



**HAL**  
open science

## Quand l'instrumentation de mesure déportée œuvre à l'amélioration de la surveillance du bâtiment réacteur des centrales nucléaires en cas d'accident grave

Pierre Ferdinand, Frédéric Pouillé, Bertrand Ricque, Jean-Michel Bourbotte, Hassen Hamrita, Vladimir Kondrasovs, Hamid Makil, Laurent Maurin, Stéphane Rougeault, Guy Cheymol, et al.

### ► To cite this version:

Pierre Ferdinand, Frédéric Pouillé, Bertrand Ricque, Jean-Michel Bourbotte, Hassen Hamrita, et al.. Quand l'instrumentation de mesure déportée œuvre à l'amélioration de la surveillance du bâtiment réacteur des centrales nucléaires en cas d'accident grave. *Instrumentation, Mesure, Métrologie*, 2017, 16 (1-4), pp.183-211. 10.3166/i2m.16.1-4.183-211 . hal-01878948

**HAL Id: hal-01878948**

**<https://hal.science/hal-01878948v1>**

Submitted on 20 Dec 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

# Quand l'instrumentation de mesure déportée œuvre à l'amélioration de la surveillance du bâtiment réacteur des centrales nucléaires en cas d'accident grave

<sup>1</sup>P. Ferdinand, <sup>1</sup>F. Pouillé, <sup>1</sup>B. Ricque, <sup>2</sup>H. Makil, <sup>2</sup>L. Maurin, <sup>3</sup>G. Cheymol, <sup>3</sup>F. Damian, <sup>3</sup>D. Duval, <sup>3</sup>J-C. Jaboulay, <sup>3</sup>H. Maskrot, <sup>3</sup>P. Le Tutour, <sup>4</sup>L. Barbot, <sup>4</sup>J-F. Haquet, <sup>4</sup>Ch. Journeau, <sup>4</sup>Q. Souquet, <sup>4</sup>J-F. Villard, <sup>5</sup>M. Brovchenko, <sup>5</sup>I. Duhamel, <sup>6</sup>G. Musoyan, <sup>7</sup>S. Fourrez, <sup>7</sup>G. Helleux, <sup>7</sup>L. Pichon, et <sup>8</sup>Y. Ouerdane

1. LMP S.A.  
49-51 rue du Moulin des Prés, 75013 Paris, France.  
[p-ferdinand-lmpsa@sfr.fr](mailto:p-ferdinand-lmpsa@sfr.fr)
2. CEA, LIST, F-91191 Gif-sur-Yvette, France.  
[laurent.maurin@cea.fr](mailto:laurent.maurin@cea.fr)
3. CEA, DEN, F-91191 Gif-sur-Yvette, France.  
[hicham.maskrot@cea.fr](mailto:hicham.maskrot@cea.fr)
4. CEA, DEN, F-13108 Saint Paul-lez-Durance, France.  
[christophe.journeau@cea.fr](mailto:christophe.journeau@cea.fr) ; [jean-francois.villard@cea.fr](mailto:jean-francois.villard@cea.fr)
5. Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN)  
92262 Fontenay-aux-Roses, France.  
[Isabelle.duhamel@irsn.fr](mailto:Isabelle.duhamel@irsn.fr)
6. AREVA  
1 place Jean Millier, 92084 Paris-La Défense cedex, France.  
[grigor.musoyan@areva.com](mailto:grigor.musoyan@areva.com)
7. THERMOCOAX  
BP 26, Lieu-dit Planquivon, 61430 Athis-de-l'Orne, France.  
[laurent.pichon@thermocoax.com](mailto:laurent.pichon@thermocoax.com)
8. Université Jean Monnet  
Laboratoire Hubert Curien, 42000 Saint-Étienne, France.  
[ouerdane@univ-st-etienne.fr](mailto:ouerdane@univ-st-etienne.fr)

*RESUME.*

*Cet article présente les travaux du projet DISCOMS, initié après Fukushima, et dédié à la surveillance du corium en cas d'Accident Grave avec percement de la cuve du réacteur. Après établissement des objectifs et identification des localisations possibles pour les capteurs, la modélisation des rayonnements a été menée pour deux générations de réacteurs (le parc en exploitation 'Gen2', et 'Gen3' soit le réacteur EPR), tant en fonctionnement normal qu'en AG. Eu égard aux conditions extrêmes de l'interaction corium-béton, une modélisation thermique à diverses profondeurs du radier a été réalisée, afin d'optimiser l'enfouissement des capteurs. Ceci a permis la conception des Collectrons et le choix des fibres optiques monomodes à même de résister à la température et à la dose pendant les 60 ans de fonctionnement, suivis d'un AG. Grâce à des tests en irradiateur, plusieurs fibres optiques présentant une faible atténuation induite ont été qualifiées pour leur mise en câble. Celles-ci seront interrogeables par plusieurs instruments (OTDR, DTS, BOTDA, OFDR), dont les performances ont été établies. Pour les Collectrons, les études ont montré que l'AG était détectable via la mesure de leur courant auto-généré. S'en suivit le développement d'une électronique multivoie à bas niveau de courant, et d'une perche mixte collectrons-thermocouple, de grande longueur, contenant un premier Collectron Rhodium pour flux neutronique (fonctionnement normal), un second de type Platine pour les neutrons et  $\gamma$  (Accident Grave), et un thermocouple de type K. Le projet va se poursuivre, jusqu'à la validation globale, et in fine par un essai 'Vulcano' de coulée de corium sur une dalle de béton. Une fois la faisabilité assurée, le déploiement de cette solution innovante pourrait être envisagé.*

*ABSTRACT.*

*This paper deals with the post-Fukushima DISCOMS project dedicated to corium monitoring in case of Severe Accident with reactor vessel failure. After listing the objectives and identifying sensors' locations, a radiative modeling was carried out for two generations of reactors ('Gen2' and 'Gen3'), both in normal and accidental situations. Due to extreme conditions during the corium-concrete interaction, a thermal modeling at various depths of the concrete was carried out, to optimize the sensors' embedment. This led to the SPND design as well as the selection of single-mode optical fibers, which will be able to withstand temperature and dose during 60 years of operation, plus the accident. Several fibers exhibiting a low Radiation Induced Attenuation have been qualified after irradiation tests. These fibers will be remotely sensed by several instruments (OTDR, DTS, BOTDA, OFDR), whose performances have been determined. SPND studies have shown that onset accident may be detectable. Hence, a low-current multi-channel electronics as well as a long SPND-thermocouple cane have been developed. This cane includes a Rhodium Collectron dedicated to neutron flux (normal operation), one Platinum type for neutrons and  $\gamma$  (Severe Accident), plus a type K thermocouple. The project will continue, up to its validation, and will end with a 'Vulcano' test of corium casting on a concrete slab. Once the feasibility assessed, the deployment of this innovative solution may be considered.*

*Mots-clés : Sûreté, Accident Grave, Corium, Radier, Surveillance, Capteur à Fibres Optiques, Collectron, Mesures réparties, Instrumentation déportée, Fonctionnement sans électricité.*

*KEYWORDS: Nuclear safety, Severe accident, Corium, Basemat, Monitoring, Optical Fiber Sensors, Self Powered Neutron Detector, Distributed sensing, Remote measurement, Power supply free.*

---

DOI:10.3166/RCMA.25.1-n © 2016 Lavoisier AR\_DOI

## 1. Introduction

Tout comme le 11 septembre 2001 restera à jamais gravé dans nos mémoires, personne n'oubliera jamais le drame humain, industriel et écologique conséquent au séisme sous-marin de magnitude 8,9 qui, le 11 mars 2011, généra un gigantesque tsunami de plus de 10 m sur la côte Est du Japon, submergeant la région de Sendai et le site nucléaire de Fukushima Dai Ichi<sup>1</sup>, en détruisant quatre de ses six réacteurs. Trois d'entre eux entrèrent en fusion et des explosions dues à l'hydrogène eurent lieu dans trois des bâtiments réacteurs. Cet accident nucléaire majeur fut classé -tout comme Tchernobyl en 1986- au niveau maximum « 7 » de l'échelle INES (ASN, 2013).

Du fait du tsunami, excédant celui retenu pour la conception des installations, l'arrivée massive d'eau eut rapidement comme conséquence la perte des fonctions support (alimentations électriques du site, stations de pompage, etc.), et les fonctions de sûreté furent défailtantes en particulier au niveau du refroidissement des cœurs, par les moyens prévus. L'opérateur TEPCO devint totalement aveugle lors de l'évolution de l'accident, qu'il géra dès lors avec des moyens de fortune (Guarnieri, 2015 ; 2016).

Cette catastrophe nucléaire majeure a montré que l'impératif de sûreté doit toujours prévaloir<sup>2</sup>. Aussi dans l'hexagone l'OPECST (Sénat, 2017) à savoir l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques lança, dès mai 2011, un groupe de travail sur la sécurité nucléaire et l'avenir de cette filière, permettant de dégager des pistes prometteuses, comme celles pouvant être apportées par des capteurs de mesure interrogeables à distance, dont les Capteurs à Fibres Optiques (CFO), (Birraux, 2011, 115 ; Ferdinand, 1989 ; 1990 ; 1998 ; 2011 ; 2013).

Dans le cadre qui suivit de "Recherche en matière de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection" (RSNR), financé par le Plan d'Investissement d'Avenir (PIA) et opéré par l'ANR, le CEA LIST fort de son expertise en instrumentation, par l'intermédiaire d'une collaboration avec des partenaires industriels et plusieurs laboratoires de recherche, a donc initié et coordonne désormais le projet DISCOMS (*DIstributed Sensing for COrium Monitoring and Safety*), (ANR, 2012). Son consortium adresse le développement de nouvelles techniques de surveillance déportée depuis l'îlot nucléaire pour améliorer la sûreté des tranches, tant en service (REP de

---

<sup>1</sup> Cette centrale est située face au Pacifique, sur le territoire des bourgs d'Okuma (tranches 1 à 4) et de Futaba (tranches 5 et 6) de la Préfecture de Fukushima, à 250 km au nord de Tokyo.

<sup>2</sup> La sûreté nucléaire définit l'ensemble des activités ayant trait au maintien de l'intégrité des mécanismes, processus, outils ou instruments contenant de la matière radioactive, afin de garantir l'absence d'effets dommageables sur les individus et l'environnement (Bordes, 2015).

Génération 2) que pour le réacteur EPR<sup>3</sup> (REP de Génération 3), et les autres modèles qui suivront, (Ferdinand, 2015).

Les technologies de mesure mises en œuvre sont fondées, d'une part sur les phénomènes de rétrodiffusion dans la silice constituant les fibres (Raman, Brillouin et Rayleigh), à savoir les Capteurs à Fibres Optiques répartis et, d'autre part, sur les Collectrons<sup>4</sup> innovants de « grandes longueurs » avec thermocouple intégré. Entièrement passifs, ces capteurs ne nécessitant pas d'alimentation électrique locale - ce qui manqua cruellement à Fukushima- pourront donc être interrogés à distance, depuis une zone protégée, tant pour les instruments de mesure que pour les équipes de gestion de la crise.

