies en concurrence

- Spectromètre CdZnTe (CZT)

☹ Spectre gamma

☹ $\varnothing > 8$ mm

- Compteur GM miniature

☹ $\varnothing \sim 6$ mm - !! Électrode extérieure

☹ Fonction de réponse en énergie

☹ Fabrication de la sonde

- Dosimètre OSL/FO

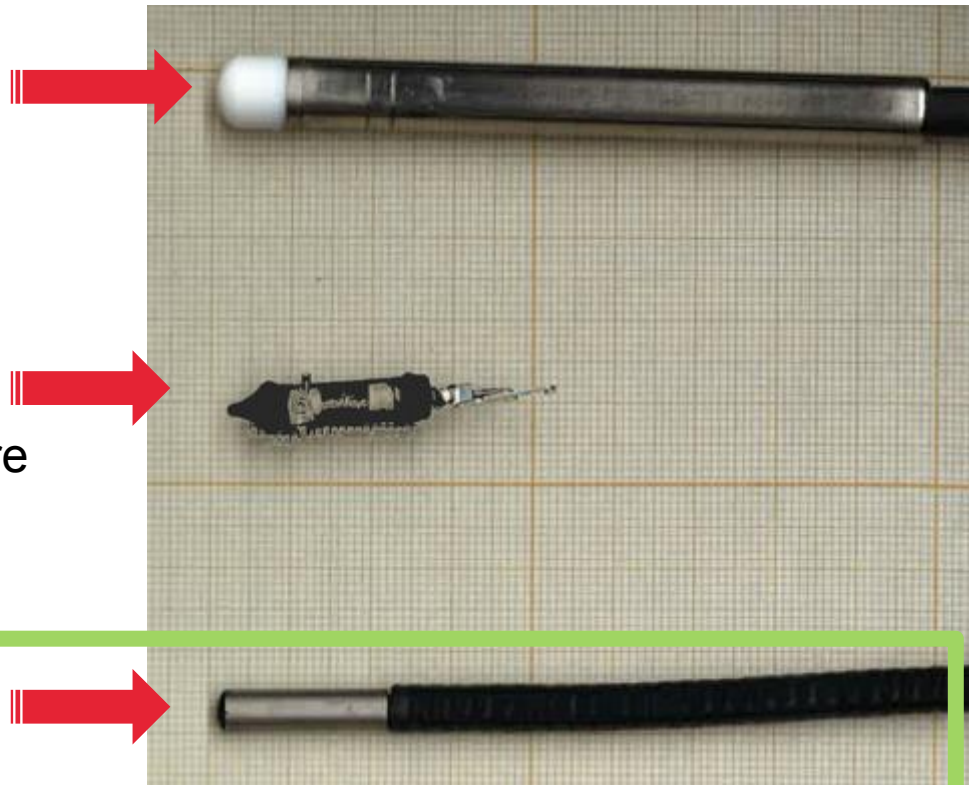
😊 $\varnothing \sim 5$ mm

☹ ~ Dosimètre ($E \gg 100$ keV)

