

# Instrumentation OSL multipoints pour le contrôle de la dose en radiothérapie

**Sylvain Magne, Pierre Ferdinand**

**CEA LIST Laboratoire de Mesures Optiques**

CEA - Saclay 91191 Gif-sur-Yvette cedex France

Téléphone : (33) 1 69 08 90 47

[sylvain.magne@cea.fr](mailto:sylvain.magne@cea.fr)

**Loïc de Carlan, Soizic Sorel, Jean-Marc Bordy**

**CEA LIST Laboratoire National Henri Becquerel (LNHB)**

CEA - Saclay 91191 Gif-sur-Yvette cedex France

Téléphone : (33) 1 69 08 41 89

[jean-marc.bordy@cea.fr](mailto:jean-marc.bordy@cea.fr)

**Aurélie Isambert, André Bridier**

**Institut Gustave Roussy (IGR), Service de Physique**

39, rue Camille Desmoulins 94805 Villejuif cedex France

Téléphone : (33) 1 42 11 49 05 or 16

[aurelie.isambert@igr.fr](mailto:aurelie.isambert@igr.fr)

- 1993 :** Premières études OSL sur des polycristaux sulfures alcalino-terreux (AES)
- 1995 :** Tests sur banc de matériaux OSL  
Démonstrateur de lecteur OSL à fibre optique pour la RadioProtection (RP) du personnel
- 1997 :** Etude d'un prototype OSL portable mono-point (**OSL I**) basé sur des matériaux AES
- 1998 :** Réalisation de 4 lecteurs **OSL I** appliqués au démantèlement d'installations nucléaires  
Recette de 2 lecteurs OSL I à CEA-Marcoule (+ capteur + logiciel)  
Utilisation en routine à l'Atelier Pilote de Marcoule (APM)
- 2000 :** Recette d'un lecteur OSL I à AREVA NC – Marcoule (ex COGEMA)  
Utilisation dans le cadre du démantèlement de l'usine UP1
- 2001 :** Etude de nouveaux capteurs OSL pour la RP, basés sur des cristaux d'alumine ( $Al_2O_3:C$ ),  
Réalisation d'un prototype de seconde génération (**OSL II**)  
Brevet
- 2004 :** Participation au projet intégré européen FP6-MAESTRO  
Collaboration avec le CEA-LIST LNHB et l'Institut Gustave Roussy (IGR)  
Développement d'un lecteur OSL II multivoies et de capteurs pour la RadioThérapie (RT)  
Tests en conditions précliniques (IGR)
- 2007 :** Coordination du projet ANR-CODOFER appliqué à la dosimétrie des patients traités par faisceaux d'électrons

1998



2000



2002



2004



## FP6-MAESTRO WP 3.2 (OSL) :

Démontrer la faisabilité d'un système de dosimétrie OSL par fibre optique (lecteur + capteurs + logiciel) pour les applications de radiothérapie par faisceaux de photons (RT conventionnelle ou conformationnelle, RCMI, ICT)

ANR-CODOFER : Utilisation en faisceaux d'électrons (complément d'irradiation)



### Contrôle qualité de la dose en radiothérapie

- 1/ Recommandations médicales (IAEA 398, Euratom 97/43, ...)
- 2/ Récents accidents de RT  $\Rightarrow$  **Dosimétrie *in-vivo* comme critère d'agrément INCa (2011)**  
Décrets 2007-388 et 389 du 21 mars 2007 et circulaire DHOS/E4 n°2007-230 du 11 juin 2007
- 3/ Exigence de contrôle toujours plus ardue avec les nouvelles techniques de RT (RCMI, ...) :  
Balistique complexe, gradients de doses élevés (résolution millimétrique), ...



### Augmentation prévisible des coûts (tâches de maintenance et d'étalonnage)

- Traitements de RT de plus en plus complexes  
ET exigence de dosimétrie *in vivo* systématique (1<sup>ère</sup> recommandation ministérielle),
- Contribution à une meilleure organisation du plateau technique (2<sup>nd</sup>e recommandation min.),
- Procédé simple à utiliser et à coût optimisé (à l'achat ET en maintenance) :  
Recherche du meilleur coût par traitement,  
Economie de temps dans les tâches d'étalonnage et de maintenance,

## Avantages du système OSL

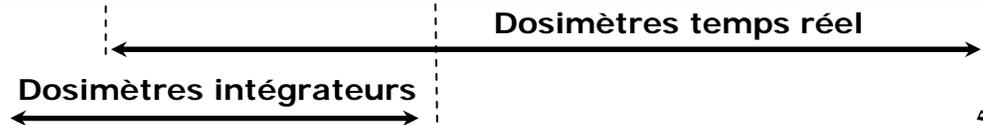
- Dosimétrie OSL performante (précision, gamme, reproductibilité, ...) (Cf. badge Landauer),
- Mesure de dose précise (intégration),
- Mesure en ligne et à distance par fibre optique (10 à 100 m) de dose et de débit de dose,
- Aspect novateur : détection multivoies par commutation optique,
- Dynamique de mesure > 3 ordres de grandeur,
- Faible dépendance angulaire (symétrie cylindrique),
- Capteur compatible *in vivo* : stérilisable ( $T^\circ \text{ C} > 100^\circ \text{ C}$ ), non toxique et chimiquement inerte,
- Capteur transparent aux radiations (pas de composés métalliques),
- Immunité aux perturbations électromagnétiques (accélérateurs),
- Sécurité de la mesure en cas de panne électronique (stockage de la dose),
- Durée de lecture OSL = 20 s/capteur (4 min/12 capteurs) : compatible avec la durée inter-patient,
- Le fonctionnement du système OSL ne perturbe pas l'organisation du traitement,
- Mesure temps réel (par RadioLuminescence - RL) de la dose cumulée (ICT),
- Système facile d'emploi, à étalonner, et à maintenir,
- Capteur résistant aux radiations : grande durée de vie et faible fréquence de remplacement,
- Coût optimisé (en prenant en compte les coûts de maintenance)