L'approche technique a pour finalité la surveillance du corium<sup>5</sup> et la sécurité, et pour principaux objectifs en ce qui concerne la 3<sup>ème</sup> barrière de confinement : 1) la détection de la percée éventuelle de la cuve du réacteur, 2) la détection du percement progressif du radier par Interaction Corium-Béton, 3) et la surveillance à long terme du refroidissement du corium une fois celui-ci déversé sous le réacteur, et dans la chambre d'étalement (dispositif de sûreté supplémentaire, présent dans le bâtiment réacteur EPR).

Du point de vue de la sûreté, les avantages apportés sont multiples : plus besoin d'alimentation électrique locale, déport à une distance suffisante, redondance (plusieurs fibres et câbles de déport cheminant par différents trajets), apport à la diversification (aucun mode commun de défaillance avec d'autres technologies), etc. *De facto*, de tels capteurs, judicieusement déployés au sein de certaines structures de l'enceinte de confinement (*e.g.* radier du Bâtiment Réacteur), permettront de renforcer la surveillance, continue ou à la demande, en fonctionnement normal mais aussi - et surtout - en cas de situation accidentelle puis post-accidentelle, et ceci de manière plus fiable qu'avec des thermocouples disposés sous la cuve et risquant d'être détruits dès la chute du corium.

Ce projet d'une durée de 5 ans, démarré en janvier 2014, regroupe une dizaine de Laboratoires publics et d'industriels actifs dans les domaines concernés. Depuis son lancement, nombre d'avancées très encourageantes ont été réalisées, après que la définition des objectifs industriels ait été établie, à savoir :

---

<sup>3</sup> D'une puissance de 1650 MW, le réacteur pressurisé européen, EPR (initialement *European Pressurized Reactor*, puis *Evolutionary Power Reactor*), est un réacteur de 3<sup>ème</sup> génération, conçu et développé par Areva NP. Il fait partie de la filière des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP) constituant le parc français, issus de la francisation des réacteurs *PWR* de Westinghouse.

<sup>4</sup> Les Collectrons (ou *Self Powered Neutron Detector ; SPND*) sont des détecteurs de rayonnement à courant auto-généré.

<sup>5</sup> *Corium* : formé de *core* (cœur du réacteur) et du suffixe *ium* des éléments radioactifs. Magma résultant de la fusion du cœur (combustible, assemblages) et des matériaux qu'il rencontre.

- la modélisation radiative ( $\gamma$  et neutrons) autour et sous le réacteur, ainsi que dans le béton du radier, en fonctionnement normal puis en cas d'Accident Grave (AG), tant pour les réacteurs en exploitation (Gen2) que pour le réacteur EPR (Gen3) ;
- la modélisation de la thermique, et de sa cinétique, au sein du béton du radier, de l'Interaction Corium-Béton (ICB) en cas de percement de la cuve du réacteur ;
- la sélection, puis la validation après irradiation, de fibres optiques monomodes pouvant résister aux rayonnements ionisants pendant toute la durée d'exploitation de la centrale, ainsi qu'à un AG en fin de vie ;
- la définition et les premières mises en œuvre des instruments de mesure déportée ;
- la modélisation, la conception et le prototypage de nouveaux Collectrons (*ex-core*<sup>6</sup>), de grandes longueurs, et de leur électronique bas-niveau de courant, pour discriminer le fonctionnement normal de l'accident grâce à la mesure du courant généré par les rayonnements ionisants émis.

Ces différentes avancées, ainsi que la description des travaux et essais restant à mener pour valider ce nouveau concept de surveillance font l'objet des paragraphes suivants.

## 2. Contexte, objectifs et cahier des charges du projet

### 2.1. Rappel concernant les Accidents Graves

Un Accident Grave sur un réacteur à eau pressurisée, ou bouillante, se définit comme une séquence accidentelle entraînant la fusion partielle ou totale du cœur (AIEA, 2002). Les grandes phases d'un AG sont : *i*) échauffement rapide du cœur accompagné de l'oxydation des gaines de combustible, *ii*) dégradation importante du combustible et des structures du cœur, *iii*) la rupture de la cuve du réacteur, et enfin *iv*) une évolution de l'AG après le percement de la cuve (phase dite « hors cuve »).

### 2.2. Objectifs fonctionnels de la surveillance du corium et spécifications des capteurs

Dans un premier temps, en cas d'AG, il sera utile de connaître l'état de dégradation du cœur et de pouvoir suivre la formation du corium. Dans la mesure du possible, il serait aussi intéressant de s'assurer de la présence d'eau à l'intérieur de la cuve, voire de mesurer son niveau, même approximativement. Si la dégradation du cœur se poursuit, le corium se relocalise au fond de la cuve puis, à terme, conduit à son percement. Les informations qu'il sera alors utile de connaître pendant cette phase de l'AG sont la surveillance de l'arrivée du corium en fond de cuve, la quantité du corium relocalisé, et enfin la détection de la rupture de la cuve.

---

<sup>6</sup> *Ex-core* : signifie « hors de la cuve » du réacteur nucléaire, *a contrario* de *in-core*.

Après la rupture de cette dernière, le corium s'accumule au-fur et à mesure dans le puits de cuve. La quantité de corium recueillie dans le puits de cuve, la température atteinte par le bain de corium, la quantité de béton sacrificiel érodé et la cinétique d'érosion sont des paramètres intéressants à suivre.

Pour la suite du déroulement de l'AG (phase « hors cuve »), les objectifs peuvent devenir spécifiques. En effet, ils dépendent des moyens mis en place pour la mitigation du percement du radier du Bâtiment Réacteur. Ces moyens varient selon la génération du réacteur (*e.g.* présence ou non d'un récupérateur du corium) mais aussi selon le type du récupérateur du corium, qui dépend de la conception pour un réacteur de génération 3. Dans le cas d'un réacteur de type EPR ou ATMEA, la récupération du corium dans le puits de cuve est temporaire. Le but de l'instrumentation DISCOMS serait alors de suivre l'évolution du corium lors de cette phase temporaire jusqu'à l'ouverture de la trappe fusible, puis son évacuation, *via* le canal de décharge, vers la chambre d'étalement où il s'étale puis refroidit sur le long terme (figure 1, droite).

Vis-à-vis du risque de percement du radier à proprement parler, une éventuelle ablation du béton pourrait être détectée par le biais de nappes de CFO ou de couches de collectrons, positionnées à diverses profondeurs dans le béton du radier. Dans la mesure où plus le corium s'enfonce dans le radier, moins l'ablation est rapide (cf. § 3.1), il serait intéressant de placer les nappes de manière plus rapprochées dans la partie inférieure du radier, comparée à sa partie supérieure. Concernant la répartition horizontale des capteurs, un maillage avec un pas de l'ordre du mètre semble être un bon compromis entre l'objectif de détecter une ablation localisée du béton et la contrainte liée à la quantité des capteurs à installer (leur nombre pour les collectrons, leur longueur pour les CFO). Tout naturellement, la conception du câblage doit être réalisée de façon à ce que le profil d'ablation n'entraîne pas des ruptures de câbles/fibres pouvant faire croire à une rupture en un point de mesure alors que le signal a été perdu suite à sa destruction à un autre endroit.

### 2.3. Implantations prévisionnelles des capteurs de surveillance du corium

En lien avec ces objectifs fonctionnels, une proposition de positionnement des capteurs est schématisée en figure 1, par de petits cercles. Ces schémas de positionnement sont uniquement utilisés pour la R&D dans le cadre DISCOMS, et ne représentent pas un cas d'application sur un réacteur en exploitation ou futur.

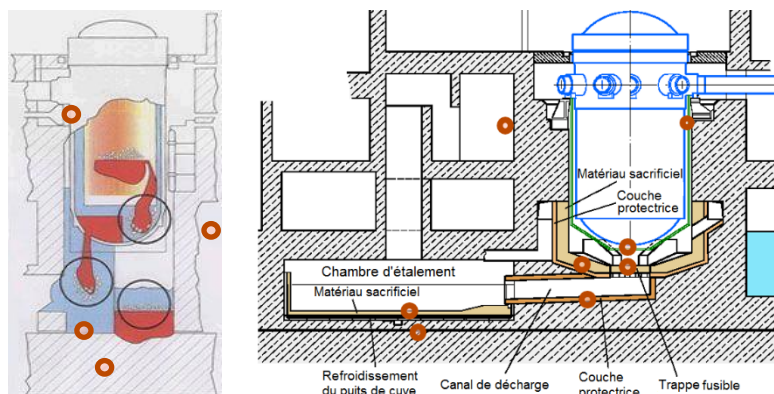


Figure 1 : Possibles positionnements des capteurs (CFO et collectrons) pour un réacteur de génération 2 (à gauche) et un de génération 3 de type EPR (à droite).

### 3. Modélisations dans le puits de cuve en cas d'Accident Grave avec percement de la cuve du réacteur

#### 3.1. Modélisation thermique au sein du radier

L'ablation du béton du radier a été modélisée par le CEA DEN LPMA à l'aide du code TOLBIAC-ICB (Spindler, 2006). En fonction des scénarios (*e.g.* le délai entre l'arrêt d'urgence et le percement de la cuve, qui définit la puissance résiduelle initiale) et de la nature du béton utilisé, diverses vitesses d'ablation sont à considérer. Elles sont en moyenne de 2 cm/h à 20 cm/h (Bentaïb, 2013). Pour l'analyse des phénomènes, on peut définir une pseudo-vitesse de diffusion de la chaleur égale à la vitesse moyenne à laquelle une isotherme se propage sur une profondeur  $\delta$  de béton, comme le rapport entre la diffusivité thermique  $\alpha$  et cette profondeur :

$$v_{diffusion} \sim \alpha/\delta$$

Du fait de la faible conductivité thermique du béton, allant de  $3.10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s à  $9.10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s (Eu Committee, 1992), la pseudo-vitesse de propagation du front de chaleur à 15 cm est de l'ordre de 1 cm/h (figure 2) et est donc inférieure à la vitesse d'ablation. De ce fait, un capteur de température noyé dans le béton ne percevra pas d'échauffement significatif avant que le front d'ablation ne soit à quelques décimètres de sa position.

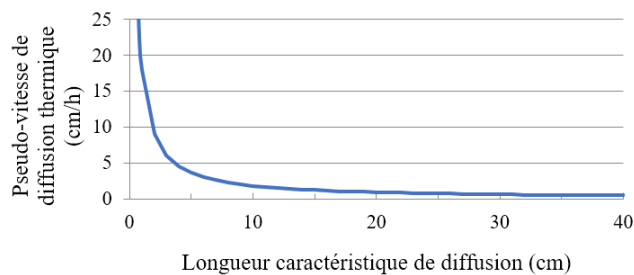


Figure 2 : Pseudo-vitesse de diffusion thermique.