😊 Système existant et éprouvé

😊 Fibre optique armée

😊 Dynamique élevée

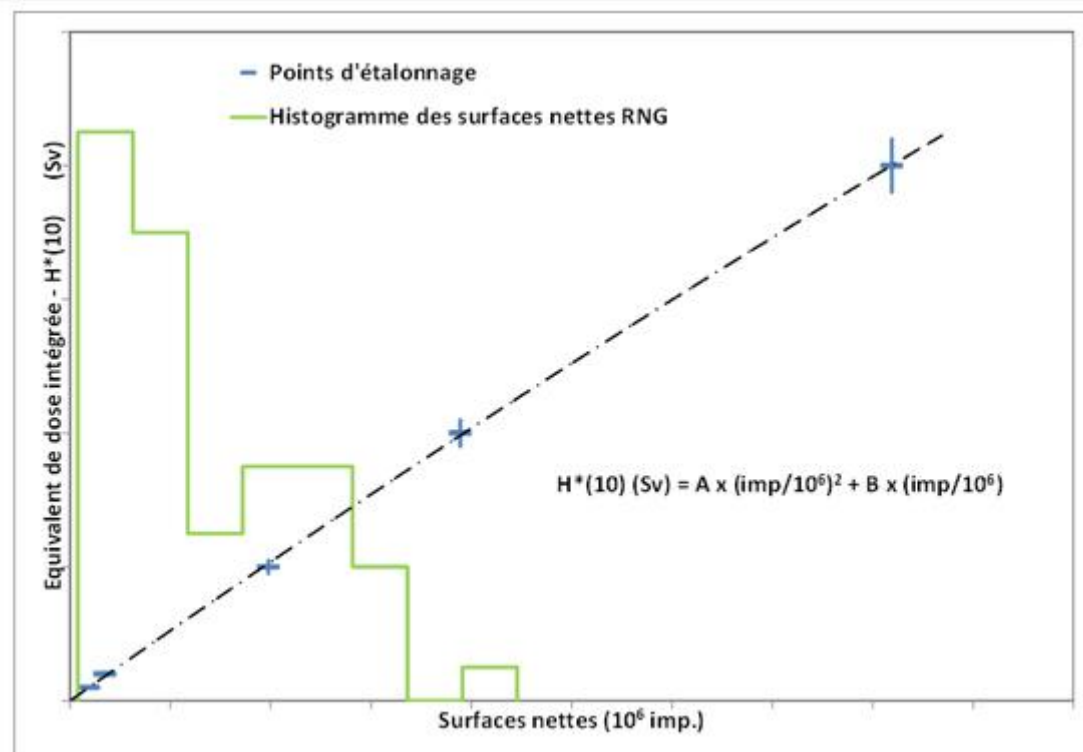


Etalonnages des sondes OSL/FO



Réalisé au DEN/CAD/D2S/SPR/LRIR

- $DED_{80cm} : H^*(10) = 0,7 \text{ Sv/h}$
- Temps d'intégration : 26 s à 1 h 25
- ED : 5 mSv à 1 Sv



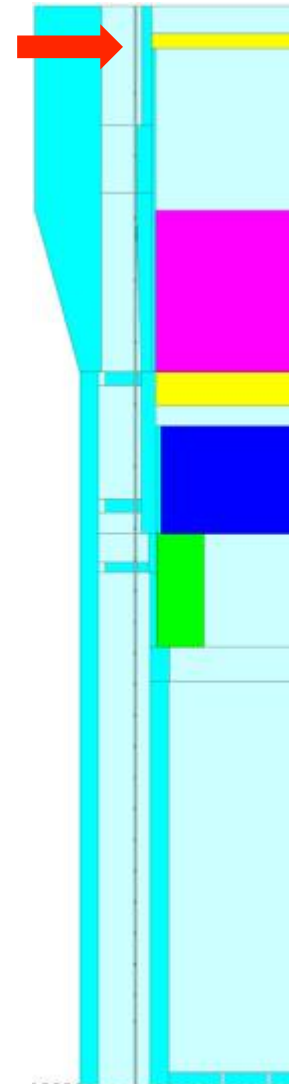
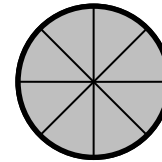


Contraintes d'intervention

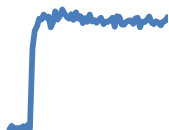
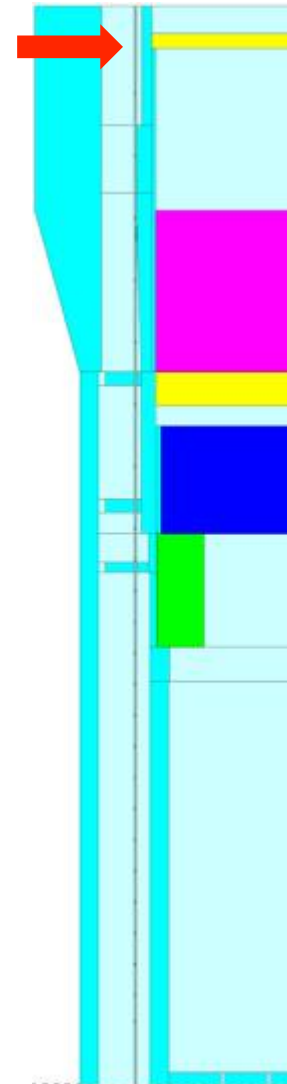
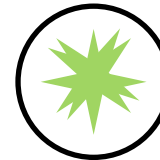
- Risque de contamination
- Place réduite