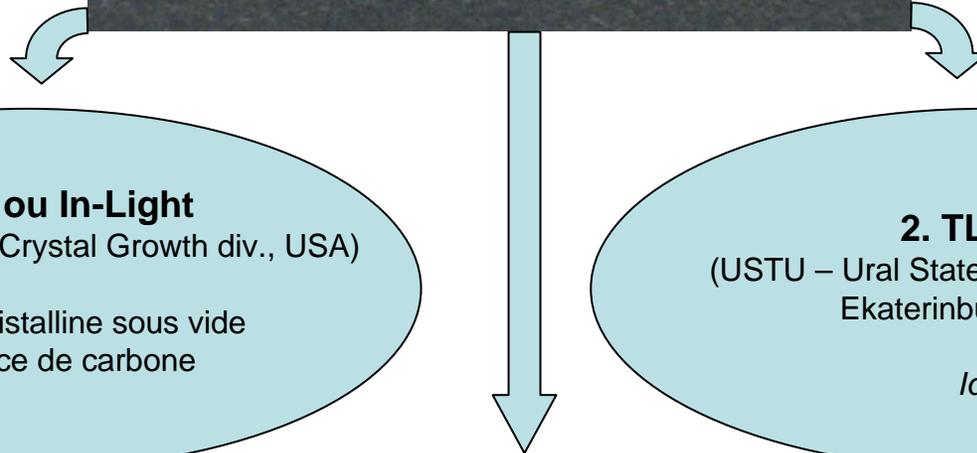
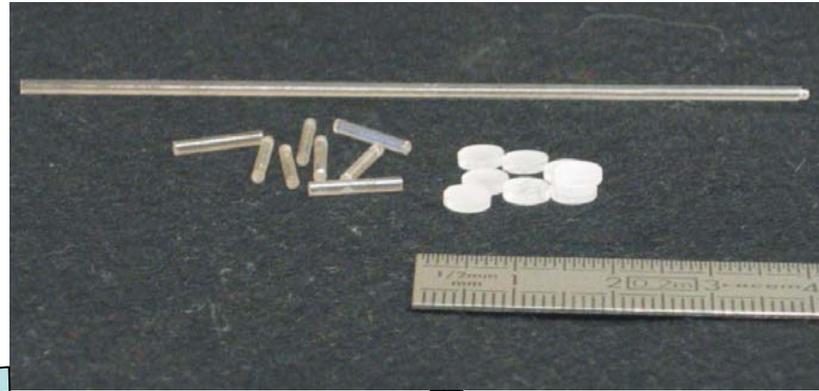
## Avantages spécifiques de l'alumine réduite au carbone ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ )

- Mesure de dose en temps réel lors du traitement par RL et après traitement par OSL,
- Très faible perte d'information (*fading*) à température ambiante,
- Faible dépendance en température,
- Matériau optiquement transparent, très stable, non toxique et non hygroscopique,
- Disponible sous forme de fibre cristalline à un coût très réduit,
- Compensation en énergie possible par conditionnement adapté,

Type de détecteur →	TLD	MOSFET Bias/unbias	OSL/RL	Diode	CI diamant	Scintillateur plastique
<b>Propriété recherchée ↓</b>						
Dimension millimétrique	☹	😊	☹	☹	☹	☹
Faible dépendance en énergie	😊	☹	☹	☹	😊	😊
Faible dépendance en incidence angulaire	☹	😊	☹	☹	☹	😊
Faible dépendance en température	☹	☹	☹	☹	☹	☹
Insensibilité au débit de dose	😊	☹	😊	☹	☹	😊
Faible fréquence de ré-étalonnage (stabilité)	😊	☹	😊	☹	☹	☹
Durée de vie du capteur (> année)	😊	☹	😊	☹	☹	😊
Faible coût de remplacement du capteur	☹	☹	☹	☹	☹	😊
Facilité d'utilisation	☹	😊	😊	☹	☹	😊
Peu de perturbations dues au câble	☹/☹	☹/😊	☹/☹	☹	☹	☹
Débit de dose (dose cumulée) en TEMPS REEL	☹/☹	☹	☹	😊	😊	😊
Dose absorbée (après traitement) EN LIGNE	☹/☹	😊	😊	☹/☹	☹/☹	☹/☹
Faible perte d'information ( <i>fading</i> )	😊	☹	😊	☹/☹	☹/☹	☹/☹

😊 Point fort ☹ point faible

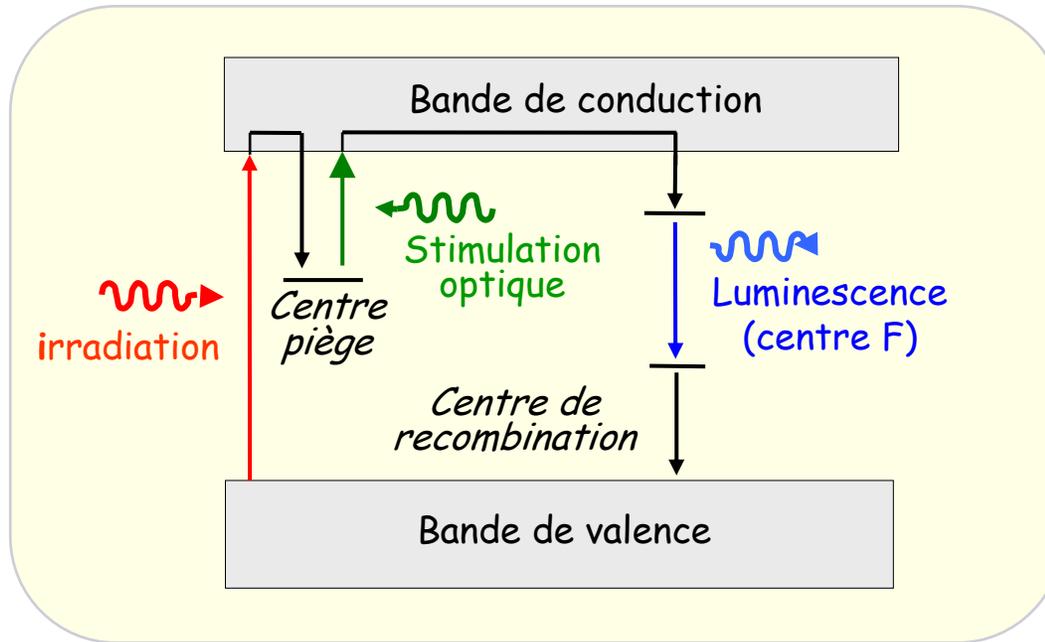




**1. Luxel ou In-Light**  
 (Landauer / Stillwater Crystal Growth div., USA)  
 Croissance cristalline sous vide  
 en présence de carbone

**2. TLD 500**  
 (USTU – Ural State Technical University,  
 Ekaterinburg, Russia)  
*Idem*

**3. PGTI**  
**(Post-Growth Thermal  
 Impurification technique)**  
 Cristaux d'alumine standard  
 réduits au carbone en four sous vide



## 2 modes opératoires possibles

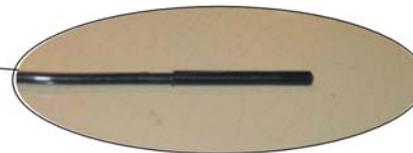
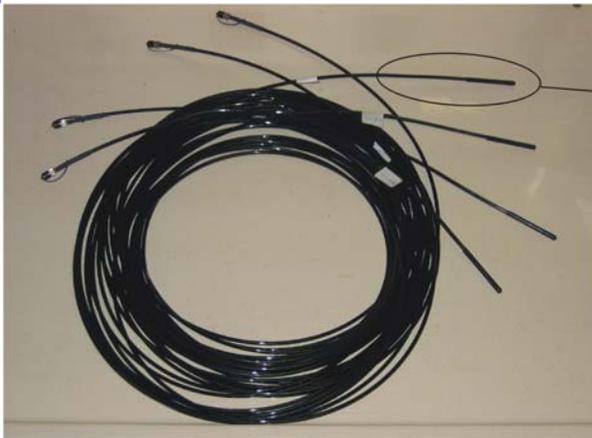
1. Observation de la scintillation au cours de l'irradiation (RadioLuminescence – RL)
2. Observation de la luminescence stimulée optiquement (OSL) après irradiation.