De ce fait, les évolutions de température mesurées lors d'essais d'interaction corium-béton à échelle réduite (~ 15 cm d'épaisseur de béton) auront la même allure que celles qui seraient mesurées à échelle 1 (plusieurs m de béton). Nous avons donc pu définir les températures que subira un capteur enfoui à partir des thermogrammes expérimentaux (figure 3), issus des essais VULCANO du CEA à Cadarache (Bouyer, 2015).

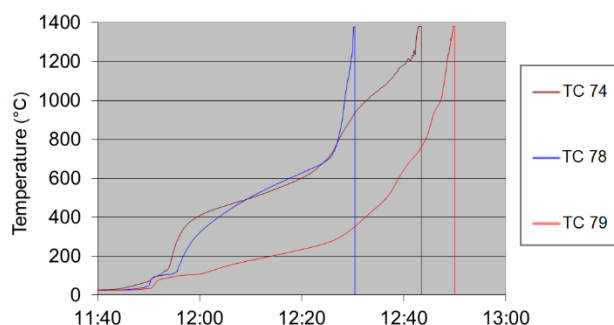


Figure 3 : Evolution de la température de 3 thermocouples (réf. TC 74, 78 et 79) situés entre 7 et 10 cm en sub-surface du béton, et atteint par le corium lors de l'essai VULCANO VB-U7 (Sevón, 2013).

### 3.2. Modélisation radiative en fonctionnement normal du réacteur

Pour spécifier les fibres optiques et dimensionner les collecteurs, il convient de quantifier le rayonnement (neutron et  $\gamma$ ) qu'ils subiront non seulement lors de l'accident mais également pendant toute la durée de fonctionnement du réacteur. Pour les fibres, il s'agit de vérifier qu'elles seront toujours opérationnelles pour détecter un éventuel accident, après 60 ans de fonctionnement de la tranche. Les grandeurs recherchées sont alors le kerma (*Kinetic Energy Released per unit MA*ss)  $\gamma$  dans l'air et la fluence des neutrons.

Pour les collecteurs, il s'agit de pouvoir discriminer les signaux obtenus en fonctionnement normal de ceux mesurés lors des différentes phases de l'accident. Pour cela, le flux et le spectre des neutrons et des photons  $\gamma$  doivent être évalués. L'IRSN a donc modélisé un réacteur REP de 2<sup>ème</sup> génération (900 MWe Tihange-1 en Belgique, proche d'un REP français, dont les données sont publiques) et autre de 3<sup>ème</sup> génération (réacteur EPR ; données AREVA) avec le code MCNP (Goorley, 2013). Ce code permet de simuler le transport de particules (neutrons et  $\gamma$ ) dans la matière afin de déterminer les flux correspondant aux différentes positions envisageables pour les capteurs. Le rayonnement a été évalué sur le côté de la cuve (à 15 cm), sous celle-ci, ainsi qu'à différentes profondeurs dans le béton du puits de cuve (figure 4).

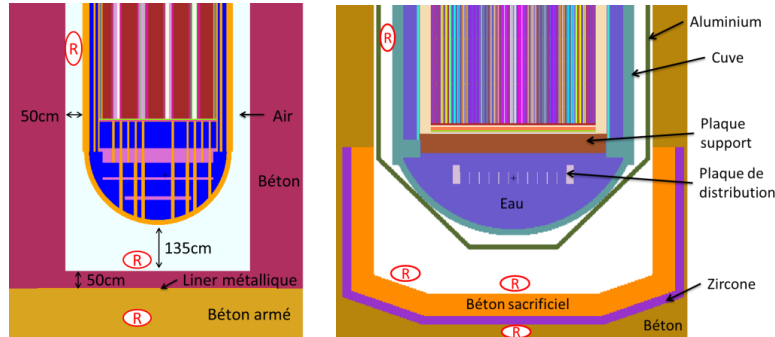


Figure 4 : Modélisation du réacteur Gen2 à gauche et du réacteur EPR à droite. La lettre 'R' indiquant les positions des réponses recherchées.

En fonctionnement normal, la source de particules retenue dans cette étude est uniquement basée sur les neutrons issus de fissions car l'irradiation  $\gamma$  est fortement couplée au flux de neutrons, qui, par interaction nucléaire produit des  $\gamma$  dans le puits de cuve, la cuve et les autres structures. La première étape de l'étude, détaillée dans (Brovchenko, 2016), consiste à déterminer la distribution énergétique et spatiale des sites de fission dans le réacteur à l'instant. L'état du réacteur REP Gen2 considéré dans cette étude correspond au cœur de démarrage. Cette configuration maximise le rayonnement à l'extérieur de la cuve. La fluence des neutrons rapides ( $E_n > 1 \text{ MeV}$ ) après 60 ans de fonctionnement varie entre  $4 \cdot 10^{18} \text{ n/cm}^2$  et  $1 \cdot 10^{12} \text{ n/cm}^2$  selon la position, en supposant un flux constant sur toute la durée.

En ce qui concerne l'irradiation de neutrons dans le réacteur EPR, pour laquelle le cœur du réacteur considéré correspond au début d'un cycle à l'équilibre, la fluence reçue après 60 ans pour les neutrons rapides varie de  $7 \cdot 10^{17} \text{ n/cm}^2$  à  $1 \cdot 10^{12} \text{ n/cm}^2$  selon la localisation. La figure 5 présente l'atténuation de la fluence des neutrons rapides en fonction de la profondeur dans le béton du puits de cuve pour les deux générations.

Pour le REP Gen2, le kerma  $\gamma$  reçu après 60 ans atteint  $4 \text{ MGy}^7$  en surface du puits de cuve et  $7 \text{ kGy}$  sous 1 m de béton. Pour le réacteur EPR, le kerma  $\gamma$  varie entre  $660 \text{ kGy}$  en surface du béton sacrificiel et descend à  $260 \text{ Gy}$  derrière la couche de zircon. Les spectres énergétiques de neutrons et de photons  $\gamma$  ont été déterminés pour les différentes positions envisagées pour les collecteurs. Précisons que pour quantifier le rayonnement reçu lors du fonctionnement du réacteur, de nombreuses approximations et hypothèses ont été considérées, entachant les résultats d'une importante incertitude, mais indiquant les ordres de grandeur de flux et de kerma.

<sup>7</sup> Un Gray (Gy) est la dose absorbée par une masse de 1 kg, soumise à un rayonnement de 1J.

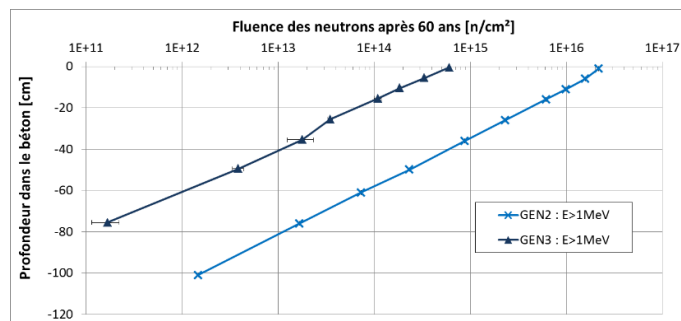


Figure 5 : Atténuation de la fluence [ $n/cm^2$ ] des neutrons rapides d'énergie  $> 1$  MeV, dans le puits de cuve du réacteur EPR (Gen3) et du REP Gen2, après 60 ans.

### 3.3. Modélisation radiative en cas d'Accident Grave avec percement de la cuve

La modélisation en AG des réacteurs actuels (Gen2) a été réalisée par le CEA DEN/DM2S/SERMA. La configuration étudiée concerne le corium (sous forme homogène : mélange de 80 tonnes d' $UO_2$ , 20 tonnes de  $ZrO_2$  et 10 tonnes d'acier) au fond du puits de cuve. La modélisation du radier est identique au cas du fonctionnement normal. Les grandeurs étudiées sont le spectre de photon  $\gamma$ , données d'entrées pour les collecteurs à la surface du radier et le kerma représentatif de l'endommagement des fibres optiques à différentes profondeurs dans le béton du radier. Les calculs de transport de photons (la contribution des neutrons en AG est négligeable car, le corium étant sous-critique, les sources de neutrons [fissions spontanées et réactions « alpha-n »] sont de 9 à 10 ordres de grandeurs inférieures à celles des photons) ont été réalisés à l'aide du code TRIPOLI-4<sup>®</sup>, un code de type Monte Carlo dédié à la résolution en 3 D de l'équation de Boltzmann linéaire pour les  $\gamma$  et les neutrons (TRIPOLI-4<sup>®</sup> Project Team, 2015). La détermination des sources de photons a ici été établie avec le formulaire DARWIN [Tsilanzara, 2010]. Différentes gestions des combustibles représentatives des réacteurs Gen2, ont été étudiées (Parité MOX pour le palier CPY de 900 MWe et GEMME pour P4-P'4 de 1300 MWe) ainsi que plusieurs hypothèses : masse volumique du corium, prise en compte des produits de fission volatiles et nature du béton du radier.

L'AG dans le cas du réacteur EPR a été modélisé par l'IRSN avec le code MCNP [Goorley, 2013] en considérant les différentes étapes de l'AG. Le corium a ainsi été modélisé dans la cuve, sur le puits de cuve (figure 6 - gauche) et dans la chambre d'étalement (figure 6 - droite). La composition du corium homogène est ici caractérisée par le temps écoulé après l'arrêt de la réaction en chaîne (3 h et 49 h), la présence des matières fondues (selon la localisation du corium) et le relâchement ou non des Produits de Fission (PF) volatiles et semi-volatiles dans le corium. Pour chaque situation, la composition du corium a été calculée, de même que la sensibilité des résultats à ces paramètres. Ainsi, l'étude de l'impact du temps écoulé depuis l'arrêt

de la réaction conduit à une baisse de 30 % les valeurs de kerma, tandis que le non-relâchement des PF les accroît de 35 %.

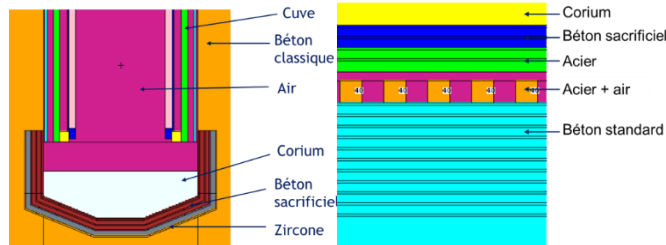


Figure 6 : Modélisation du corium en puits de cuve de l'EPR (gauche), et extrait de la coupe verticale de la modélisation de la chambre d'étalement du réacteur EPR (droite).

