

## A numerical clone for VeRCoRs mock-up

J. HAELEWYN<sup>a</sup>, P. SEMETE<sup>a</sup>, J-P. MATHIEU<sup>a</sup>, F. ESCOFFIER<sup>a</sup>, S. MICHEL-PONNELLE<sup>a</sup>, F. HAMON<sup>a</sup>, E. BUCHOUD<sup>a</sup>

a. EDF R&D jessica.haelewyn@edf.fr

### Résumé :

*La sûreté et la durée de vie des centrales nucléaires sont l'une des priorités d'EDF. Pour atteindre cet objectif, une maquette d'un bâtiment réacteur à échelle 1/3 a été construite près de Paris. Cette maquette, appelée VeRCoRs (VERification Réaliste du CONfinement des RéacteurS), est très instrumentée et son comportement est surveillé depuis le début de la construction.*

*L'un des objectifs est de comprendre l'évolution de l'étanchéité au cours du vieillissement. L'échelle de 1/3 permet d'accélérer les effets du séchage d'un facteur 9.*

*Afin de vérifier cette vitesse de vieillissement, un clone numérique de VeRCoRs est développé pour suivre la vie de la maquette. Ce modèle numérique est également nécessaire pour comprendre le vieillissement de la maquette en analysant des quantités non mesurables comme des contraintes.*

*Ensuite, lorsque le clone VeRCoRs sera validé, une maquette numérique à échelle réelle sera également développée pour comparer des clones les uns avec les autres. L'objectif est d'établir un inventaire des capacités de prédiction des clones sur les aspects thermiques, de séchage et mécaniques. Les résultats numériques sont comparés aux mesures disponibles pour le moment en termes de températures, de déformations et de déplacements. Enfin, une première idée de la représentativité de VeRCoRs est apportée.*

### Abstract :

*Safety and life extensions of Nuclear Power Plants are one of EDF priority. To pursue this objective, an experimental mock-up of a reactor containment building at 1/3 scale was built near Paris. This mock-up named VeRCoRs (VERification Réaliste du CONfinement des RéacteurS) is highly instrumented so that its behavior is monitored from the beginning of the construction.*

*One of the main objectives of the project is to understand leak tightness evolution under aging. Actually, at a 1/3 scale, drying effects will be nine times faster so studies of ageing speeded up.*

*In order to verify this aging speed up, a numerical clone of VeRCoRs is developed to follow its life. This numerical model is also necessary to understand ageing of the mock-up analysing non-measurable quantities as stresses.*

*Then, when VeRCoRs clone is validate, a numerical mock-up at real scale is also developed to compare clones with each other. The objective is to draw up an inventory of the prediction capacities of clones on the thermal, drying and mechanical aspects. Numerical results are compared to measurements carried out for now in terms of temperature, deformations and displacements. Finally, a first idea of VeRCoRs representativeness is drawn.*

**Mots clefs : ageing ; prestressed ; numerical clone ; reinforced concrete**

## 1 Introduction

La sûreté et la durée de vie des centrales nucléaires sont l'une des priorités d'EDF. Afin d'anticiper les effets du vieillissement des enceintes et préparer ainsi l'avenir du parc en exploitation, une maquette d'une enceinte de confinement à échelle 1/3 a été construite près de Paris.

La maquette VeRCoRs, pour VÉRification Réaliste du CONfinement des RéacteurS, est destinée à faire progresser les connaissances sur les mécanismes de vieillissement, sur l'évolution de l'étanchéité des enceintes et à apporter une démonstration de leur robustesse en situation accidentelle. L'intérêt de la maquette est de bénéficier d'une accélération des phénomènes par effet d'échelle. Le séchage du béton est accéléré d'un facteur 9 ainsi que le vieillissement qui en découle.

L'objectif de l'étude est de juger de l'état de représentativité de VeRCoRs par rapport aux enceintes du parc en vérifiant ce facteur d'accélération. Pour cela, on souhaite entre autres comparer les contraintes pour les deux échelles pour estimer dans les deux cas le risque de fissuration. Cette grandeur nécessite de comparer des modélisations puisqu'elle n'est pas fournie par les mesures. Pour cela, un clone numérique de la maquette est nécessaire. Celui-ci est validé par comparaison aux mesures de déplacements et de déformations de la maquette.

Le présent document présente les résultats des premières simulations numériques sur l'ensemble de la vie de VeRCoRs (2015 à 2021) et leur comparaison aux mesures disponibles sur la maquette.

## 2 Description de la maquette VeRCoRs

Le 1er juin 2016, EDF a inauguré la maquette d'enceinte VeRCoRs. Le chantier de construction de cette dernière a débuté en août 2013 sur le site R&D EDF Lab Les Renardières en Seine-et-Marne. Cette maquette de 5000 tonnes de béton dispose aujourd'hui de plus de 750 capteurs et d'environ 2 km de fibre optique pour mesurer la température, la déformation ou encore la teneur en eau du béton. Des milliers de données, collectées en temps réel, permettront de mieux comprendre le vieillissement du béton.