**CW-OSL** : Mesure de dose absorbée (entre deux périodes de stimulation successives)

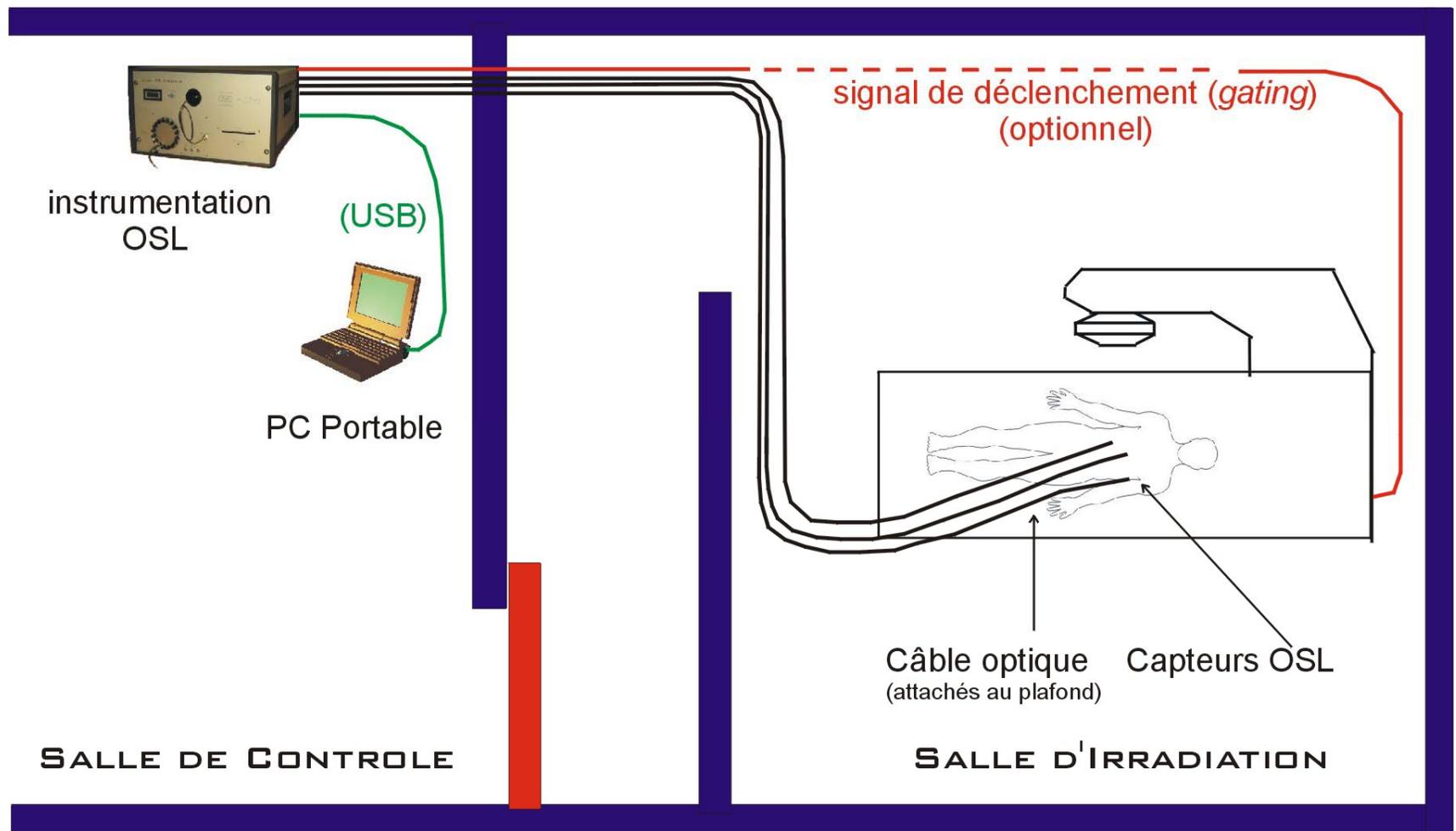
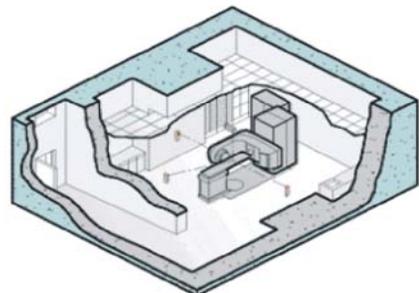
**RL** : Mesure de la dose cumulée (au cours de l'irradiation)

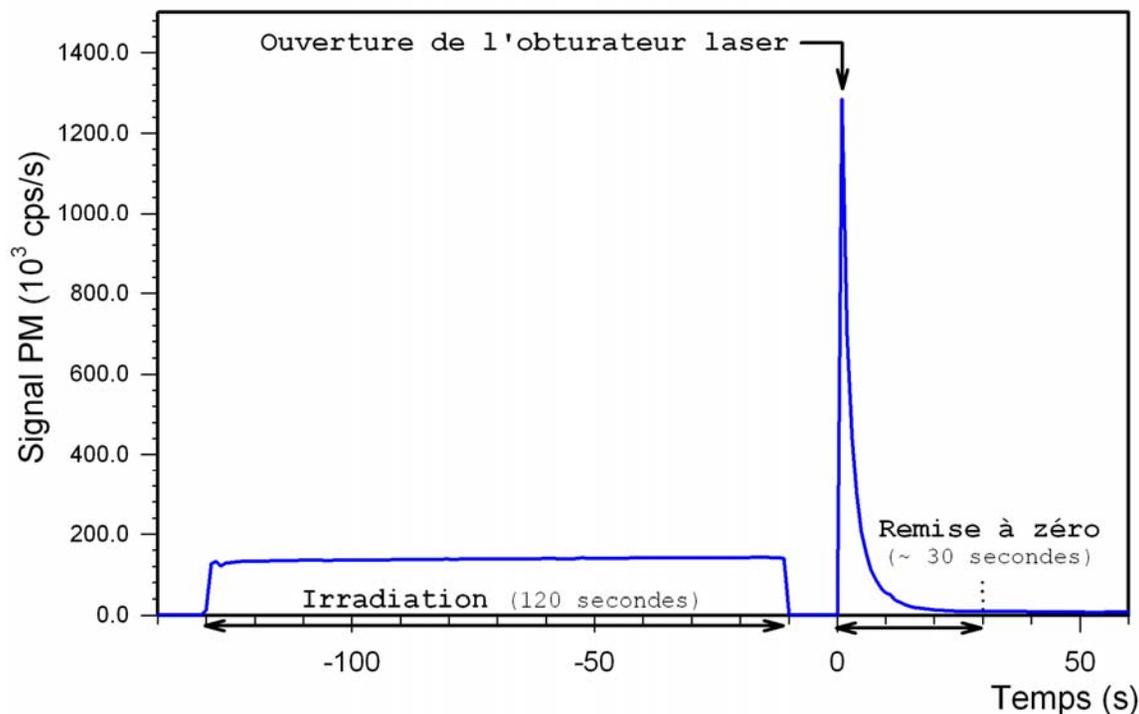
Compensation de l'effet Cerenkov par discrimination temporelle ou double-fibre