La figure 7 synthétise les résultats dans le cas de référence (formation du corium en fin de cycle, relocalisation en fond de puits de cuve 3 h après l'arrêt d'urgence, les produits de fission volatiles sont retirés des sources) pour le REP de génération 2 et le réacteur EPR. Pour le REP, la gestion GEMMES (UO<sub>2</sub>) est choisie pour le calcul des sources de photons. Dans ce cas, le kerma photons reçu en 24 h est d'environ 2 MGy en surface du radier, et la décroissance en profondeur d'un facteur ~ 10 pour 15 cm d'enfouissement. Les études de sensibilité aux hypothèses retenues montrent qu'il est raisonnable de considérer de larges barres d'incertitude, ± 30 % voire ± 40 %, dans le premier 0,5 m du radier et jusqu'à un facteur 2 pour des profondeurs plus importantes.

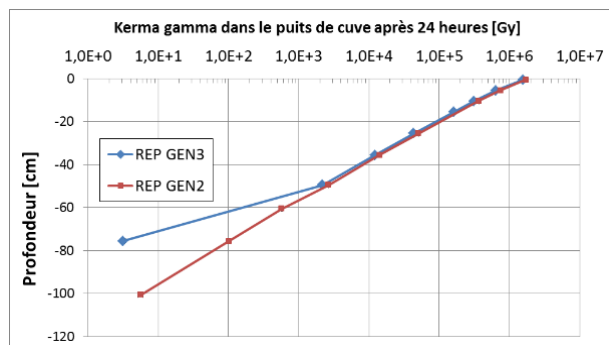


Figure 7 : Atténuation du kerma gamma en accident grave dans le puits de cuve pour la modélisation de REP Gen2 et de l'EPR (Gen3).

La figure 7 indique que pour un cas de référence reposant sur des hypothèses similaires pour le corium du REP Gen2 et celui du réacteur EPR, les valeurs de kerma

sont pratiquement identiques. La différence observée à partir de 50 cm de profondeur de béton est due aux structures et compositions différentes des deux puits de cuve étudiés. Enfin, tant pour un REP de 2<sup>ème</sup> que de 3<sup>ème</sup> génération, c'est l'irradiation en fonctionnement normal (60 ans) qui détermine l'endommagement des capteurs.

#### 4. Instrumentations et capteurs de mesure

##### 4.1. Principes et modélisation des collectrons et de leur électronique

Les Collectrons (figure 8) sont des détecteurs nucléaires sensibles aux rayonnements neutroniques et photoniques. Leur fonctionnement repose sur la collection d'électrons créés dans les matériaux du détecteur suite aux interactions des rayonnements dans la matière. Les mouvements de ces électrons génèrent un signal électrique mesurable.

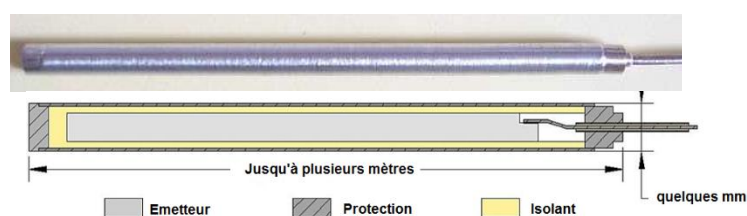


Figure 8 : Image et schéma en coupe du principe d'un Collectron.

Dès lors qu'un Collectron est introduit dans un champ mixte neutrons /  $\gamma$ , le courant délivré résulte de la somme de courants issus de réactions, ou combinaisons de réactions, complexes. Le Laboratoire de Dosimétrie, Capteurs et Instrumentation (LDCI) du CEA Cadarache a développé l'outil numérique MATiSSe (*Monte Carlo Tool for Simulations of SPND*) qui permet de calculer le courant délivré par un Collectron dans des conditions d'irradiation données (figure 9). Cet outil est particulièrement approprié pour optimiser la conception des Collectrons, et l'interprétation des mesures. MATiSSe repose sur un formulaire de calculs Monte Carlo qui prend en compte toutes les sources d'électrons libres dans les matériaux du détecteur, et calcule tant leur transport que leur dépôt dans les différents composants du Collectron. Précédemment, le LDCI avait mené plusieurs campagnes expérimentales de validation de cet outil à l'aide de Collectrons rhodium, cobalt et argent, dans différents réacteurs de recherche : le TRIGA Mark II du Jožef Stefan Institute (JSI) en Slovénie, le réacteur OSIRIS du CEA Saclay, et le réacteur MARIA du *National Centre for Nuclear Research* (NCBJ) en Pologne (Barbot, 2015-2016).

Dans le cadre du projet DISCOMS, MATiSSe a permis d'évaluer les performances attendues pour deux types de Collectrons, ceux à émetteur en

Rhodium et ceux en Platine (cf. § 4.2), et ceci pour plusieurs positionnements et différentes phases accidentelles. Les résultats montrent que certains positionnements permettent de suivre, en cas d'AG, la progression du corium vers le radier du réacteur.

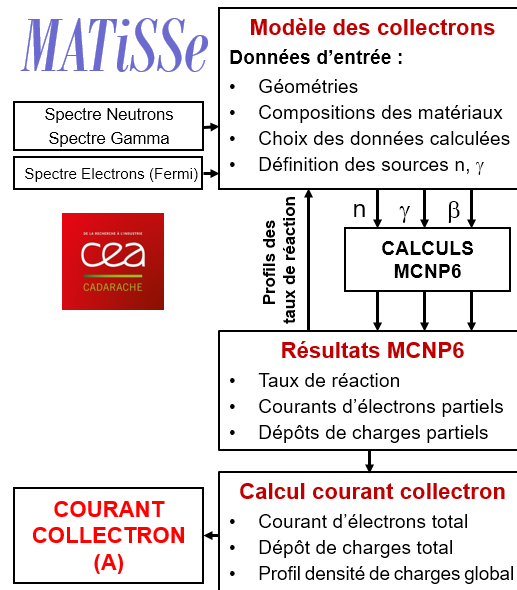


Figure 9 : Logigramme de l'outil MATiSSe de simulation du courant des Collectrons.

L'interprétation des signaux générés par les collectrons présente un défi technique du fait de leur faible réponse en courant (quelques pA). De fait, la mesure de si faibles niveaux de courant nécessite le développement d'une électronique robuste, fiable et susceptible d'évaluer le bon fonctionnement du système pour éviter tout artefact dû à l'environnement.

Pour répondre au cahier des charges, aux résultats de la simulation décrite ci-dessus, et à la technologie de la perche réalisée (cf. § 4.2), le Laboratoire des Capteurs et Architectures Electroniques (LCAE) du CEA LIST à Saclay a donc développé une électronique d'acquisition présentant les caractéristiques suivantes :

- massivement multivoies et autonomes (intégrant des sources d'énergie disponibles en cas de perte totale d'alimentation électrique externe),
- dont chaque chaîne de mesure intègre une électronique déportée (200 m),
- dont le contrôle de l'intégrité du câble de déport est réalisé par réflectométrie.

La limite basse du courant a été fixée à 1 pA, suite à une analyse approfondie de l'état de l'art de ce type d'électronique d'acquisition. La figure 10 ci-dessous illustre une représentation schématique du montage électronique mis au point pour couvrir l'intervalle de mesure attendu [1 pA ; 100 nA], (Hamrita, 2016). La figure 11 illustre la réponse de l'électronique à un signal délivré par un collectron Rhodium sous irradiation neutronique, réalisée par paliers avec l'accélérateur SAPHIR (Système d'Activation Photonique et d'Irradiation) du LCAE (Sari, 2014). Ce résultat prouve la bonne stabilité de cette électronique pour la mesure du bas niveau de courant issu d'un Collectron.

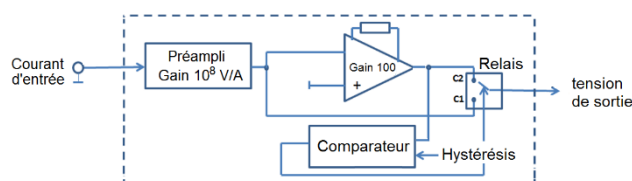


Figure 10 : Schéma du montage électronique trans-impédance bas niveau de courant.

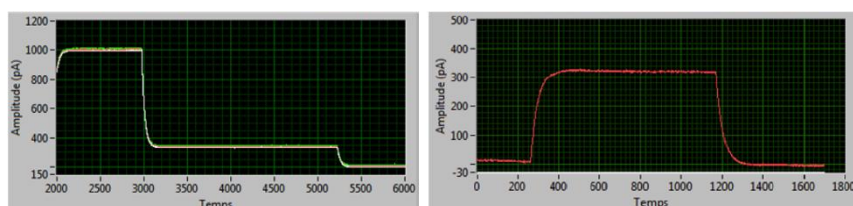


Figure 11 : Réponse d'un collectron Rhodium sous irradiation neutrons par paliers. L'échelle des abscisses [s] correspond à celle de la durée des tirs. A gauche : Tir de 3000 s générant à un courant de collectron stable de 1 nA, puis 300 pA et 200 pA. A droite : tir d'environ 1000 s pour une réponse stable de 300 pA.

#### 4.2. Technologies et réalisation des collectrons

Thermocoax, fabricant de collectrons (figure 12 gauche) a, dans le projet, pour mission de développer et de fabriquer une perche instrumentée, dédiée à la surveillance du réacteur en modes normal et accidentel.

La conception de la perche répond aux exigences des règles RCC-M et RCC-E<sup>8</sup>, de manière à conduire (post-DISCOMS) à sa qualification selon les RCC-E, de catégorie

<sup>8</sup> RCC-M et RCC-E : Règles de Conception et de Construction des Matériels Mécaniques (respectivement Electriques) des filots nucléaires des REP. Elles visent les matériels ou les logiciels dont la défaillance peut impacter la sécurité des personnes ou la sûreté nucléaire.

K1<sup>9</sup> ou AG, ainsi que selon les standards en vigueur<sup>10</sup>. Ce capteur mixte est composé de deux longs collectrons et d'un thermocouple insérés dans la perche, à savoir précisément : *i*) un Collectron Rhodium pour la mesure du flux neutronique en conditions de fonctionnement normal ( $\varnothing_{\text{ext}}$  2,8 mm, émetteur de  $\varnothing$  1 mm et longueur 6 m, isolant  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , gaine externe et conducteur en inox 304L), *ii*) un autre de type Platine pour la mesure des flux neutronique et  $\gamma$  en conditions AG ( $\varnothing_{\text{ext}}$  2,8 mm ; émetteur de  $\varnothing$  1 mm et  $L = 6$  m, isolant en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , gaine externe et conducteur en inox 304 L), et *iii*) un thermocouple de type K pour la mesure de la température en conditions normales et AG ( $\varnothing$  2,8 mm, isolant  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), sans oublier un câble de compensation ( $\varnothing$  2,8 mm, isolant en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , gaine externe et conducteur en inox 304L) pour la mesure du bruit de fond (conditions normales et AG).



Figure 12 : Un Collectron (à gauche) et un connecteur male verre/métal (à droite).

