

Evaluation Non Destructive des Enceintes de confinement de centrales nucléaires.

V Garnier¹, J Verdier², M Sbartai³, JF Chaix¹, O Abraham⁴, C Payan¹, E Larose⁵, B Piwakowski⁶, JM Henault⁷

¹Université d'Aix Marseille, CNRS UMR 7031, Centrale Marseille, LMA, Marseille, France.

²LMDC, Université de Toulouse, INSA/UPS, 31077 Toulouse, France.

³Université de Bordeaux, I2M, 33405 Talence, France.

⁴Université Gustave Eiffel, Campus de Nantes, 44344 Bouguenais, France.

⁶Institut des Sciences de la Terre, 38058 GRENOBLE, France.

⁶IEMN, Ecole Centrale Lille, 59650 Villeneuve-d'Ascq, France.

⁷EDF, R&D, PRISME, 78400 Chatou, France.

RESUME

Le projet ENDE (Evaluation Non Destructive des Enceintes de confinement de centrales nucléaires) a permis sur la base d'un travail en 4 temps de proposer des outils nouveaux ou de valoriser des outils déjà existants pour ausculter les bétons des enceintes des centrales. Une mise en œuvre sur la maquette VeRCoRs réalisée par EDF a permis de structurer et de valider notre démarche à l'échelle de la mesure in situ.

8 puis 9 partenaires se sont regroupés autour d'objectifs d'auscultation à différentes échelles alliant les END et les calculs numériques pour détecter les vieillissements des centrales. Les objectifs du projet étaient de contrôler les 2 fonctions d'une enceinte à savoir la résistance mécanique et l'étanchéité qui peuvent être dégradées. Le contrôle de la première est fondé sur la caractérisation du matériau béton. La seconde consiste à suivre la propagation ou l'ouverture d'une fissure ce qui intervient suite à une surpression accidentelle ou encore durant une visite décennale.

Le projet a permis de réelles avancées scientifiques en levant plusieurs verrous, ainsi que la valorisation de plusieurs techniques qui après validation sur site, sont à ce jour opérationnelles pour des mesures industrielles. Nous faisons le bilan de ces 6 années de travail collaboratif et présentons les perspectives pour l'auscultation des enceintes mais aussi des structures de Génie Civil.

Mots-clefs Caractériser, Fissures, In Situ, END, béton

1. CONTEXTE

Les enceintes de confinement des centrales constituent la dernière barrière de protection en cas d'accident de type rupture de canalisation primaire ou encore lors d'un événement mécanique extérieur conséquent. Il est important que l'étanchéité et la résistance mécanique soient évaluées en fonctionnement ou lors des visites décennales des centrales nucléaires. Dans le cas d'une rupture de canalisation primaire, la pression

monte à 4.2 bar et la température à 180°C en 20 s avec l'ouverture des fissures existantes ou la création de nouvelles.

Le projet ENDE (Evaluation Non Destructive des Enceintes de confinement de centrales nucléaires) est centré sur ce cas de figure et a pour objectifs de caractériser le béton ainsi que les fissures. Il fait suite à plusieurs projets [1-2]. Il est bâti sur 4 étapes de la mesure de laboratoire au transfert technologique: Le premier temps a consisté en laboratoire à étudier la sensibilité des paramètres issus des évaluations non destructives (END) au regard des propriétés du béton: saturation, endommagement thermique et contrainte appliquée pour sélectionner les mesures d'END les plus capables de caractériser le béton. Le second temps a permis en laboratoire de suivre l'endommagement diffus du béton puis l'ouverture et la fermeture de fissures dans différents cas de chargement par des techniques acoustiques et d'imagerie. Le troisième temps a permis de transférer les techniques de laboratoire sur site. Ce passage aux dimensions de la structure a été mis en œuvre lors de la mise en pression de l'enceinte VerCoRs.