- 15 canaux pour capteurs OSL,
- 1 canal de référence interne (calibrage de la chaîne de mesure)



Capteurs OSL  
(cristal : TLD 500)





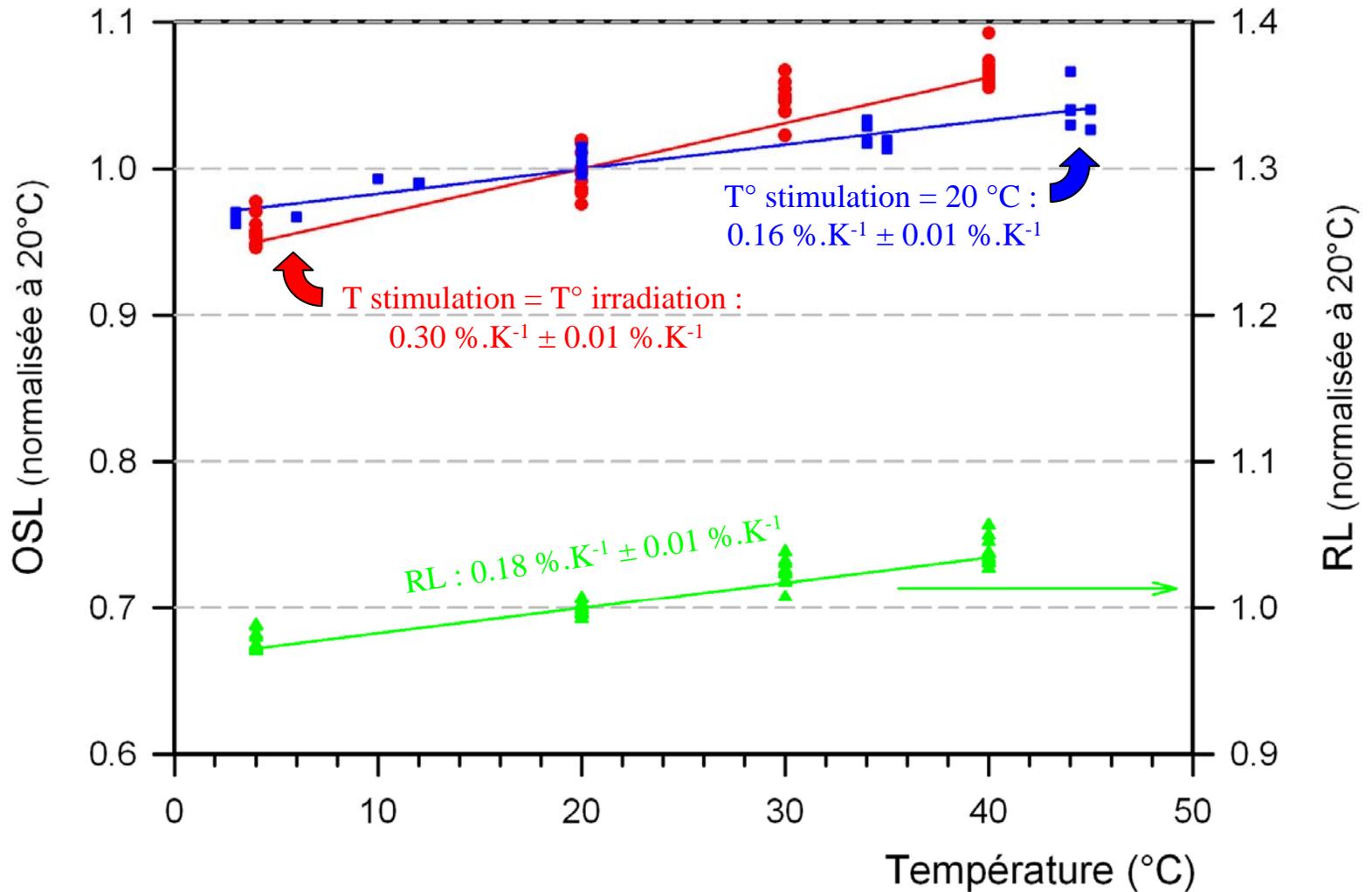
## Remise à zéro (à 99.9 %, i.e. -30 dB) :

Ex : puissance laser ~ 37 mW sur capteur

Energie nécessaire ~ 600 mJ ⇒ RAZ ~ 16 s

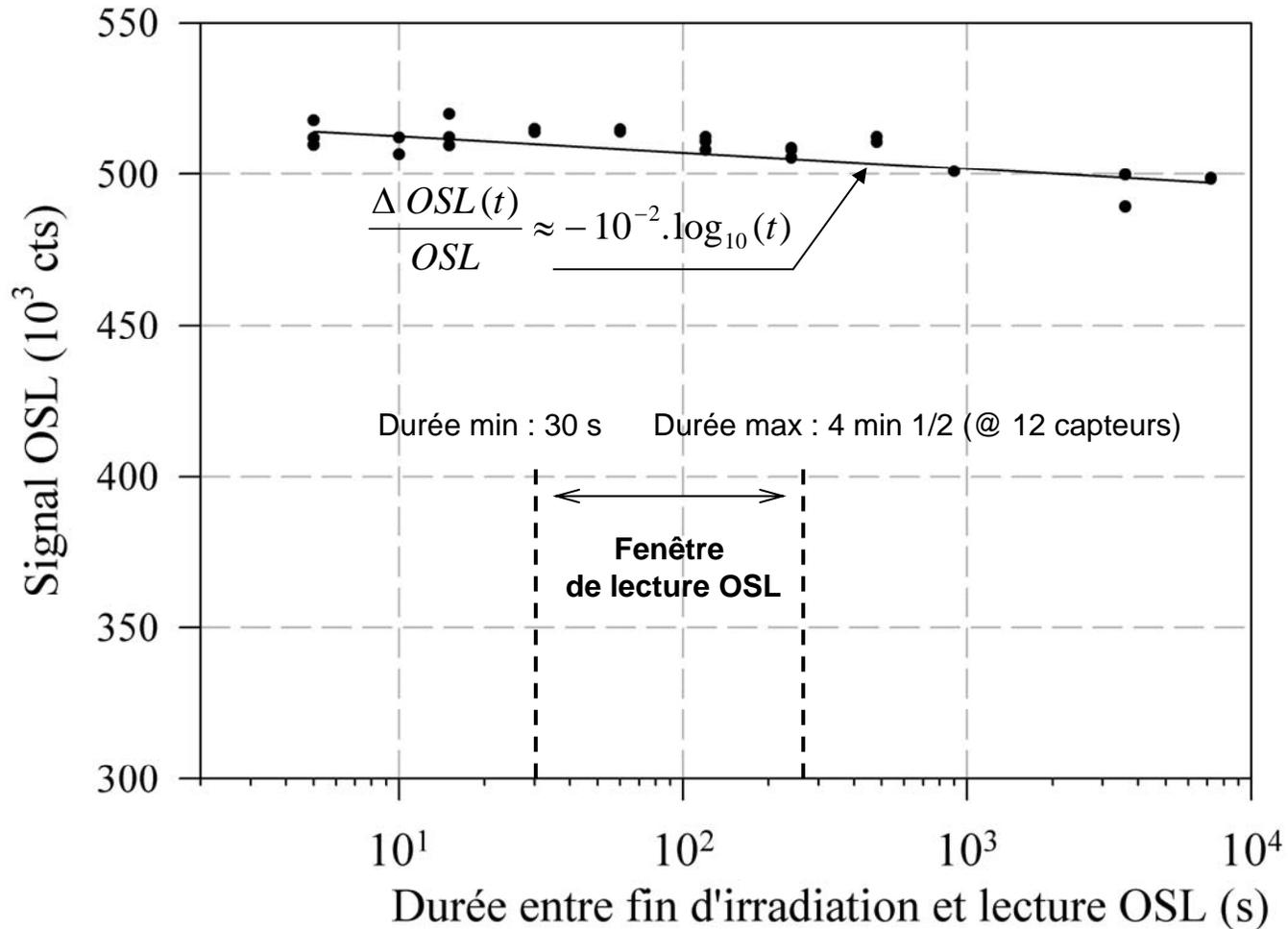
|| Lecture OSL ~ 20 s (incluant la correction de bruit de fond)