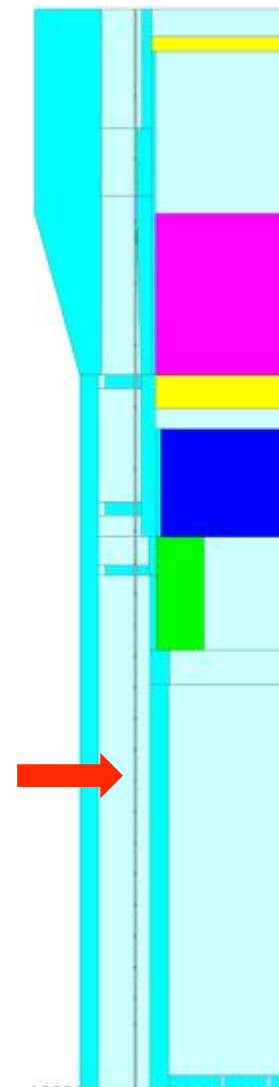
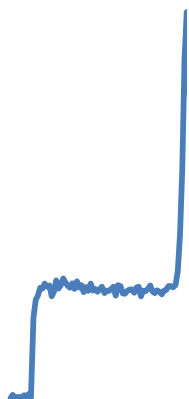
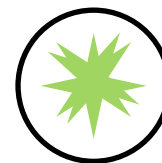
1 – stabilisation de l'électronique (faible DED)



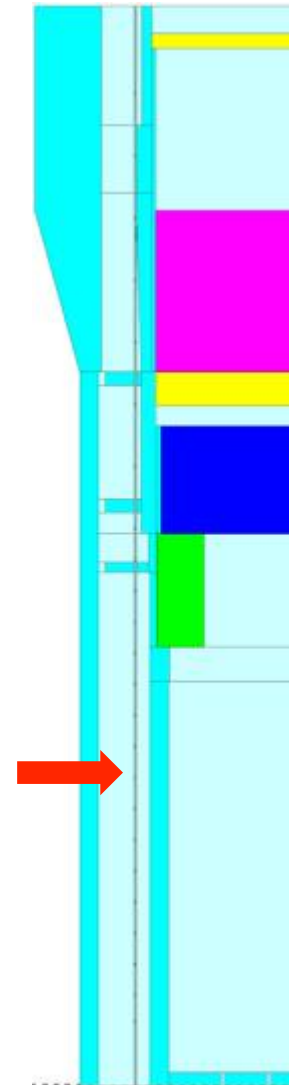
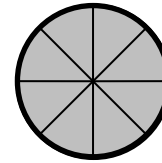
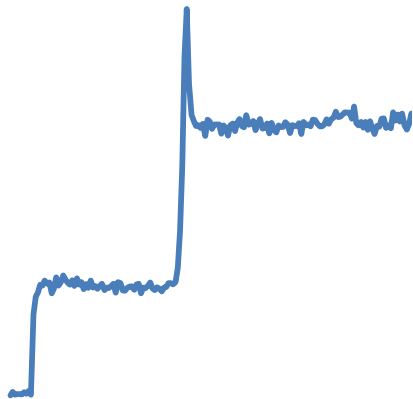
2 – LASER ON (vérification RAZ)



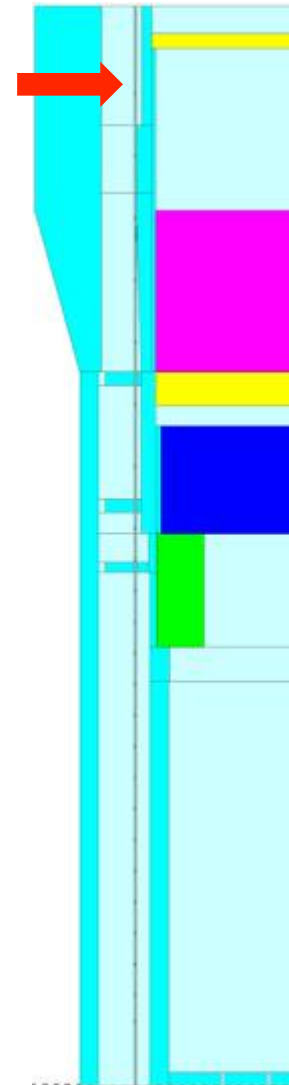
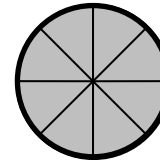
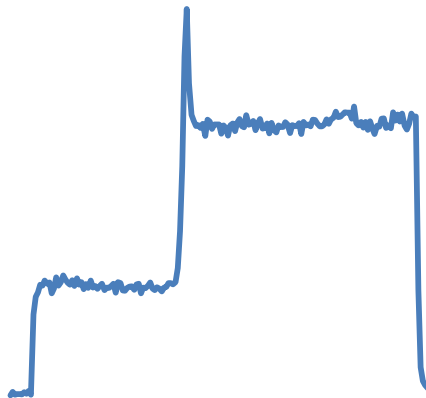
3 – Positionnement du capteur (augmentation du comptage par fluorescence)