D'une hauteur d'environ 30 mètres pour un diamètre d'environ 16 mètres, elle dispose d'une taille unique au monde pour un objet de recherche. Elle possède les mêmes caractéristiques qu'une enceinte du parc en exploitation. La précontrainte est réalisée à l'aide de câbles de même type que sur les enceintes. Les sas principaux sont présents comme le Tampon d'Accès Matériel (TAM) ou le sas personnel.

Le béton n'est pas totalement mis à l'échelle afin d'être le plus représentatif possible d'un béton réellement utilisé lors de la construction des enceintes du parc d'EDF. L'effet d'échelle provoque donc un vieillissement accéléré et réaliste des matériaux d'un ouvrage grandeur nature. Cela va ainsi permettre de mieux comprendre et modéliser les phénomènes de vieillissement.

VeRCoRs subit les mêmes épreuves qu'une enceinte mais a une cadence accélérée, c'est-à-dire une mise en pression tous les ans alors que les épreuves d'enceinte ont lieu tous les dix ans. Lors de ces épreuves, le taux de fuite est mesuré. Ces épreuves permettent donc de suivre l'évolution de l'étanchéité du béton dans le temps et à terme de mieux la comprendre.

## 3 Démarche

La question abordée ici est celle de la représentativité de la maquette VeRCoRs à échelle 1/3 par rapport aux enceintes du parc EDF. Elle se pose en termes de vieillissement : la valeur théorique du facteur d'accélération du vieillissement, supposée égale à 9, est-elle obtenue réellement ?

La grandeur utile pour juger de cette représentativité est la contrainte, c'est elle qui pilote la fissuration. Cependant, elle n'est pas mesurable in-situ. La stratégie est donc de passer par l'intermédiaire de clones numériques qui pourront, à terme, être comparés à ceux des enceintes du parc. La première étape de ce travail est donc de créer et valider le clone de VeRCoRs (voir Figure 1).