Actuellement : Lecture OSL de 12 capteurs ~ 4 minutes (durée inter-patient)

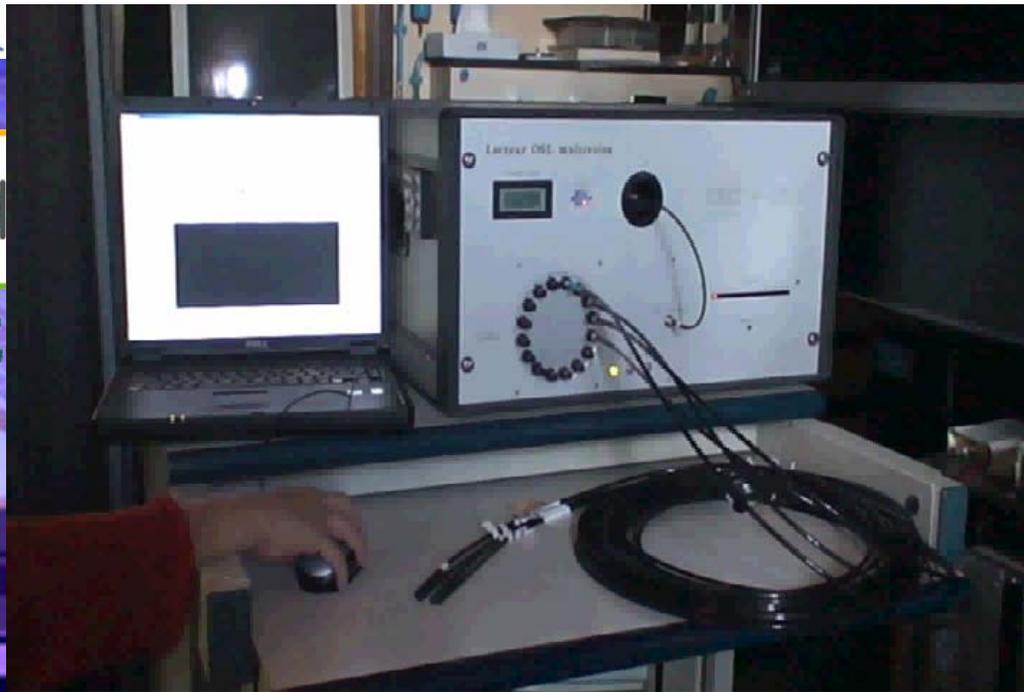


Dose ~ 0.8 Gy  
 Répétabilité du générateur ~ 1%

Fading des cristaux TLD<sub>500</sub> : ~ -1 % par décade (@ 21 °C)

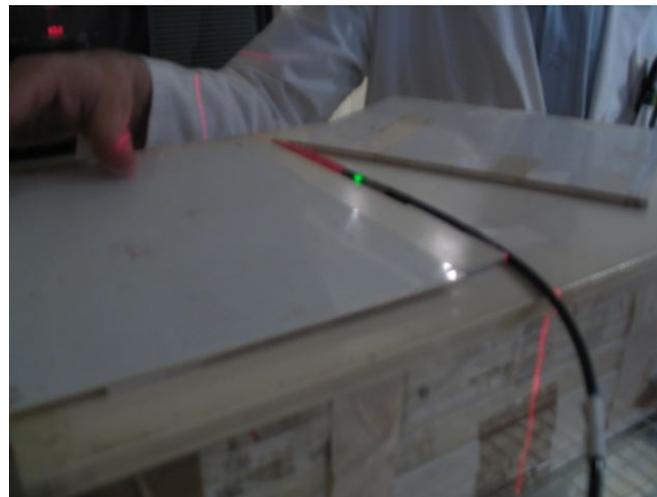


- ✓ Protocole de lecture OSL reproductible : réduction des erreurs dues au *fading* (fenêtre temporelle)
- ✓ Pas de régime transitoire avec les TLD<sub>500</sub> : Lecture OSL immédiate possible

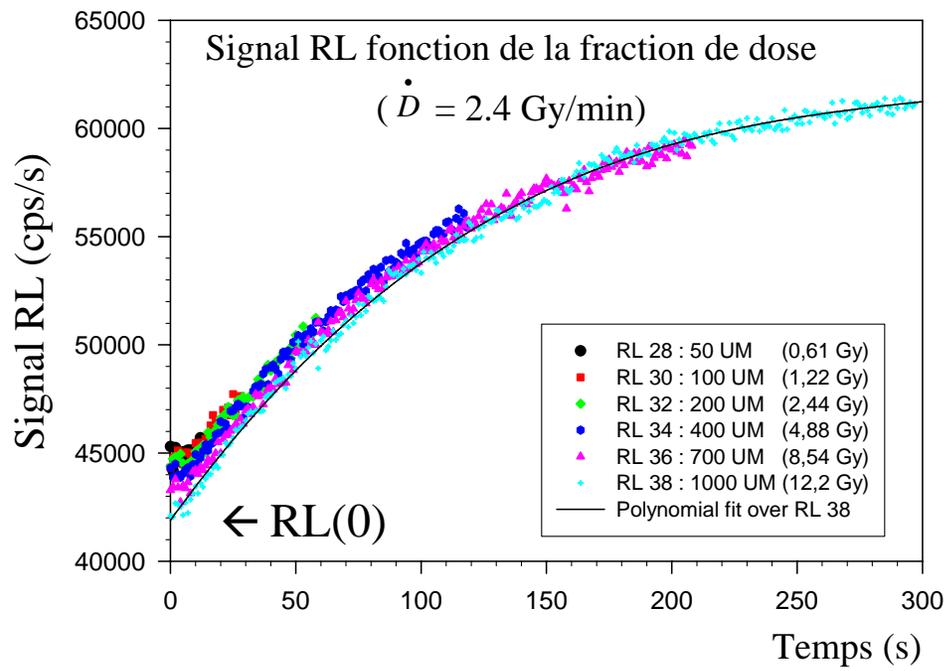
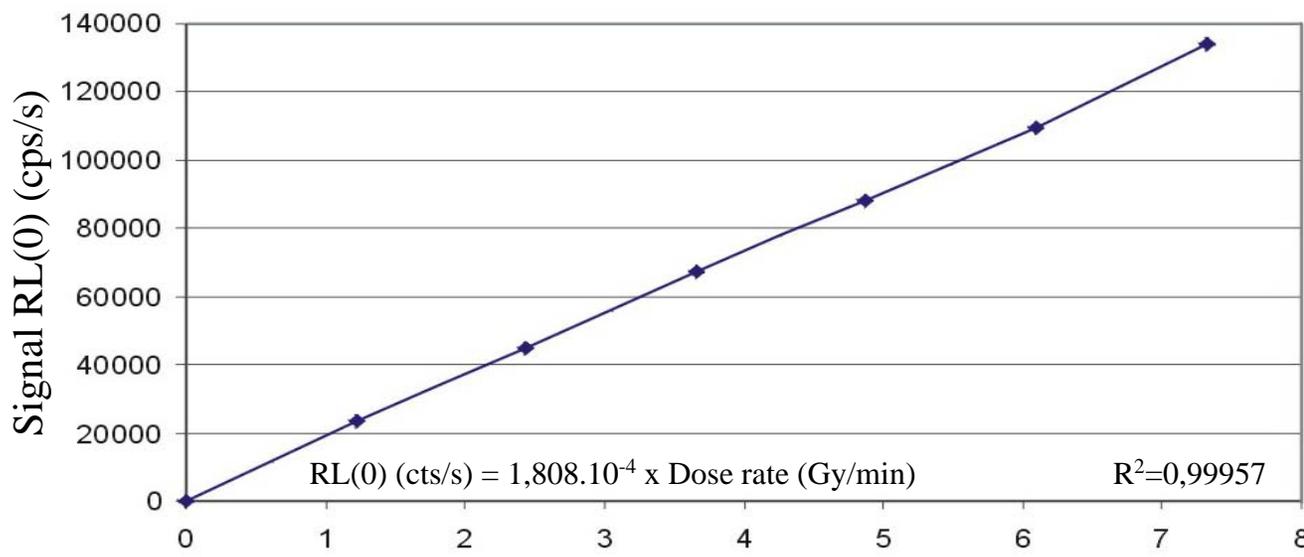