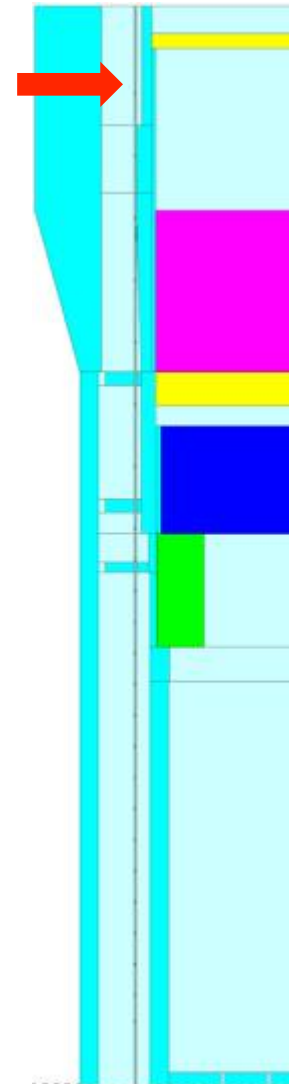
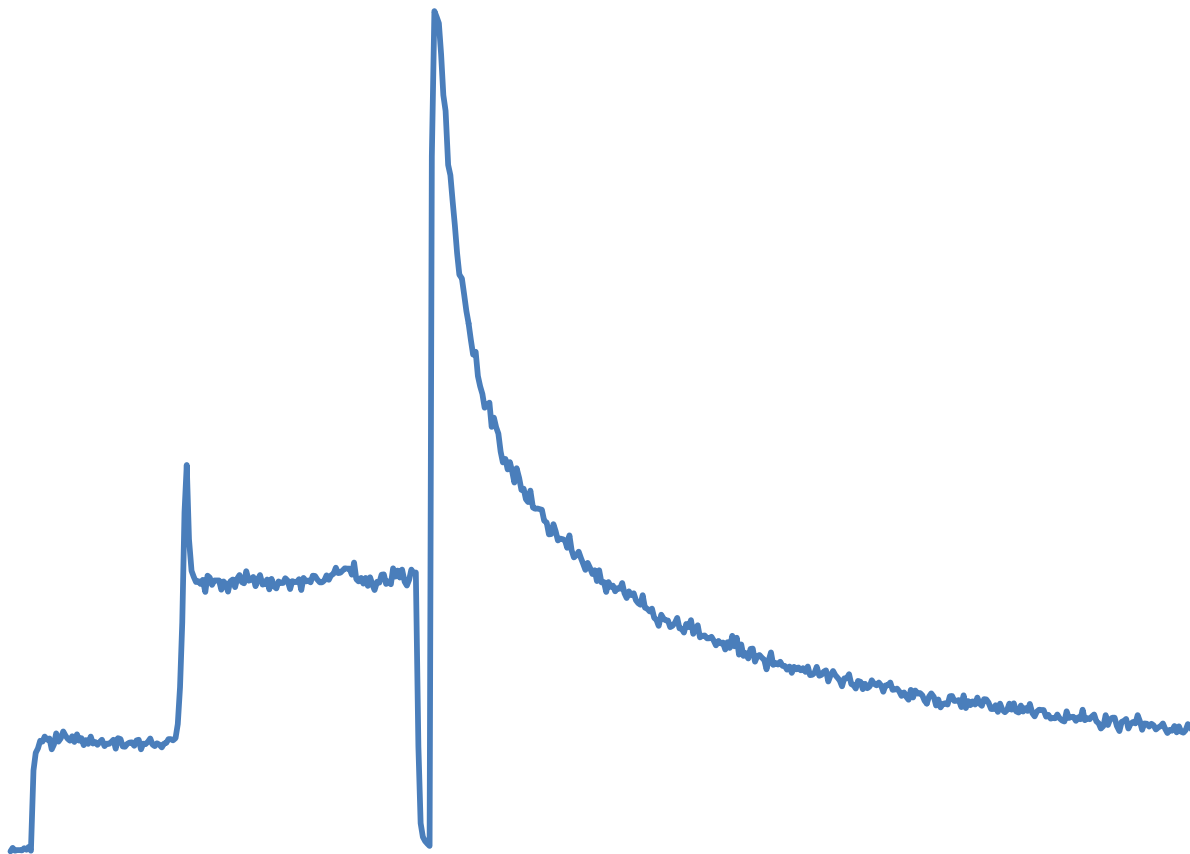
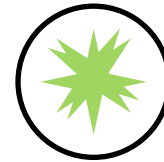
4 – LASER OFF – Intégration de la dose