L'extrémité de la perche peut, au choix, être équipée d'un connecteur mâle hermétique verre/métal (figure 12, droite), ou céramique/métal, avec des contacts en nickel pour les collectrons et le câble de bruit de fond, et de types KP et KN<sup>11</sup> pour le thermocouple. Cette perche, proposée à l'issue du développement réalisé avec le CEA, présente un diamètre externe de 12 mm pour une longueur totale de 7 m à 8 m (enveloppe externe en Inconel 600) (figure 13). Celle-ci peut être mise en forme (cintrage au diamètre 6 m) pour permettre son installation ortho-radiale sur le côté de la cuve du réacteur.

Dans le cadre du projet DISCOMS, Thermocoax a pour objectif de réaliser une version démonstrateur avec des collectrons à émetteurs d'une longueur de 6 m, et une version d'essai (pour les tests en réacteur, et l'essai Vulcano) dont la longueur totale sera de 1,5 m à 3 m pour des collectrons avec des émetteurs de longueur 1 m.

Afin d'assurer le raccordement de la perche à la chaîne de mesure déportée, un câble d'extension a également été défini. Il contient des câbles souples (pour les Collectrons et le câble de masse) isolés avec du PEEK, un câble KP isolé PEEK pour le Thermocouple type K, un câble KN isolé PEEK pour le Thermocouple K, tous pouvant mesurer jusqu'à 200 m, ainsi qu'un connecteur femelle hermétique

<sup>9</sup> K1 : Matériels du Bâtiment Réacteur, devant fonctionner dans des conditions d'environnement normal, accidentel et/ou post-accidentel, et sous sollicitations sismiques.

<sup>10</sup> IEEE 323, IEEE 344, IEEE 383, et IEC 980.

<sup>11</sup> KP, KN : thermo-éléments du couple. 'P' pour le pôle '+' (Chromel), 'N' pour le '-' (Alumel).



verre/métal, ou céramique/métal, intégrant des contacts en nickel pour les câbles d'extensions des Collectrons et le câble de masse, mais des contacts KP et KN pour le thermocouple.

La conception de cette perche instrumentée s'est inspirée d'une version précédente, également conçue par Thermocoax, pour la mesure *in-core* (qualifiée pour le circuit primaire de la centrale à : 370°C/155 bar coté interne, et 50°C/4,85 bar coté connecteur). La conception de la perche à partir d'une conception *in-core*, donc hermétique, permet de garantir la tenue aux conditions *ex-core* normales et AG.

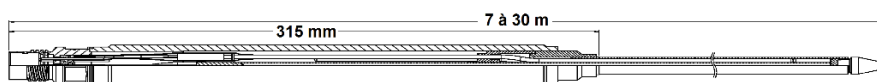


Figure 13 : Illustration d'une perche instrumentée de Collectrons-thermocouple.

#### 4.3. Principes, état de l'art et spécifications des Réseaux de CFO répartis

Les Capteurs & Réseaux de Capteurs à Fibres Optiques [CFO & RCFO] offrent les fonctionnalités comparables aux capteurs traditionnels : mesure, détection, alarme, surveillance, avec comme avantages ceux liés aux fibres : masse réduite et faible encombrement, faibles pertes (déport jusqu'à des dizaines de km), bonne résistance aux rayonnements, immunité électromagnétique, mesure passive sans alimentation électrique locale ... (Ferdinand, 2006 ; 2008). L'optique étant parfois considérée comme coûteuse, le multiplexage de nombreux capteurs sur un système centralisé, trouve une part de sa raison d'être dans la réduction du coût du point de mesure, tant il est vrai que le système de mesure/démultiplexage constitue l'une des composantes essentielles du prix global. De plus, il faut savoir que l'approche RCFO fournit à l'utilisateur les données de chaque capteur sous une forme homogène (fusion de données intrinsèque). La mise en réseau de CFO conduit donc à des systèmes optimisés, qui donnent accès à des fonctions de mesure totalement inaccessibles aux autres technologies (une fibre équivaut à la mise en série de dizaines de milliers de capteurs), il s'agit là des capteurs dits "répartis" où la fibre joue le rôle d'élément transducteur « continûment » sensible.

Les capteurs répartis reposent sur la réflectométrie, une sorte de Radar en optique guidée, mettant en œuvre un procédé de localisation spatiale des « diffuseurs » le long de la fibre, fondé sur la dualité spatio-temporelle ou spatio-fréquentielle de propagation de la lumière dans les fibres. En fait, les réflectomètres (*OTDR*) sont des instruments d'usage courant en télécoms, puisqu'ils permettent de s'assurer de la disponibilité du réseau de distribution (mesure et détection de l'évolution du profil d'atténuation des fibres de ligne, localisation des problèmes de type courbure, rupture, ou connecteur déréglé ...). Ces instruments utilisent la rétrodiffusion de Rayleigh (diffusion élastique) dans la silice constituant les fibres, et délivrent les pertes locales ou réparties le long de celles-ci. Au-delà, ils permettent depuis quelques années de mesurer son profil thermomécanique, grâce à une analyse cette fois fréquentielle

(OFDR) (cf. § 4.3.3). Par ailleurs (figure 14), les effets Raman et Brillouin sont aussi mis à profit, pour accéder aux paramètres température et déformations subies localement par la fibre (cf. § 4.3.1 et 4.3.2).

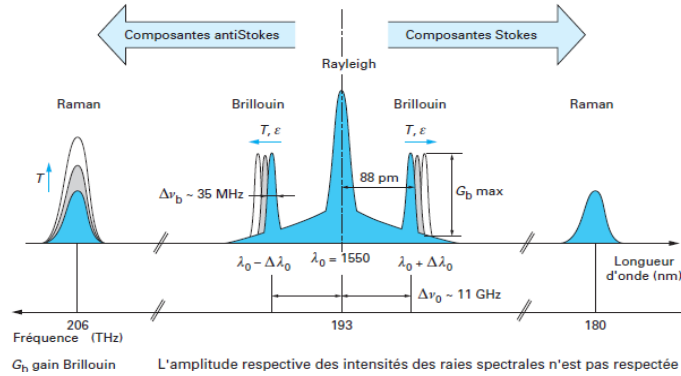


Figure 14 : Spectre des phénomènes de diffusion de Rayleigh, Raman et Brillouin dans les fibres optiques, pour une excitation à la longueur d'onde 1550 nm (Ferdinand, 2008).

#### 4.3.1 La réflectométrie Raman

La lumière diffusée par effet Raman subit un décalage fréquentiel d'environ 100 nm par rapport à la longueur d'onde d'excitation, (figure 14), Ce mécanisme inélastique conduit à générer deux fréquences (deux longueurs d'ondes) disposées symétriquement par rapport à la fréquence d'excitation  $\nu_0$  et appelées respectivement les raies Stokes ( $\nu_S = \nu_0 - \nu_B$ ) et anti-Stokes ( $\nu_{AS} = \nu_0 + \nu_B$ ),  $\nu_B$  désignant la fréquence vibrationnelle caractéristique du milieu. L'intensité de la raie Stokes est assez peu dépendante de la température du milieu, contrairement au signal anti-Stokes dont l'intensité suit la loi de Boltzmann en  $\exp(-h\nu_B/kT)$ . L'analyse complète montre que le ratio  $R$  des intensités diffusées dans ces deux régimes (anti-Stokes sur Stokes) est défini par la relation :  $R(T) = (\lambda_S / \lambda_{AS})^4 \exp(-h\nu_B/kT)$  avec respectivement  $h$  et  $k$  les constantes de Planck et de Boltzmann. Une telle expression n'étant fonction que de la température -qu'elle permet de mesurer-, et des caractéristiques vibrationnelles du milieu, toute influence des variations de la fonction de transfert en intensité du système optoélectronique (puissance de la source, sensibilité du détecteur, gain des amplificateurs, etc.) est éliminée par cette normalisation (Hartog, 1983 ; Dakin *et al.*, 1985 ; Ferdinand, 2003), (figure 15).

L'intérêt d'un tel système, dénommé DTS<sup>12</sup> Raman, réside donc aussi dans le fait que sa mesure présente une grande insensibilité vis-à-vis des perturbations mécaniques appliquées à la fibre, des pertes locales ou réparties, ce qui peut s'avérer crucial sur le long terme. Cette technique très sélective, en complément de la

<sup>12</sup> DTS : *Distributed Temperature Sensor* ; Capteur réparti de température.

réflectométrie, fournit donc un moyen de déterminer le profil thermique le long de la fibre (ou du câble qui la contient), avec une résolution spatiale métrique. Plusieurs appareils sont proposés sur le marché, souvent de type multimode, mais également monomode.

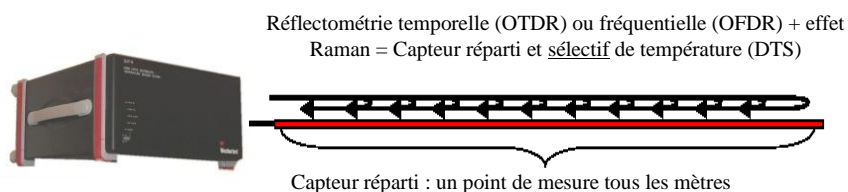


Figure 15 : Principe d'un DTS Raman. Caractéristiques : résolution spatiale 1 m, résolution en température  $\sim 1^\circ\text{C}$ , temps de mesure plusieurs min, portée max 30 km.

#### 4.3.2 La Réflectométrie Brillouin

Cette approche met aussi en œuvre un mécanisme de diffusion inélastique issu, cette fois, de l'interaction de l'onde lumineuse avec des phonons d'origine acoustique générés par électrostriction dans la silice. Son intérêt réside dans la dépendance du décalage des raies de la diffusion Brillouin avec la température ( $\sim 1$  MHz / $^\circ\text{C}$ ) et les déformations ( $\sim 1$  MHz /20  $\mu\text{m}/\text{m}$ ). Ce décalage fréquentiel est cependant cent fois plus réduit qu'en Raman ( $\pm 13$  GHz, soit spectralement  $\sim 100$  pm de la raie laser), (figure 14). La mesure temporellement résolue de ce décalage a conduit à la mise au point de deux techniques cohérentes, désignées par les sigles BOTDA (pour *Brillouin Optical Time Domain Analysis* ; technique *stimulée*) (Nicklès, 1997), et BOTDR (pour *Brillouin Optical Time Domain Reflectometry* ; technique *spontanée*) (Naruse, 2003).

Dans le cas de l'approche BOTDR, on injecte dans la fibre une impulsion de faible durée (comme en OTDR), et on mesure l'intensité de l'onde rétrodiffusée à l'aide d'un récepteur cohérent qui effectue le mélange de cette onde avec celle fournie par un oscillateur local : la mesure répartie du spectre est obtenue en faisant varier l'écart entre la fréquence de l'impulsion sonde et celle de l'oscillateur local, pour assurer la réjection de la contribution Rayleigh. Pour l'utilisateur, le principal avantage de cette méthode vient du fait qu'elle ne requiert pas l'accès aux deux extrémités de la fibre.