Le quatrième temps a conduit durant la prolongation du projet à rendre opérationnelles pour des mesures industrielles des techniques d'END. Il a aussi permis de structurer une partie des liens entre les mesures END et les modèles thermo-hydro-mécanique (THM)

2. TRAVAIL DE LABORATOIRE

Caractérisation du béton : Des ENDs ont été menés, sur un type de béton de centrale nucléaire, sous presse sur des éprouvettes à différents états d'endommagement thermique (chauffage à 80 – 150 et 200°C), états de saturation (30 – 60 – 100%) et de contrainte (0 à 12 MPa suivant l'état du béton). Des modèles de conversion ont été déterminés entre les observables (mesure d'END) et les indicateurs de fiabilité visés (Résistance, Module d'élasticité, Saturation, Endommagement, Porosité, Contrainte)

10 techniques d'END ont été mises en œuvre suivant une démarche décrite dans [3] (acoustique linéaire et non linéaire, radar, capacitive, électrique, perméabilité). 62 observables déduites de ces essais ont été corrélées aux évolutions des indicateurs (Résistance, Module d'élasticité, Saturation, Endommagement, Porosité, Contrainte).

La figure 1 montre la capacité de la mesure de la contrainte et de l'endommagement thermique et de la saturation avec des coefficients de variation pouvant varier de 1 à 500%.

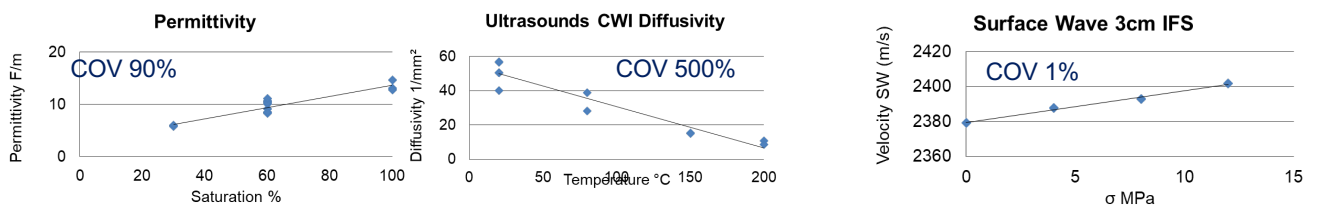


Figure 1. Exemple d'évolution d'observables en fonction d'indicateurs

Un processus de sélection a permis de retenir les observables à transférer pour les mesures sur site. Le tableau 1 montre les sensibilités identifiées par technique. Nous pouvons noter que les 4 premières techniques, utilisées usuellement en Génie Civil, permettent d'évaluer la saturation et que les 3 dernières qui sont des techniques en devenir complètent les précédentes en améliorant la capacité de la mesure de la contrainte et de l'endommagement thermique.

Techniques	Saturation	Contrainte	Endo Therm
Capacité	+++	+	+

Radar	+++	0	0
Résistivité	+++	0	++
Ultrasons	++	+	++
Perméabilité	+++	+	++
Ultrasons Multi Diffusion	++	++	+++
Acoustique Non Linéaire	+	+++	+++

Tableau 1. Sensibilité des techniques aux indicateurs Saturation, Contrainte, Endommagement thermique

La figure 2 montre les évaluations issues de l'inversion des ENDs de la saturation et de la température d'endommagement du béton pour les éprouvettes ENDE testées en laboratoire. La qualité de l'évaluation est bonne dans les 2 cas.

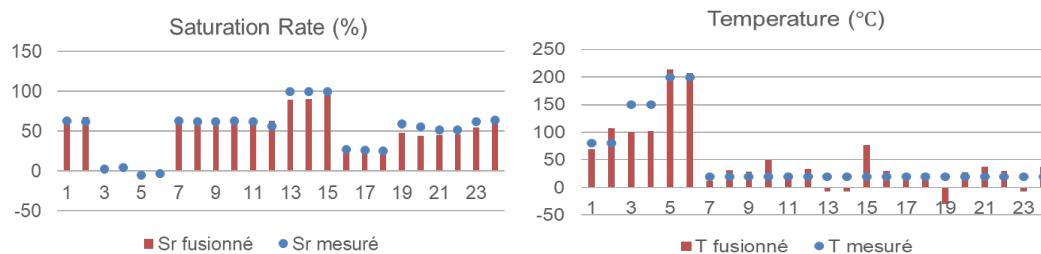


Figure 2. Évaluation de la saturation et de la température d'endommagement du béton par ENDs.