5 – Fin d'intégration – remontée du capteur

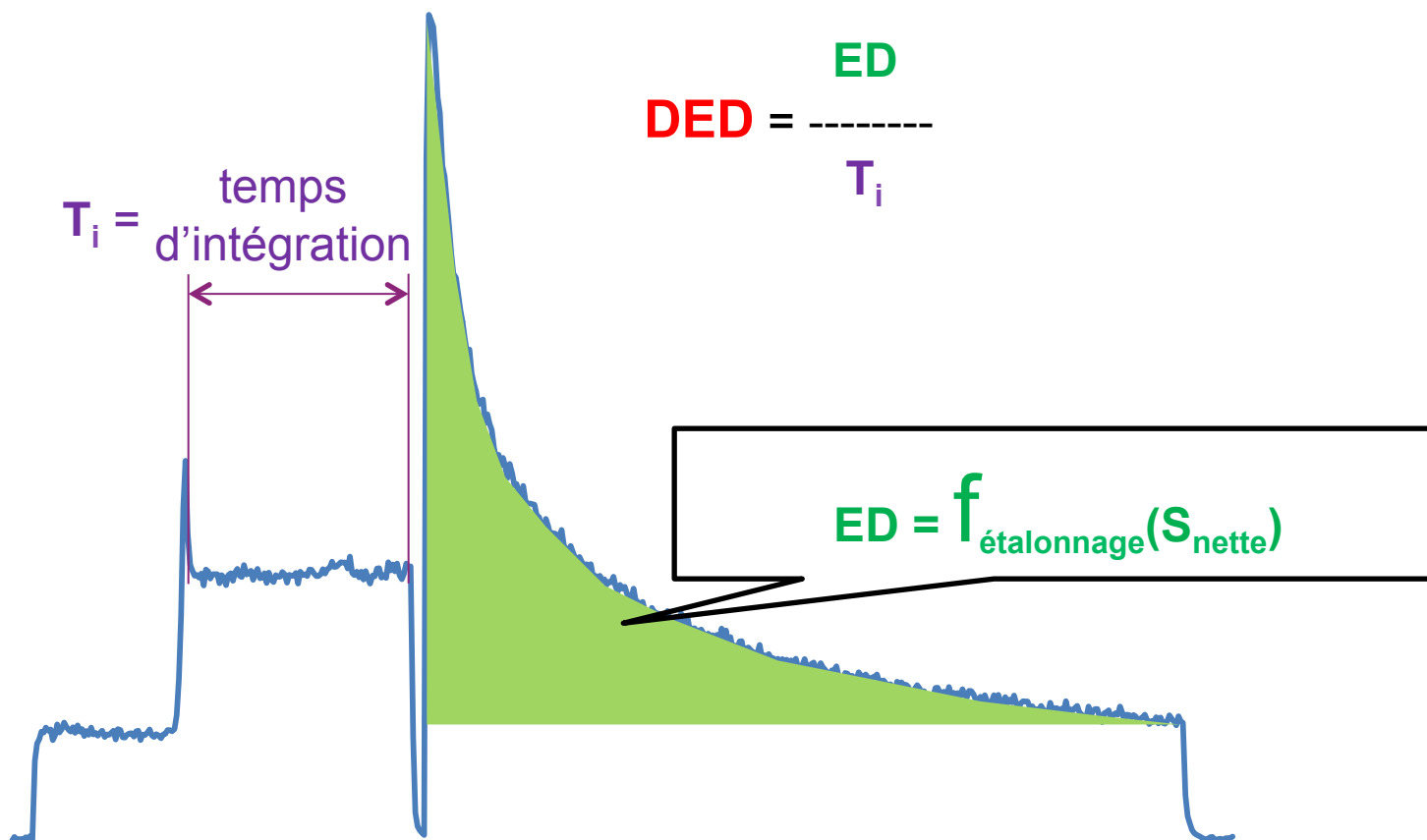
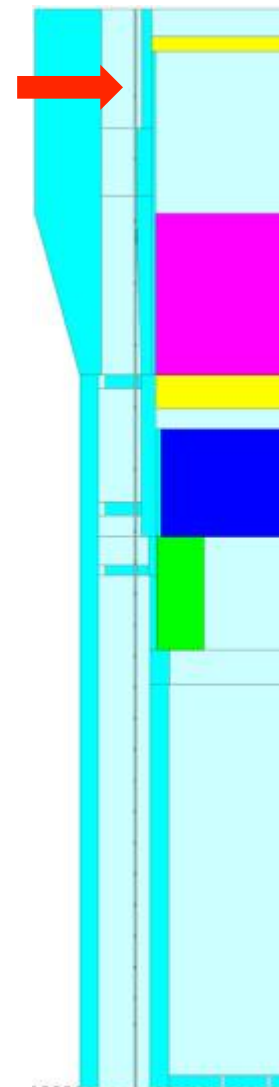
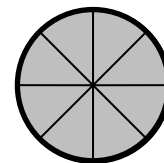