Avec la technique « stimulée » BOTDA, on injecte des impulsions « pompes » à une extrémité de la fibre, et une onde continue « sonde » par l'autre extrémité. En tout point de la fibre où l'écart fréquentiel entre ces ondes contra-propagatives égale le décalage Brillouin de la silice, l'intensité de l'onde continue est amplifiée. L'analyse temporelle de ce « gain » conduit à déterminer les points de la fibre où cet accord à lieu ; la détermination du profil de déformations / température nécessitant un balayage continu autour de cet écart sur une certaine plage fréquentielle. L'intérêt de cette approche réside dans le gain qu'elle procure, puisque cela permet d'obtenir,

avec une puissance continue réduite, un signal utile dont l'intensité excède de deux ordres de grandeur la diffusion de Rayleigh. Les meilleures résolutions spatiales sont de l'ordre du mètre<sup>13</sup>, voire en deçà, pour des portées multi-kilométriques, tandis que la résolution fréquentielle des décalages Brillouin avoisine 1 MHz, équivalente à 1°C en température et  $\pm 10 \mu\text{m/m}$  en déformations. Une demi-douzaine de fabricants propose des produits de type BOTDR ou BOTDA (figure 16). Leurs fonctionnalités et performances diffèrent sur la façon de séparer les paramètres température - déformations, et en termes de résolutions ou d'ergonomie (interfaces).

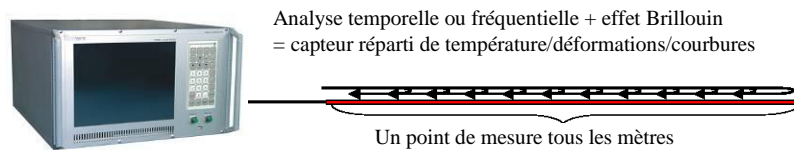


Figure 16 : Un système Brillouin BOTDA. Caractéristiques typiques : résolution spatiale 1 m, en température  $\sim 1^\circ\text{C}$ , en déformations  $20 \mu\text{m/m}$ , temps de mesure : [qq sec. ; qq min], portée  $> 50 \text{ km}$ . N.b. : la fibre est bouclée en A/R sur un BOTDR.

#### 4.3.3 La Réflectométrie fréquentielle de Rayleigh

La mesure répartie de déformations/température fondées sur la rétrodiffusion de Rayleigh, plus récente, met en œuvre une analyse cette fois fréquentielle (*Optical Frequency Domain Reflectometry*), grâce à un laser balayé linéairement en fréquence. L'onde émise est séparée en deux faisceaux dont l'un est envoyé dans la fibre de mesure et l'autre dans le bras d'un interféromètre de Mach-Zehnder (Soller, 2006 ; Sang, 2011). Ce signal source et la rétrodiffusion de Rayleigh sont ensuite mélangés, *via* l'interféromètre, au niveau d'une double photo-détection analysant les deux états de polarisations. A chaque instant, ces interférences, générées à la fréquence instantanée du laser, sont porteuses de la réponse en amplitude et phase de la fibre testée en un point donné qui, avec le balayage, s'éloigne progressivement du début de la fibre. Les interférences se produisant dans le domaine spectral, les données sont traitées à l'aide de transformées de Fourier pour en déduire le profil le long de la fibre du paramètre recherché (température/déformation). Toute variation locale de l'un d'eux a pour conséquence de décaler spatialement - fréquentiellement - le motif de Rayleigh, qui est ensuite comparé à la trace de référence réalisée alors que la température (déformation) n'était pas encore appliquée. L'ampleur du décalage fréquentiel mesuré en tout « point », multiplié par la sensibilité requise (préalablement établies en température et déformation) de la fibre, permet de remonter aux variations de ce(s) paramètre(s), depuis l'instant d'acquisition du profil de référence. Soulignons néanmoins que le traitement du signal est bien plus complexe qu'il n'y paraît, ou que ne le laisse penser le peu qui est dévoilé dans la littérature sur ce processus (Boldyreva, 2015).

<sup>13</sup> Certaines techniques, restent encore au niveau de la R&D bien qu'un produit commercial soit déjà proposé, offrent une résolution centimétrique sur une portée limitée.

Un tel système (figure 17) permet l'interrogation équivalente à des milliers de réseaux de Bragg sur une seule fibre, rendant la partie sensible peu onéreuse par comparaison à des chaînes de réseaux de Bragg. Par contre le coût du système, encore élevé, devrait sans doute baisser avec une diffusion plus large dans l'industrie. Cette technique permet de réaliser le contrôle santé d'une pièce/structure hôte avec une résolution spatiale centimétrique et une résolution de mesure de quelques  $\mu\text{m/m}$  ou dixièmes de  $^{\circ}\text{C}$ . Le temps de mesure, limité par le balayage de la source et sa bande spectrale, est d'environ 10 s, si l'on opte pour un traitement du signal *a posteriori*, qui dure plusieurs minutes<sup>14</sup>.

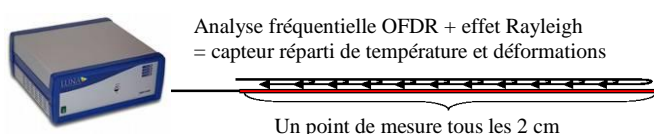


Figure 17 : Un système OFDR Rayleigh. Caractéristiques : résolution spatiale 2 cm, résolution en température  $\sim 0,1^{\circ}\text{C}$ , plage de mesure [0 K ; centaines de degrés], résolution en déformations  $\pm 1 \mu\text{m/m}$ , plage en déformations : 1,7 %, temps de balayage  $\sim 10$  s, post- traitement : plusieurs mn, portée 70 m à 2 km par tronçons.

En résumé de ce paragraphe, nous pouvons donc affirmer que, d'une part les systèmes DTS Raman fournissent le profil de température de manière très sélective, et que, d'autre part, les systèmes Brillouin (mesure à longue portée) ou Rayleigh (mesure à courte portée) délivrent le profil thermomécanique de la fibre, sans séparer les paramètres température et déformations. Ces deux dernières approches sont très complémentaires, l'une adressant de grandes longueurs avec une résolution métrique et l'autre une portée plus réduite avec une résolution centimétrique et des résolutions de mesure environ 10 fois meilleures, tant en déformations qu'en température. Précisons que pour séparer les deux paramètres température et déformations, deux inconnues requérant deux équations (deux mesures indépendantes), une approche pragmatique consiste souvent à utiliser deux fibres (ou câbles), voire la fibre « aller » et celle de « retour » dans le cas du BOTDA, l'une d'elles étant isolée des déformations.

Dans le projet DISCOMS, même si la température reste le paramètre privilégié, ces différents instruments seront mis en œuvre dans l'essai final de coulée de corium (cf. § 5). De fait la sélection et les tests de câbles optiques sensibles dédiés à ces instruments et aux paramètres qu'ils adressent font aussi partie de nos développements. Les caractéristiques visées sont consignées dans le tableau ci-après.

<sup>14</sup> Luna Innovations Inc. a également commercialisé un instrument réalisant de telles mesures à la cadence de 100 Hz, avec une zone de mesure cependant limitée à 20 m sur 70 m de portée.

Tableau 1. Instruments de mesures optiques et performances attendues.

Instrument et principe	Type de mesure	Câble sensible	Performances visées
OTDR : intensité de la rétrodiffusion de Rayleigh	Rupture de fibre	Tout type de câble pour hautes températures	Localisation spatiale < 1 m
OFDR Rayleigh : décalage fréquentiel	Profils de temp., déformation	De température, et de déformation, compensé en température	Echantillonnage spatial : Qq cm ; incertitude : 10°C
BOTDR / A : décalage fréquentiel Brillouin	Profil de temp., déformation		Echantillonnage spatial : 1 m ; incertitude : 10 <sup>-4</sup>
DTS Raman : ratio des intensités anti-Stokes/Stokes	Profil de température	Tout type de câble pour hautes températures	Echantillonnage spatial : 1 m ; incertitude : 50°C ; jusqu'à T > 500°C

#### 4.4. Sélection des fibres optiques monomodes résistantes aux radiations ionisantes

Généralement, l'atténuation des fibres optiques monomodes (0,2 dB/km à 1,55  $\mu\text{m}$ ) n'est pas une limitation pour les longueurs interrogées par les CFO répartis. Cela étant, dans la mesure où les radiations ionisantes affectent leur transmission (e.g. création de centres colorés, etc.), il devient nécessaire, pour l'application visée, d'évaluer le niveau d'atténuation induite le cœur des fibres par ces radiations.

Plusieurs fibres optiques à cœur de silice ultra-pure ou légèrement dopé fluor, connues pour leur bonne tenue sous rayonnements, ont donc été retenues (Wijnands, 2008 ; Phéron, 2012), puis testées dans des conditions d'irradiation représentatives de la situation extrême, à savoir celles que supporteraient des fibres pas, ou très peu, protégées par le béton durant les 60 ans de fonctionnement du réacteur suivi d'un AG en fin de vie de la tranche nucléaire.

Des segments de 100 m de fibre (longueur typique pour une installation sous réacteur) ont été placés dans l'installation POSEIDON du Laboratoire des Rayonnements Appliqués (LABRA, 2017). L'irradiation  $\gamma$  a duré plus de 300 h, avec trois configurations testées, dont deux ayant nécessité le déplacement de fibres entre la phase simulant la période opérationnelle (faible débit de dose) et celle simulant la période accidentelle (fort débit de dose). Au total les doses cumulées pour ces trois configurations ont été respectivement d'environ 200 kGy, 1 MGy et 2 MGy. Le niveau de dose total le plus élevé (configuration 1) a été testé à 20°C et 80°C. Les transmissions ont été mesurées aux longueurs d'onde 1,31  $\mu\text{m}$  et 1,55  $\mu\text{m}$ .

Les résultats obtenus avec trois des fibres présentant les meilleures tenues aux rayonnements  $\gamma$  (notées ci-dessous « a », « b » et « c ») sont présentés ci-dessous, ainsi que ceux correspondant à une fibre standard de type SMF 28. La figure 18 illustre la variation d'atténuation induite dans la fibre « c » lors du test en configuration 2 (dose cumulée de 1 MGy). Pour la configuration 1, le débit de dose maximum (6 kGy/h) est appliqué en continu. Les atténuations induites en fin de test sont consignées dans le tableau 2.

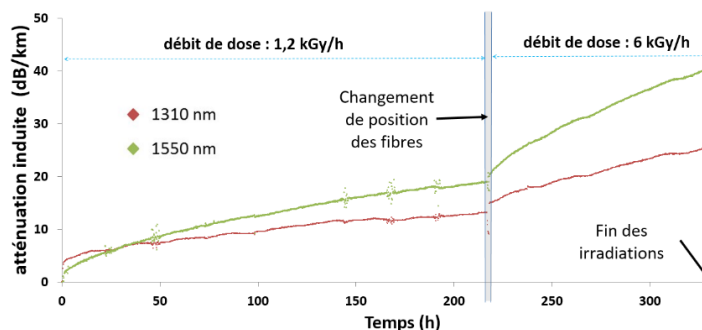


Figure 18 : Variation au cours du temps de l'atténuation induite pour un segment de fibre « c » avec deux phases de débit de dose différentes : 1,2 kGy/h puis 6 kGy/h.