Suivi des fissures : Des essais ultrasonores par ondes diffuses, émission acoustique, acoustique linéaire et non linéaire et corrélation d'images, ont été menés sous presse. Les ENDs ont permis de suivre la formation d'un endommagement mécanique diffus sous formes de microfissures puis sa coalescence en macro fissures.

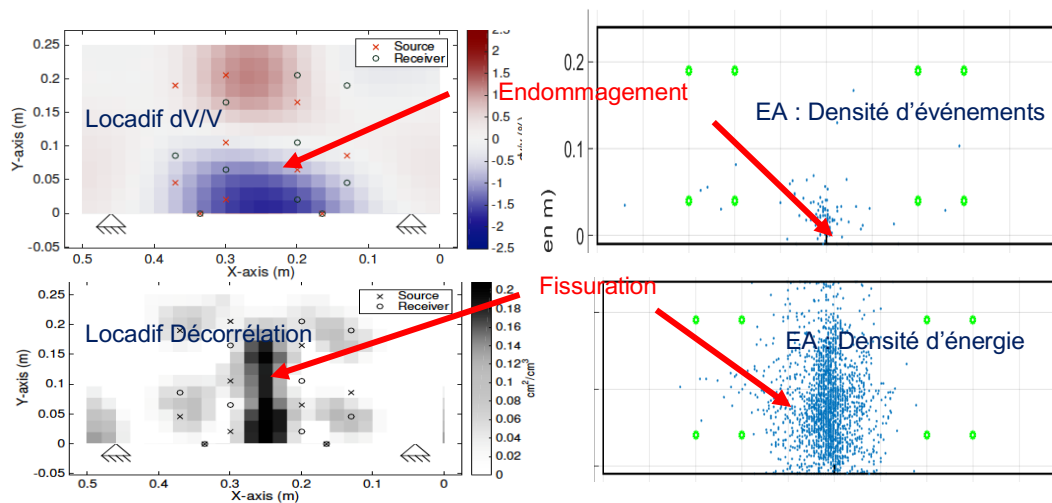


Figure 3. Suivi de l'endommagement mécanique puis de la propagation d'une fissure

La figure 3 montre le parallèle entre 2 techniques, par ondes diffuses et en émission acoustique. La variation de vitesse relative des ondes diffuses (Locadiff) et la densité d'évènements en émission acoustique (EA) permettent de détecter et positionner l'endommagement qui apparaît avant l'amorçage de la fissure. La décorrélation des ondes diffuses Lodaciff et la densité d'énergie EA permettent d'identifier la position de la fissure dans l'espace de l'éprouvette. Un essai sur une poutre munie d'un câble de tension a montré qu'il est aussi possible de suivre la fermeture d'une fissure.

Ces données peuvent être associées par une fusion de données à partir d'opérateurs simples afin d'identifier la longueur d'une fissure.

3. TRANSFERT SUR SITE

Le transfert est fait sur la maquette VeRCoRs développée par EDF. Elle est à l'échelle 1/3 en termes de dimensions et 1/10 en termes d'évolution de saturation. Elle subit donc chaque année l'équivalent d'une visite décennale qui consiste, dans ce cas sur une semaine, à réaliser un cycle de mise en pression de l'enceinte jusqu'à 4.2 bar puis décompression (figure 4).