Echantillonnage RL multicanal :  
 Demi-période : 1 sec pour 6 canaux  
 2.6 sec pour 14 canaux

Varian Clinac 2300 CD (IGR)



Positionnement  
 du capteur  
 sous le faisceau



Débit de dose (Gy/min)

$$RL(t) = \alpha \cdot \dot{D} + \beta \cdot (\dot{D})^2 \cdot t + \gamma \cdot (\dot{D})^3 \cdot t^2 + \delta \cdot (\dot{D})^4 \cdot t^3$$

↓

$$RL(t) = \alpha \cdot \dot{D} \left[ 1 + \frac{\beta}{\alpha} \cdot D(t) + \frac{\gamma}{\alpha} \cdot D(t)^2 + \frac{\delta}{\alpha} \cdot D(t)^3 \right]$$

$\Delta\alpha/\alpha \sim 0.16 \%$

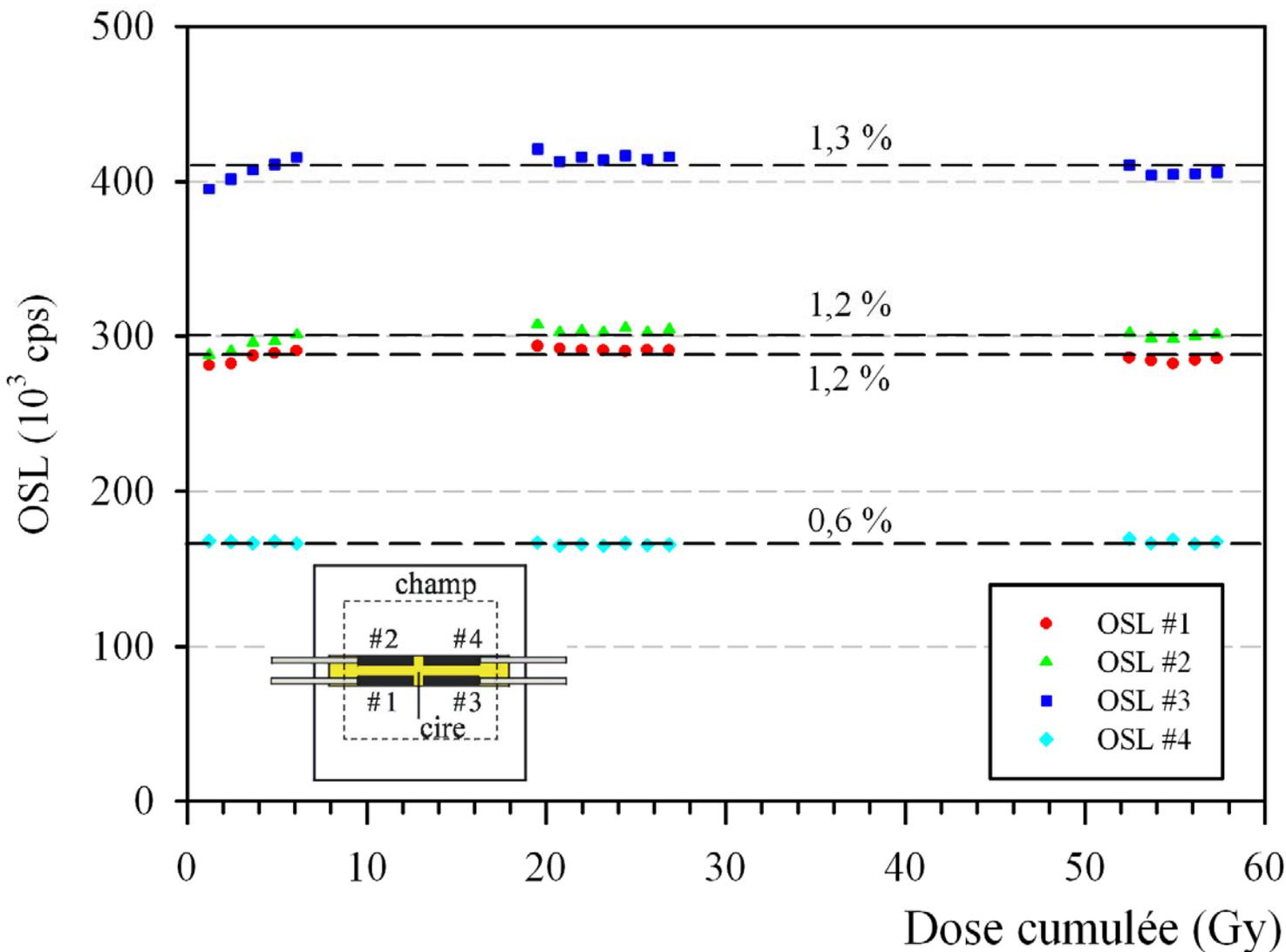
$\Delta\beta/\beta \sim 1.2 \%$

$\Delta\gamma/\gamma \sim 3.4 \%$

$\Delta\delta/\delta \sim 7.3 \%$

Capteurs pré-irradiés au CEA-LNHB (Co<sup>60</sup> source) :