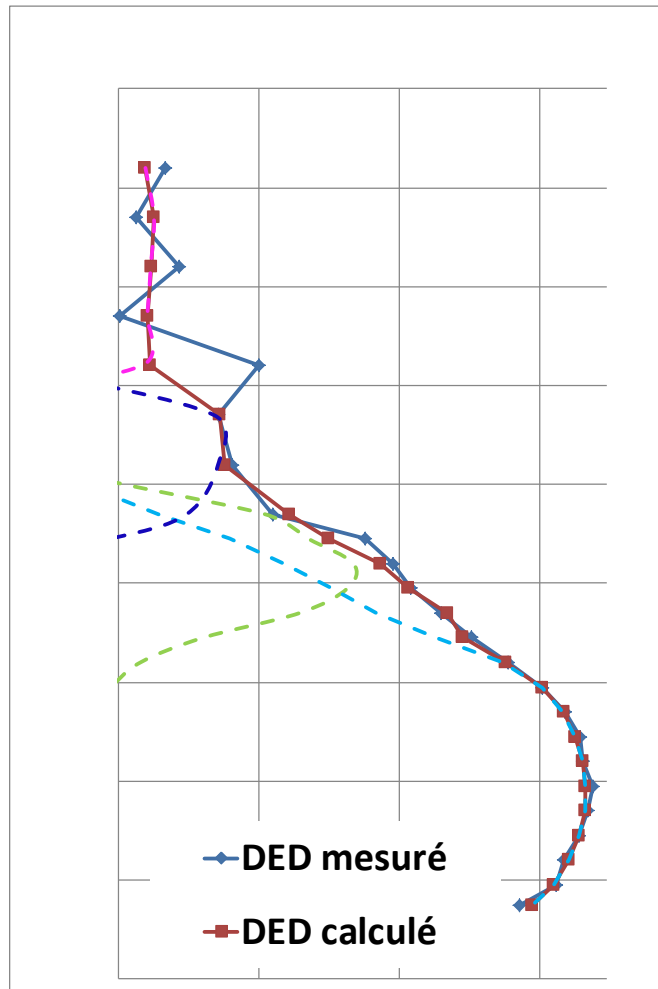
6 – LASER ON – Lecture
(vidage pièges OSL – RAZ capteur)



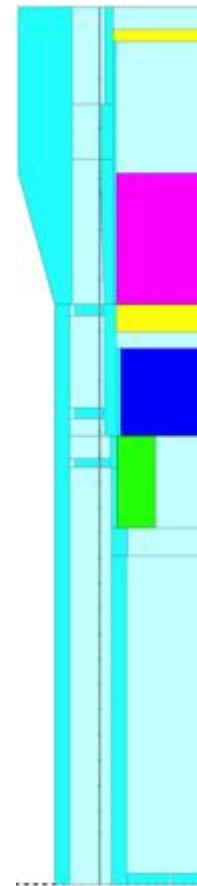
PROTOCOLE OSL PAR ETAPES

7 – LASER OFF – Fin de lecture
(Exploitation du spectre OSL)