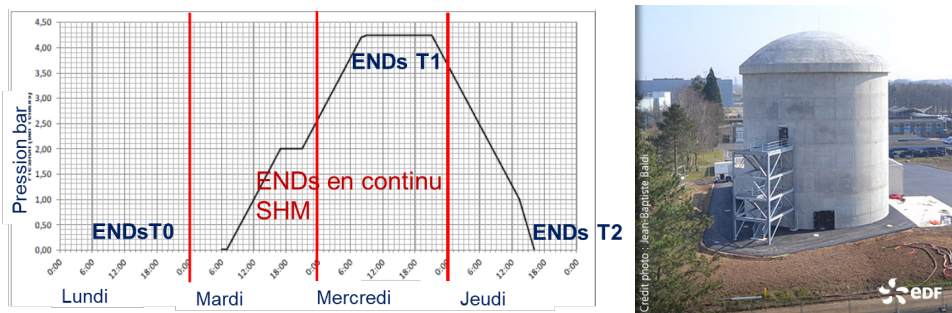


Figure 4. Cycle de mise en pression et maquette VeRCoRs

Les mesures ont été réalisées au début du cycle, à la pression maximale et à la fin du cycle sur 2 points. Les essais ont permis d'estimer l'évolution des ENds et de suivre les propriétés du béton. La figure 5 montre les évolutions du module d'élasticité dynamique de Juin 2016 à mars 2017 pour les points en bleu et lors du cycle de pression en rouge. Le suivi de la saturation dans le temps et a nécessité la prise en compte de l'évolution de la température entre les différentes séries de mesure.

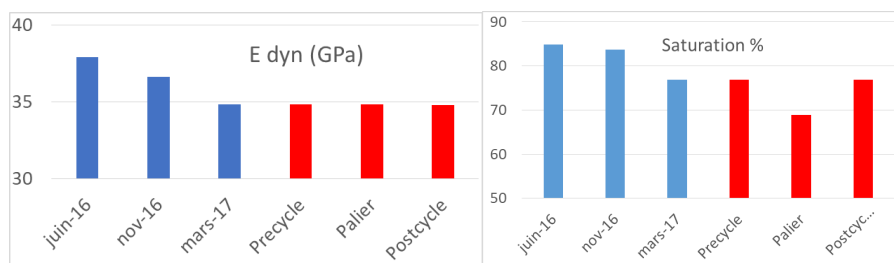


Figure 5. Evolution du module d'élasticité et de la saturation avec le temps puis la pression

Durant ces mêmes cycles de pression, la mise en œuvre d'un robot utilisant des ondes de surface a montré la possibilité de détecter les fissures en surface, celles en subsurface ainsi que de suivre leur ouverture sur la base de l'atténuation des ondes transmises [4]. Les ouvertures ont été corrélées par des mesures par fibre optique.

Transfert sur site

Enfin dans les prolongations 3 réalisations ont été développées pour assurer le transfert vers l'industrie. La figure 5 montre le robot précité utilisant des couples de transducteurs aériens qui propose une mesure automatique à des profondeurs pouvant atteindre 40 cm, une sonde par ondes de surface nomade utilisant des capteurs à pointes sèches, et d'un logiciel de fusion proposant l'intégralité d'un processus de fusion de données et de recalage de modèles de conversion pour les mesures en laboratoire et sur site.



Figure 5. Robot US par ondes de surface à traducteurs aériens / contacts secs, logiciel de fusion interactif

4. CONCLUSION

Le projet ENDE a permis de traiter toute la chaîne depuis le développement de scientifiques (acoustique non linéaire, Emission Acoustique, Perméabilité, Ondes diffuses, Modélisation) en laboratoire, puis sur site en gérant le transfert et enfin la production de produit à caractères industriels. Il a ouvert des voies de travail et d'application de R&D dans le nucléaire mais qui est transposable pour toutes structures.

Remerciements : Ce projet "Evaluation Non Destructive des Enceintes de confinement de centrale nucléaire » (ENDE) a été financé par l'ANR dans le cadre du PIA ANR-RSNR.

RÉFÉRENCES

- [1] Garnier V. and al, Projet C2D2-ACDC, Rapport final et annexes, mai 2014.
- [2] Balayssac J.P. and all Description of the general outlines of the French project SENSO – Quality assessment and limits of different NDT methods, CBM, Vol 35, October 2012.
- [3] Balayssac JP, Garnier V, Evaluation Non Destructive des ouvrages en génie civil, ISTE Press - Elsevier, Version française Mai, 2018.
- [4] Piwakowski B. and all, Non destructive non contact concrete evaluation by sound and ultrasound using an automated surface wave scanner, ICU, Bruges, Sept 2019.