- #1 : 1 kGy,
- #2 : 750 Gy
- #3 : 500 Gy
- #4 : 250 Gy



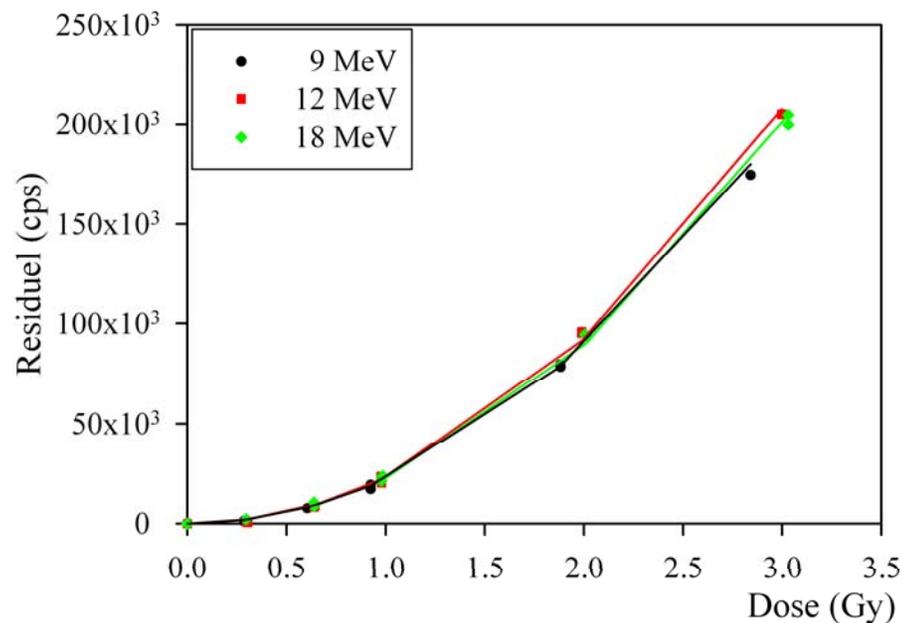
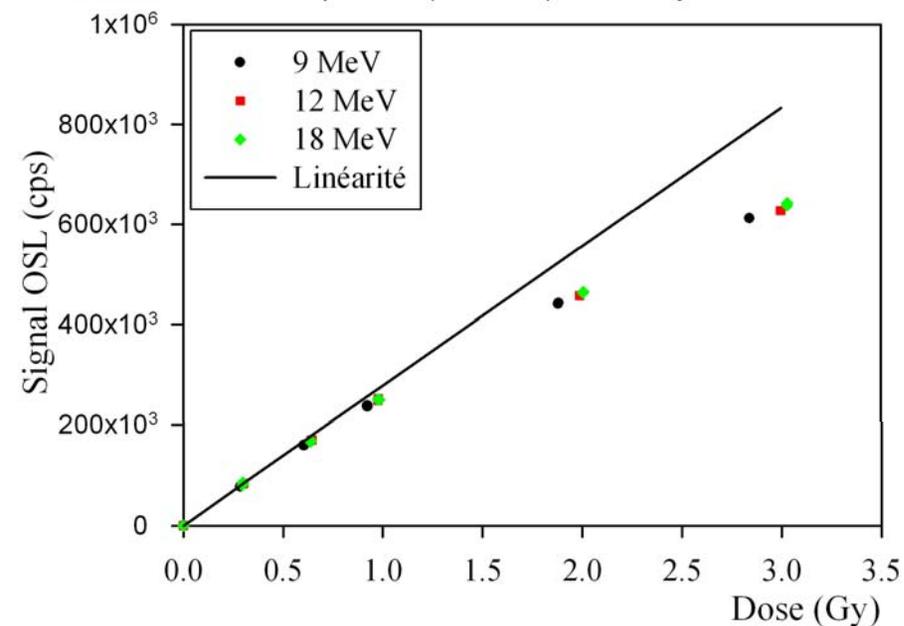
## Irradiation par faisceau d'électrons (conditions de référence)

- Energies nominales de faisceau : 9, 12 et 18 MeV,
- Taille de champ : 10 x 10 cm<sup>2</sup>,
- Distance source-surface : 1 m,
- Mode horizontal