Exploitation des mesures :



- Modélisation MERCURE
- Calcul des profils de DED par composant
- Ajustement sur le profil de DED mesuré

⇒ Activité par composant

OSL/FO : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Matériaux OSL

Unité de mesure multivoies OSL/FO « MAESTRO »

Sondes OSL/FO

PERFORMANCES OSL/FO

OSL/FO POUR L'ASSAINISSEMENT / DEMANTELEMENT (A&D)

ANALYSE DE PRE-DEMANTELEMENT DU RNG

Réacteur Nouvelle Génération (RNG)

Analyse du problème

Mesures en intérieur cuve

CONCLUSIONS / RETOURS D'EXPERIENCES RNG

- **Instrumentation OSL facile à mettre en œuvre**
(utilisation en démantèlement d'une baie électronique conçue pour les mesures de radio thérapie)
- **Capteurs robustes**
(~ 150 séquences d'introduction-retrait sans dégradation)
- **Capteurs compacts** ($\varnothing \sim 5$ mm)
- **Dynamique de ~ 5 décades avec un seul capteur**
(incertitudes réduites car signal important même à faible ED)
- **Grandeur mesurée facile à interpréter**
(proche de $H \uparrow^* (10)$ donc calculable avec la majorité des codes)

 **TECHNIQUE INCONTOURNABLE POUR CE TYPE DE MESURE**

***Merci pour votre attention,
Avez-vous des questions ?***

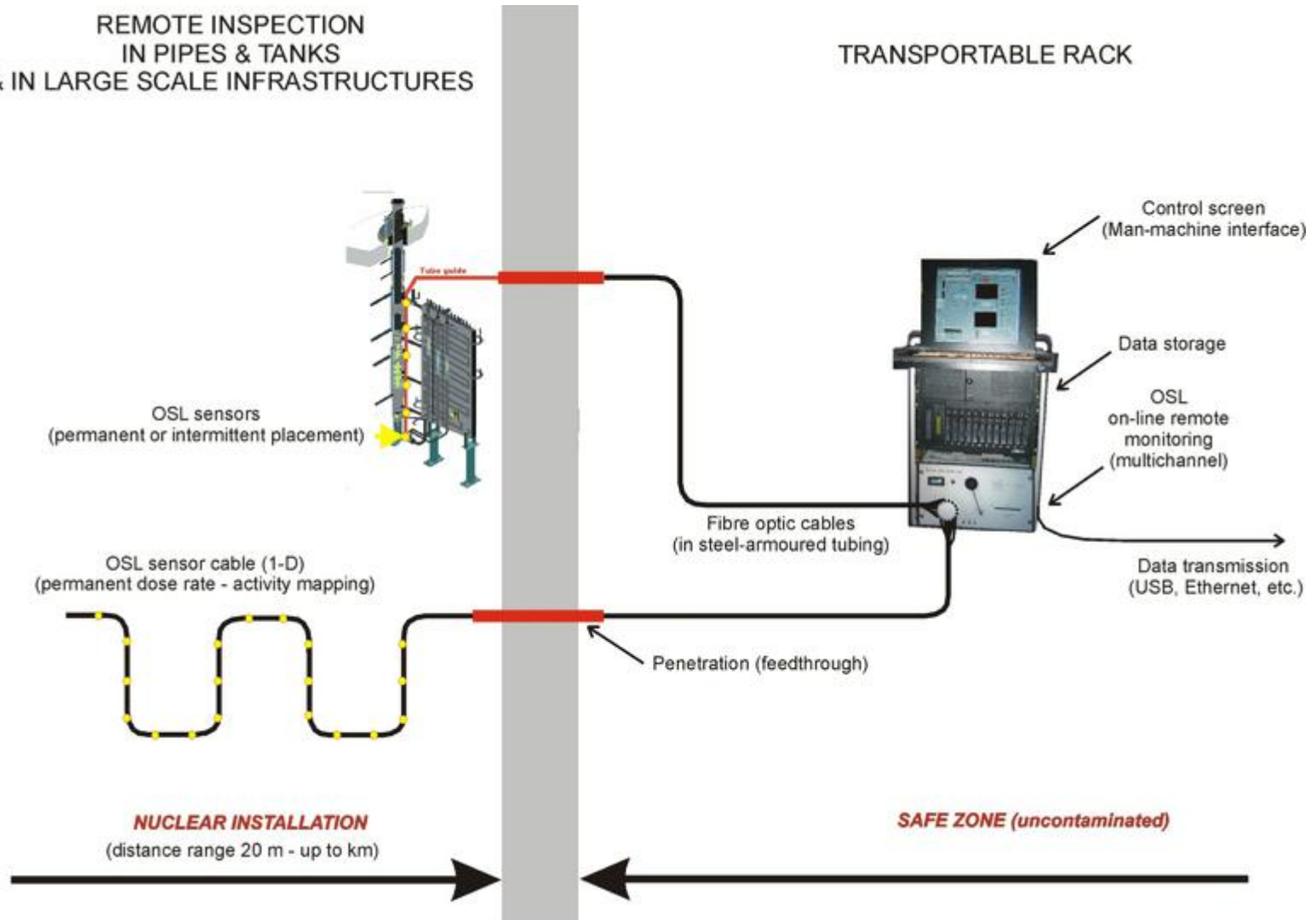
Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Institut Carnot CEA LIST
Centre de Saclay | 91191 Gif-sur-Yvette Cedex
T. +33 (0)1 69 08 20 03 | F. +33 (0)1 69 08 60 30