Tableau 2 : Atténuation induite (en dB/100 m), à 1,55  $\mu\text{m}$ , en fin d'irradiation selon les différentes doses cumulées et conditions de température.

Dose ; Temp.	0,2 MGy ; 20°C	1 MGy ; 20°C	2 MGy ; 20°C	2 MGy ; 80°C
Fibre « a »	0,7	1,5	3,1	2,6
Fibre « b »	0,4	0,8	1,1	1,1
Fibre « c »	1,7	4	5,4	3
SMF 28		21,2		

Ainsi, les atténuations induites par les radiations dans les fibres optiques monomodes les plus résistantes sont parfaitement compatibles avec l'étendue de mesure des systèmes de mesure répartie envisagés, même dans les conditions extrêmes évoquées plus en amont. Ces fibres seront prochainement mises en câble (cf. § 4.5) et un nouveau test d'irradiation sera mené pour confirmer les atténuations obtenues avec les fibres seules.

#### 4.5. Les câbles sensibles à fibres optiques monomodes

La détection et la surveillance du corium en cas d'AG reposera sur des câbles à fibres optiques judicieusement positionnés et utilisés, selon leur nature, selon, trois fonctions principales : *i*) en tant que câbles de sécurité dits « fusibles » *ii*) pour la mesure de profils de variations de températures, *iii*) et pour la mesure de profils de variations de déformations. En brûlant au passage du corium (dont la température est supérieure à 2000°C), chaque câble offre dans une première fonction « fusible » la possibilité de déterminer des contours d'ablation du radier (résultant de l'Interaction Corium-Béton) par localisation de la fin de fibre, voire de celle du pic de réflexion de Fresnel (avec une incertitude de quelques décimètres en réflectométrie télécom OTDR, et de seulement de quelques centimètres en réflectométrie à comptage de photons v-OTDR). Ceci étant, le caractère réfractaire du béton offre une protection thermique

telle que la proximité du corium, dans sa progression au sein du radier, peut également être détectée par la mesure de profils de variations de températures (réflectométries DTS Raman, BOTDA/BOTDR Brillouin ou OFDR Rayleigh) : les gradients de température restent concentrés sur quelques décimètres (§ 3.1), toute élévation de température le long des câbles de mesure pourra ainsi être assimilée à une arrivée toute proche du corium.

Enfin, le déversement du corium sur le radier (jusqu'à 130 tonnes dans le cas de l'EPR) doit, quant à lui, pouvoir se détecter en réflectométries Brillouin et OFDR Rayleigh, au-delà du front de progression de la température où son influence reste encore négligeable, *via* son effet mécanique sur la déformation subie par le radier. La détection des ruptures de câbles, des élévations locales de températures et des effets mécaniques du corium sur le radier sont des informations qui pourront par conséquent être mesurées à distance pour évaluer le stade d'évolution de l'AG dans les puits de cuve, jusqu'à l'éventuel percement du radier.

Au-delà de l'Interaction Corium-Béton au sein du radier, le projet propose également l'instrumentation de la chambre d'étalement du réacteur EPR pour en assurer la surveillance sur le long terme (*e.g.* refroidissement du corium). En outre, les instruments optiques réflectométriques mis en œuvre, tous de type monomode, opérant chacun sur des câbles de ce type, offriront ainsi, dans un contexte où la sûreté demeure primordiale, la redondance nécessaire à l'éventuelle défaillance d'un câble ou d'un système de mesure, *a minima* dans une fonction « fusible ».

#### **4.6. Logiciels de pilotage et Interface Homme-Machine des instrumentations**

Le système constitué par les câbles optiques sensibles, les instruments de mesures réparties, les cartes d'acquisition/conditionnement, ainsi que l'unité de traitement des mesures et son Interface Homme-Machine ne forment pas un système de contrôle-commande à proprement parler puisqu'il n'est ici question que d'acquisition de grandeurs physiques. Ce système n'est d'ailleurs pas nécessaire à l'exploitation de la tranche et ne relève donc pas des articles 2 et 3 du décret du 11 décembre 1963 relatif aux installations nucléaires (Légifrance, 1963). En revanche, en fonction du lieu de son installation, il subit des exigences spécifiques liées à sa localisation.

Sans préjuger des conclusions des essais, il est plausible d'anticiper qu'un tel système de surveillance puisse être utilisé dans le cadre d'une situation accidentelle et serait partie prenante des fonctions post-accidentelles. Sa participation à une ligne de défense serait dans ce cas associée à la « Ligne de réduction des risques », induisant un classement au sens de la sûreté conduisant *a minima*, pour la France à *i*) une exigence de conformité au RCC-E, *ii*) la nécessité d'un programme d'assurance qualité et *iii*) une qualification aux conditions de fonctionnement.

Le développement, la vérification et la validation du système de pilotage de ce système de surveillance et de son interface homme-machine (IHM) sont donc prévus pour être structurés par les dispositions du Rapport Préliminaire de Sûreté (RPS) et du guide SSG-39 de l'AIEA (AIEA, 2016), afin de pouvoir disposer d'un pilote



industrialisable. La philosophie générale de sa réalisation est structurée par les éléments suivants :

- exigence de standardisation des interfaces aux différents instruments sur la base des normes du marché ;
- transposition des « prototypes » en développements industriels, *e.g.* par la réécriture des *drivers* propriétaires quand cela est possible ;
- ergonomie de l'IHM respectant les normes industrielles (IEC 62241, 2004)<sup>15</sup> et les standards des exploitants, S3C notamment (Appell, 1988 ; Dien, 1991) ;
- standardisation des traitements (conditionnement, bilans, historiques, traitements numériques et statistiques) à travers les différents instruments.

La réalisation du système sera encadrée par le cycle de vie générique de l'IEC 61508 (IEC 61508, 2010)<sup>16</sup> et les modèles de l'ISO 29110 (ISO/IEC TR 29110, 2016), et matérialisée par un plan de développement et de validation. L'essai final avec coulée de corium constituera la phase de qualification aux conditions de fonctionnement, mais sera précédée par une phase d'essais en plateforme permettant de dérouler les programmes d'essais unitaires, d'intégration et fonctionnels.

## 5. L'essai prévu de coulée de corium

L'installation VULCANO (figure 19) de la plateforme PLINIUS (Bouyer, 2015) permet de réaliser des essais avec plusieurs dizaines de kg de corium prototypique. Un four (1) à arc plasma transféré entre deux torches (2-3) permet de fondre les oxydes du corium (UO<sub>2</sub> appauvri, ZrO<sub>2</sub>, produits de décomposition du béton) tandis que l'acier fondu est préparé dans des fours inductifs. Ces deux bains sont versés dans une section d'essai (4) en béton. La puissance radiologique résiduelle est simulée par un chauffage inductif à l'aide de spires disposées autour de la section d'essai métallique.

Afin de valider le comportement aux conditions de l'interaction corium-béton des capteurs développés, il est prévu de réaliser un essai VULCANO avec une section d'essais où ils seront installés, puis de vérifier leur bon fonctionnement, de manière déportée. Ces essais étant réalisés avec du corium prototypique (uranium appauvri et sans produits de fission), seuls les aspects thermiques et physicochimiques seront représentés lors de l'essai et non ceux liés aux rayonnements, traités par ailleurs.

<sup>15</sup> Norme décrivant les exigences fonctionnelles des systèmes d'alarme en salle de commande des centrales nucléaires, leurs directives de conception pour leur présentation, ainsi que les exigences relatives aux facteurs humains en salle de commande.

<sup>16</sup> Norme décrivant les aspects à considérer lorsque des systèmes électriques, électroniques ou d'électronique programmable sont utilisés pour réaliser des fonctions de sûreté.

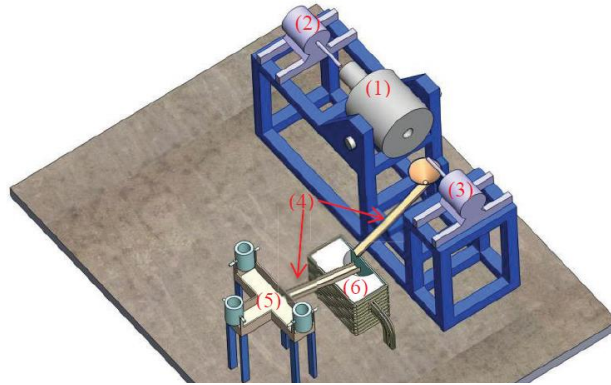


Figure 19 : Installation VULCANO. (1) four – (2) cathode (3) anode (4) goulottes de versement (5) fours inductifs pour acier (6) section d'essai en béton.

### Conclusion et perspectives

Depuis les années 1970, l'économie énergétique mondiale et en particulier celle des grands pays industrialisés a été marquée par plusieurs crises dont celle de Fukushima. Celles-ci, du fait de leurs conséquences environnementales et sanitaires, fragilisent notre modèle de développement, tout en conduisant à d'inévitables mutations énergétiques et donc technologiques. Depuis la catastrophe nucléaire de Fukushima émerge une volonté, partagée par de nombreux acteurs, d'accroître la sûreté de l'outil électronucléaire, de manière non seulement à préserver les citoyens et l'environnement des conséquences d'une éventuelle autre catastrophe, mais aussi d'accroître l'attrait de cette filière en clivant l'offre industrielle nationale vis-à-vis de ses concurrents internationaux.

Le projet DISCOMS, vise à améliorer la surveillance de l'état de la troisième barrière de confinement en cas d'Accident Grave avec percement de la cuve du réacteur, grâce à une surveillance déportée du corium. Il a également pour motivation de préserver, du fait du déport des systèmes d'interrogation, la santé des personnels opérant à distance de sécurité sanitaire depuis une base arrière. Pour cela, il met en œuvre les technologies de mesure les plus performantes, à savoir les Capteurs à Fibres Optiques répartis et les collecteurs de grande longueur. Du fait de l'absence de besoin d'alimentation locale de ces techniques, il pallie l'indisponibilité des instrumentations traditionnelles qui surviendrait en cas de perte totale d'électricité dans l'enceinte de confinement, voire au niveau de toute la tranche. De cette conjonction d'intérêts et d'avantages émerge une dynamique susceptible de déboucher sur la mise en œuvre de résultats tangibles obtenus dans le cadre de ce projet.

## Remerciements

Ce projet est cofinancé par le Programme d'Investissements d'Avenir et opéré par l'Agence Nationale de la Recherche, que le consortium souhaite remercier, de même que M. Antony Lebeau pour ses nombreux et judicieux conseils organisationnels, ainsi que pour ses encouragements.