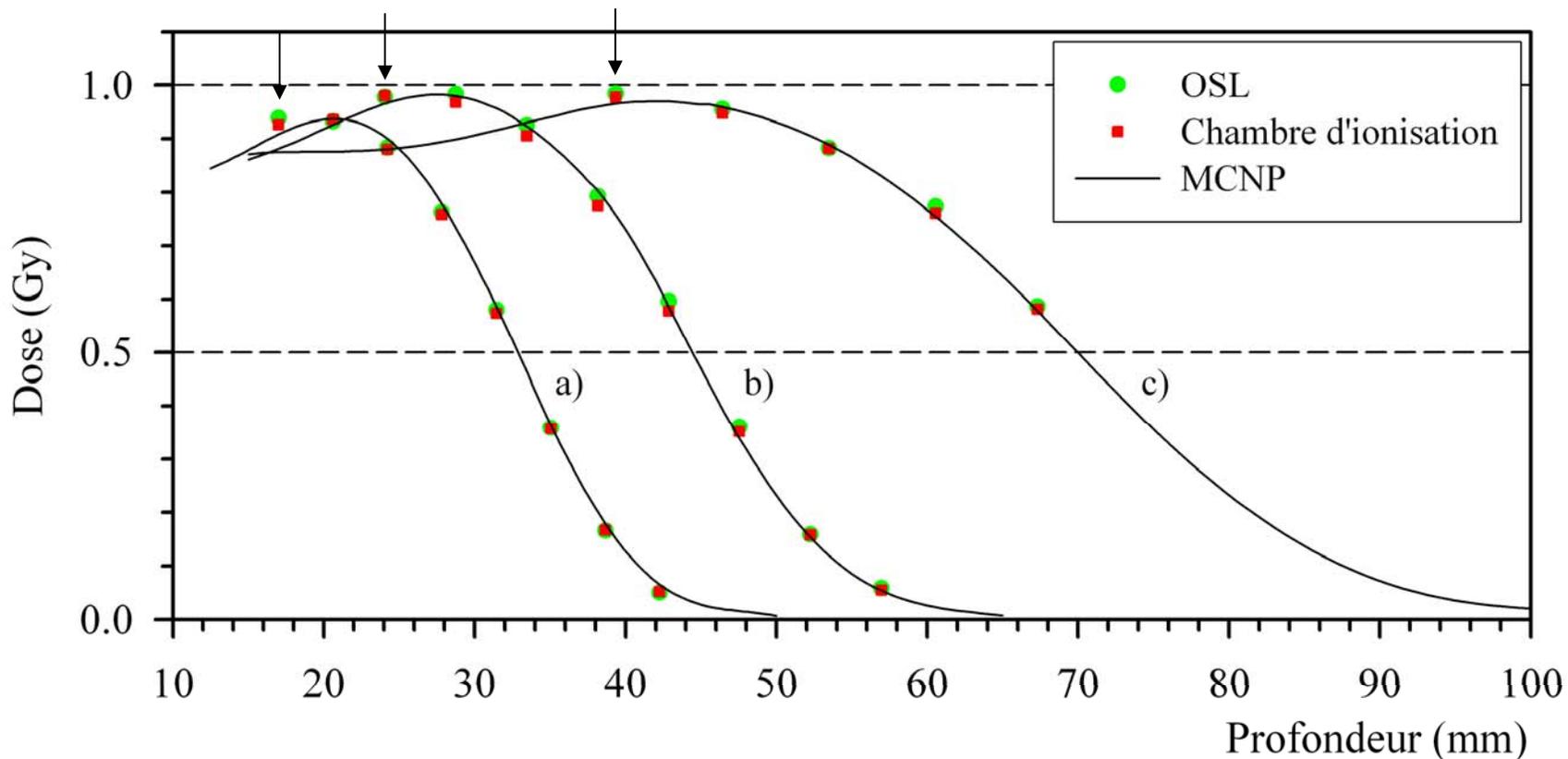


## Etalonnage en dose (à $z_{ref}$ ) des lectures OSL

Chambre d'ionisation à la profondeur de référence (pour chaque énergie) (TRS-398)



- ✓ Très faible dépendance en énergie (un seul étalonnage est nécessaire (e.g. 12 MeV))
- ✓ Ajustement par équation du second degré :  $a \cdot D^2 - s \cdot D + I_{OSL} = 0$  (résolution simple)



**Modélisation Monte Carlo (MCNP 5) :**

Source simplifiée, tally \*f8

Faisceaux d'électrons

Taille de champ : 10 x 10 cm<sup>2</sup>

Distribution gaussienne en énergie :

a/ E = 8 MeV ;	FWHM = 2.16 MeV
b/ E = 10.4 MeV ;	FWHM = 2.66 MeV
c/ E = 16 MeV ;	FWHM = 5.5 MeV

(aucune correction en énergie dans les courbes de rendement en profondeur)

## Réalisations

- ✓ Lecteur OSL multicanal (15 voies) pour la RT :
  - Mesure temps réel de la RL : estimation du débit de dose (*i.e.* dose cumulée),
  - Mesure de l'OSL après traitement : estimation de la dose absorbée
- ✓ Démonstration de faisabilité avec 4 capteurs OSL (TLD<sub>500</sub>)
- ✓ Tests avec des faisceaux de photons et d'électrons

## Résultats

- Dosimétrie OSL performante pour la RT,
- Nécessité d'une prédose (250 Gy) pour stabiliser la réponse OSL des capteurs,
- Durée de lecture OSL ~ 20 s par capteur (améliorable),
- Minimum détectable en dose ~ mGy,
- Dynamique de mesure > 3 ordres de grandeur (saturation ~ 15 Gy),
- Courbe de réponse du second-degré (TLD<sub>500</sub>) : résolution aisée, pas d'impact sur la précision,
- Pas de dépendance en énergie avec des faisceaux d'électrons (étalonnage en photons : 2008),
- Faible dépendance en température surtout si stimulation OSL à température C<sup>ste</sup>,
- Faible perte d'information (*fading*) : ~ -1% par décade en temps : protocole reproductible,
- Pas d'effet transitoire : possibilité de lecture OSL immédiate après irradiation,
- Excellente tenue des capteurs dans le temps,
- Excellent comportement général de l'instrumentation (facilité d'emploi, CEM vs linac),
- Procédures de sécurité/auto-tests testées en laboratoire (sécurité oculaire, chaîne de mesure),

## Développements futurs

- Amélioration de la répétabilité (MAESTRO : 0,5 % demandé),
- Finalisation du logiciel de contrôle,
- Tests de nouveaux capteurs OSL (cristaux Landauer, PGTI) : réponse en dose, etc,
- Etude de cathéters dosimétriques pour la dosimétrie *in vivo* en intracavitaire,
- Réduction du temps de lecture OSL (accroissement de la puissance laser),
- Finalisation des tests en cond. précliniques (IGR) et bilan de conformité aux spécif. médicales,
- Tests en conditions cliniques dans différents hôpitaux (MAESTRO),
- Optimisation du coût en vue d'une industrialisation.

## Médecine

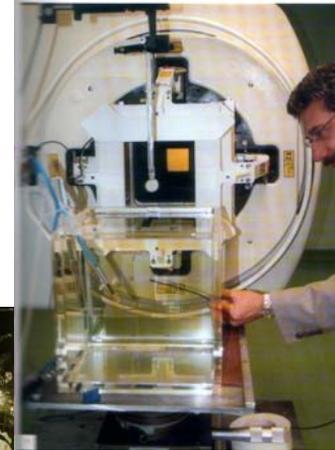
Dosimétrie *in-vivo* pour les RT, RCM, ICT  
 Radiothérapie avec photons, électrons et protons/ions  
 Curiethérapie, Radiologie, Estimation de doses internes patient



MAESTRO Project (Photos IGR)

## RadioProtection (RP)

Fantômes anthropomorphes, ...  
 Suivi du personnel ou d'installations nucléaires (capteurs permanents)



(Photo CEA)

## Industrie nucléaire

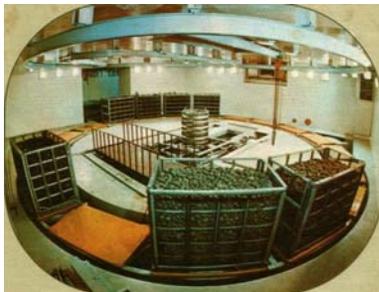
Assainissement avant démantèlement d'installations nucléaires ...  
 Suivi réacteur et sécurité (SNLE, centrales nucléaires),  
 Suivi de sites de stockage, de rejets, ...



(Photo AREVA NC)

## Contrôles de procédés industriels

Irradiation alimentaire,  
 Polymérisation *in-situ* de matériaux composites,  
 Analyse de densités, ...



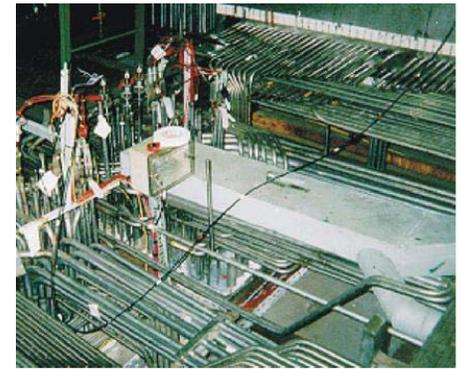
(Photo IAEA)



(Photo EDF)



(Photo ANDRA)



(Photo G. Imbard (APM, CEA-Marcoule))

# Merci pour votre attention

Ce travail a été réalisé en collaboration avec l'IGR et le CEA LIST (LNHB)  
dans le cadre du projet européen FP6-MAESTRO CE503564  
(*Methods and **A**dvanced **E**quipments for **S**imulation and **T**reatments in **R**adio **O**ncology*)  
avec l'aide de la Communauté Européenne

et dans le cadre du projet CODOFER  
(**C**apteurs **O**SL pour la **D**Osimétrie des **F**aisceaux d'**E**lectrons en **R**adiothérapie)  
financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-TECSAN).

*[www.maestro-research.org](http://www.maestro-research.org)*