DRT/LIST
DM2I
LCAE

PERSPECTIVES : PROJET INSPECT

REMOTE INSPECTION
IN PIPES & TANKS
& IN LARGE SCALE INFRASTRUCTURES

TRANSPORTABLE RACK



Retour d'expérience obtenu à CEA-Marcoule sur APM :

- Facilité d'utilisation,
- Unité portable,
- Capteur de petite taille ($\varnothing = 8 \text{ mm}$),
- Longue portée de mesure (plusieurs centaines de m),
- Suivi quasi temps réel ou à la demande,
- Reproductibilité satisfaisante.

3^{ème} Congrès ATSR, Radioprotection et Logique de Démantèlement,
2-4 octobre 2002, La Grande Motte
(POSTER réalisé par CEA-DEN-UDIN Marcoule)

capteur à stimulation optique

Mesures de débits de dose absorbée in-situ Équipement à capteur à stimulation optique

Objectifs

- Mesurer les niveaux de débits de dose absorbée gamma à l'intérieur d'équipements radioactifs.
- Suivre leur évolution au fur et à mesure de leur assainissement.

Mesures complémentaires

- Localisation des sources : imageurs gamma.
- Spectrométrie gamma in-situ.

Contraintes d'utilisation

- Cheminement à l'intérieur de tuyaux de diamètres réduits \Rightarrow Capteurs de faible taille.
- Mise en oeuvre à distance \Rightarrow Mesure déportée de plusieurs dizaines de mètres.
- Points d'accès multiples et incommodes \Rightarrow Equipement compact et transportable.
- Gamme d'irradiation étendue \Rightarrow Dynamique de mesure supérieure à 10^4 .

Fonctionnement du capteur OSL

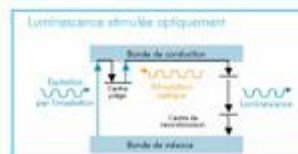
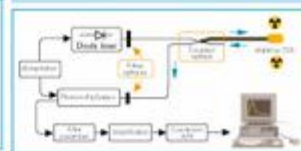


Schéma constitutif de l'équipement de mesure à capteur OSL

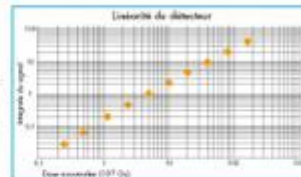


Prototype OSL semi-industriel UDIN/SAM



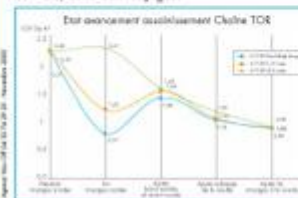
Détecteur :
Capteur Ba5 - Fibre optique (40 m).
EC industriel :
Carte d'acquisition PCI 1200 IN Instrumental.
2 cartes spécialisées conçues par le DEN.
Logiciel d'exploitation spécifique.

Linéarité réponse du détecteur Ba5



Exemples d'application

Evolution du débit de dose intérieur de la cuve 611-30, suite aux rinçages.



Evolution du débit de dose intérieur de la cuve 655-41 suite aux rinçages.