## Références

- AIEA (2002). *Accident Analysis for Nuclear Power Plants*. Int. Atomic Energy Agency, Vienna. ISBN 92-0-115602-2. ISSN 1020-6450. Safety Reports Series No. 23. [http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1131\\_scr.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1131_scr.pdf)
- AIEA (2016). *Safety Standards for protecting people and the environment Specific Safety Guide*. Int. Atomic Energy Agency, Vienna. ISBN 978-92-0-102815-0 ISSN 1020-525X No. SSG-39. [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1694\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1694_web.pdf)
- ANR (2012). *Appel à Projets Investissements d'Avenir - Recherche en Matière de Sécurité Nucléaire et de radioprotection (RSNR)*. <http://www.agence-nationale-recherche.fr/investissementsdavenir/documents/2012/ANR-AAP-RSNR-2012.pdf>
- Appell B. (1988). Le simulateur de conduite S3C du Bugey : un moyen d'évaluation pour une salle de commande informatisée. *Revue Générale de l'Électricité*. Mars-avril 1988 p. 131. <http://dx.doi.org/10.1051/rgn/19882131>
- ASN (2013). *Les Echelles de classement des incidents et accidents nucléaires et des événements en radioprotection*. <http://www.asn.fr/Media/Files/Echelle-INES-pour-le-classement-des-incident-et-accidents-nucleaires>
- Barbot L. *et al.* (2015). Calculation to experiment comparison of SPND signals in various nuclear reactor environments. *ANIMMA 2015*, 20-24 April, Lisbon, Portugal.
- Barbot L. *et al.* (2016). Experimental Validation of a Monte Carlo based Toolbox for Self-Powered Neutron and Gamma Detector Simulation in the Osiris MTR. *PHYSOR 2016*, May 1-5, Sun Valley, USA.
- Bentaïb A., Bonneville H., Cénérino G. (2013). *Les accidents fusion des réacteurs nucléaires de puissance : État des connaissances*. EDP Sciences. ISBN : 978-2-7598-0972-1.
- Birraux C., Bataille C., Sido B. (2011). *Rapport de la mission parlementaire sur la sécurité nucléaire, la place de la filière et son avenir*. Rapport n°3614 déposé par l'OPESCT sur le Bureau de l'Assemblée nationale, et sur le Bureau du Sénat sous le n°701, 30 juin 2011. [http://www2.assemblee-nationale.fr/documents/notice/13/rap-off/i3614/\(index\)/index-thematique-ocst](http://www2.assemblee-nationale.fr/documents/notice/13/rap-off/i3614/(index)/index-thematique-ocst) ; <http://www.senat.fr/rap/r10-701/r10-7011.pdf>
- Boldyreva E. (2015). *Mesures réparties par réflectométrie fréquentielle sur fibres optiques*. Thèse de l'Université de Toulouse, 20 octobre 2015.
- Bouyer V., Cassiaut-Louis N., Fouquart P., Piluso (2015). P. PLINIUS Prototypic Corium Experimental Platform: Major Results and Future Works. *16<sup>th</sup> Nuclear Reactor Thermal Hydraulics conference, NURETH-16*, Chicago.

- Bordes F. (2015). Les exigences d'essais pour une qualification matérielle des équipements classés sûreté nucléaire. *17<sup>ème</sup> Congrès International de Métrologie*. 21-24 sept., Paris. <http://cfmetrologie.edpsciences.org>
- Brovchenko M., Dechenaux B., Burn K.W., Console Camprini P., Duhamel I., and Pero A. (2016-a). Neutron-gamma flux and dose calculations in a Pressurized Water Reactor (PWR), *Proceedings of ICRS-13 & RPSD-2016*, Oct. 3-6, Paris, France.
- Brovchenko M., Duhamel I., Dechenaux, B. (2016-b). Neutron-gamma flux and dose calculations for feasibility study of DISCOMS instrumentation in case of severe accident in a GEN 3 reactor. *Proceedings of ICRS-13 & RPSD-2016*, Oct. 3-6, Paris, France.
- Dakin J.P., Pratt D.J., Bibby G.W., and Ross J.N. (1985). Distributed optical fiber Raman temp. sensor using a semiconductor light source and detector. *Electron. Lett.* 21(13), p. 569.
- Dien Y., Montmayeul R., Beltranda G. (1991). Allowing for Human Factors in Computerized Procedure Design. *Proc. of the Human Factors Society*, 35<sup>th</sup> Annual meeting. <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/154193129103501009>
- Eu. Committee (1992). *European Committee for Standardization, Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*, Eu Standard EN-1-2.
- Ferdinand P. (1989), Optical Fiber Sensor Network Potentials in EDF. *Conference on Optoelectronics Sensors and Systems*, Glasgow, 1-2 June.
- Ferdinand P., Denayrolles Y. *et al.* (1990). The potential for distributed sensors and optical fiber sensors network in the electric power industry. *MST.*, Vol. 1, n°9, pp.908-916, Sept.
- Ferdinand P., Magne S., Dewynter-Marty V., Pichon L., Bouvet J.-P., Rougeault S., and Bugaud M. (1998). Optical Fiber Sensors provide new means for measurement and monitoring within the Nuclear Industry. *Int. Nuclear Congress ENC'98*, Oct. 25-28, Nice.
- Ferdinand P. (2003). Thermomètres à fibres optiques, Procédés de mesure. *Techniques de l'Ingénieur, Mesures et Contrôles*, R 2800.
- Ferdinand P. (2006). *Quid de l'état de l'art des Réseaux de Capteurs à Fibres Optiques, 20 ans après leurs premiers balbutiements ? Colloque du Club « Contrôles et Mesures Optiques pour l'Industrie »*, 20-24 nov., Mulhouse.
- Ferdinand P. (2008). Réseaux de capteurs à fibres optiques, a) Mesures et multiplexage. R 460v2. et b) Applications. R 461. *Techniques de l'Ingénieur, Mesures et Contrôles*.
- Ferdinand P., *et al.* (2011). De l'intérêt des Capteurs à Fibres Optiques pour le renforcement de la sûreté des centrales nucléaires. *Actes du Colloque du Club CMOI*, 21-25 nov., Lille.
- Ferdinand P., Magne S., Laffont G. (2013). Optical Fiber Sensors to improve the safety of Nuclear Power Plants, *4<sup>th</sup> APOS Conference*, Wuhan, China, 15-18<sup>th</sup> Oct.
- Ferdinand P., *et al.* (2015). DISCOMS: DIstributed Sensing for COrium Monitoring and Safety, *The Int. Conf. on Smart Materials & Structures. CANSMART*, 15-17 July. Vancouver, Canada.
- Guarnieri F., Travadel S., Martin C., Portelli A., Afrouss A. *L'accident de Fukushima Dai Ichi : le récit du directeur de la centrale. Vol. 1 - L'anéantissement*, ISBN : 9782356712059. Vol. 2 - *Seuls*, ISBN : 9782356712295. MINES ParisTech. Presse des

- Mines. <http://www.pressesdesmines.com/libres-opinions/l-accident-de-fukushima-dai-ichi.html>
- Goorley J.T. *et al.* (2013). Initial MCNP6 Release Overview – version 1.0. LA-UR-13-22934.
- Hartog, A.H. (1983). A distributed temperature sensor based on liquid-core optical fibers. *J. Light. Tech.* 1(3), pp. 498–509.
- IEC 61508 (2010). *Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems*. <https://webstore.iec.ch/publication/5515>
- IEC 62241 (2004). *Nuclear power plants - Main control room - Alarm functions and presentation*. <https://webstore.iec.ch/publication/6630>
- ISO/IEC TR 29110 (2016). *Systems and software engineering - Lifecycle profiles for Very Small Entities (VSEs)*. <https://webstore.iec.ch/publication/25174>
- LABRA (2017). <http://www-centre-saclay.cea.fr/fr/Le-Labra-une-plateforme-d-irradiation-au-service-des-industriels-et-des-chercheurs>
- Légifrance (1963). *Décret n°63-1228 du 11 décembre 1963 relatif aux installations nucléaires*. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000490634>
- Hamrita H., Kondrasovs V., Makil H., Bourbotte J.M. (2016). *Dispositif d'amplification électronique, appareil de mesure et procédé de mesure associés*. Demande en cours d'un dépôt de brevet.
- Naruse N.O (2003). Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry System for Monitoring Structures: Development and Field Trials. *Optical Fiber Sensor Int. Conf. OFS-16*, Nara, Japan, 13-17, Oct., pp. 514-517.
- Niklès N. (1997). *La diffusion Brillouin dans les fibres optiques : Etude et application aux capteurs distribués*. Thèse n° 1674, EPFL, Département d'Electricité, Lausanne, Suisse.
- Phéron X., Girard S., Boukenter A., Brichard B., Delepine-Lesoille S., Bertrand J., and Ouerdane (2012). Y. High -ray dose radiation effects on the performances of Brillouin scattering based optical fiber sensors. *Opt. Exp.*, vol. 20, pp. 26978–26985.
- Sang A.K., Froggatt M.E., Kreger S.T., Gifford D.K. (2011). Millimeter resolution distributed dynamic strain measurements using optical frequency domain Reflectometry. *Optical Fiber Sensor Int. Conf. OFS-21*, 15-19 May, Ottawa, Canada, SPIE Vol. 7753.
- Sari A. *et al.* (2014). *Design of a Neutron Interrogation Cell Based on an Electron Accelerator and Performance Assessment on 220 Liter Nuclear Waste Mock-Up Drums*. IEEE Trans. On Nuclear Science, Vol. 61, n° 4, August.
- Senat (2017). Office Parlementaire des Choix Scientifiques et Technologiques. <http://www.senat.fr/opecst>
- Sevón T., Journeau C., Ferry L. (2013). VULCANO VB-U7 experiment on interaction between oxidic corium and hematite-containing concrete, *Ann. Nucl. Ener.* 59, 224-229.
- Soller B.J., Froggatt M.E., Gifford D.K., Wolfe M.S., Yu M.H. and Wysocki P.F. (2006). Measurement of Localized Heating in Fiber Optic Components with Millimeter Spatial resolution. *Optical Fiber Communications Conf. OFC 2006*, Anaheim, CA, USA, March 5.
- Spindler B., Tourniaire B., Seiler J.M. (2006). Simulation of MCCI with the TOLBIAC-ICB code based on the phase segregation model. *Nucl. Eng. Des.*, 236: 2264-2270.

- TRIPOLI-4<sup>®</sup> Project Team (2013). *TRIPOLI-4<sup>®</sup> Version 8 User Guide*. CEA-R-6316. Feb. 2013. <http://www.oecd-nea.org/tools/abstract/detail/nea-1716/>
- Tsilanizara A., Huynh T.D., Jouanne C., Visonneau T. (2010). *Guide d'utilisation du logiciel DARWIN/PEPIN2 V2.3*. CEA DEN/DANS/DM2S/SERMA/LLPR/RT/10-4898/A.
- Wijnands T., De Jonge L. K., Kuhnenn J., Hoeffgen S. K., and Weinand U. (2008). Optical absorption in commercial single mode optical fibers in a high-energy physics radiation field. *IEEE Trans. Nucl. Science*, Vol. 55, no. 4, pp. 2216–22, Aug.