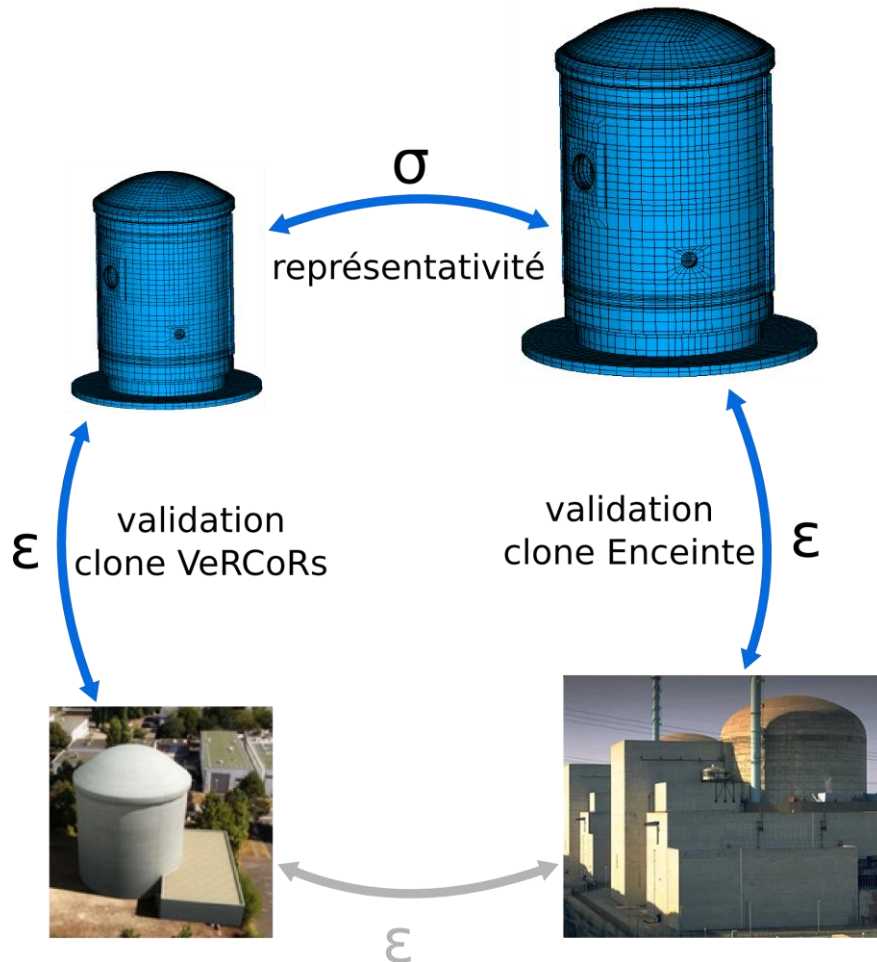


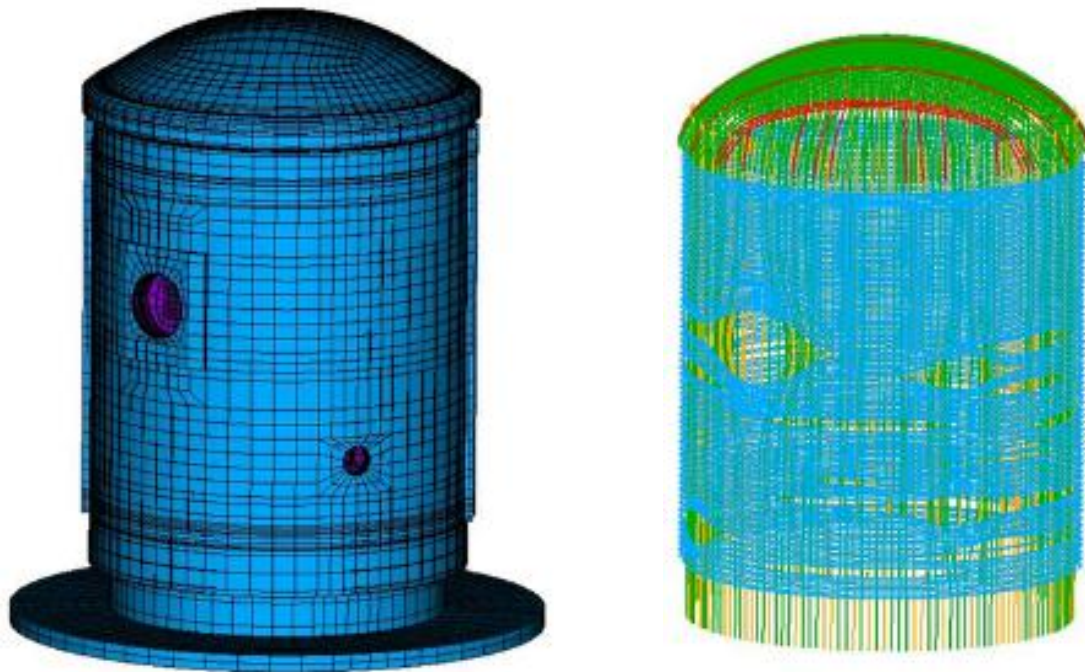
Figure 1: Stratégie envisagée pour évaluer la représentativité de VeRCoRs

## 4 Clone numérique

### 4.1 Modèle

Le modèle reproduit l'ensemble de l'enceinte interne, le radier et le piédestal. Ces parties sont représentées par des mailles hexaédriques. Le maillage est composé d'éléments quadratiques pour la partie mécanique des calculs et composés d'éléments linéaires pour les parties thermique et hydrique. Dans ce dernier cas, le maillage est raffiné près des parois afin de capter au mieux les gradients de teneur en eau. En partie courante, l'épaisseur est discrétisée en douze éléments de longueur comprise entre 2cm et 6cm. L'enceinte externe n'est pas représentée dans le cadre de cette étude, elle est utile pour la mesure de la fuite mais et n'a pas d'influence sur la tenue mécanique. Son influence est toutefois prise en compte au moyen des conditions aux limites imposée à l'enceinte interne. Les câbles de précontrainte sont tous modélisés par des barres de manière individuelle et en tenant compte des déviations au niveau des ouvertures. Les obturateurs des sas sont modélisés en trois dimensions pour correctement prendre en compte la fermeture des sas pendant les mises en pression.

Le maillage utilisé en thermique et hydrique est composé de 331962 nœuds et de 304928 hexaèdres linéaires. Le maillage utilisé en mécanique est composé de 211776 nœuds, de 40656 hexaèdres quadratiques et de 27428 barres.



**Figure 2: Maillage de référence de la maquette béton-sas et câbles de précontrainte**

Le calcul est réalisé avec Code\_Aster. Trois calculs transitoires sont réalisés de façon chaînée : thermique, hydrique et mécanique.

Le premier calcul est un calcul thermique linéaire utilisant des caractéristiques de béton classique. La maquette est soumise à des températures imposées en peau interne et externe de l'enceinte interne représentatives des températures relevées :

- En intrados : 15°C jusqu'à la mise en route du chauffage simulant la mise en route du réacteur, puis 35°C
- En extrados : 15°C

Le calcul suivant simule le séchage du béton. Le modèle de Granger [1] est utilisé et ces paramètres ont été recalés sur les données d'essai disponibles au moment de l'étude. Les conditions de séchage sont représentées par des concentrations en eau imposée en intrados et extrados :

- En intrados : 100% d'humidité jusqu'à l'arrêt de l'arrosage puis 60% jusqu'à la mise en route du chauffage et enfin 25%.
- En extrados : 100% d'humidité jusqu'à l'arrêt de l'arrosage puis 60%.

Le calcul mécanique est un calcul non-linéaire utilisant pour le béton la loi de fluage BETON\_BURGER\_FP [2] qui intègre les retraits endogène et de dessiccation, le fluage propre et le fluage thermique. Les paramètres de cette loi ont été recalés sur 6 mois d'essais de fluage propre unidimensionnels.

Le calcul débute par une phase de mise en tension des câbles de précontrainte. Ils sont tendus en suivant le phasage du chantier.

Ensuite, le calcul de vieillissement se poursuit entrecoupé tous les ans d'une mise en pression de l'enceinte interne afin de simuler les épreuves de VeRCoRs (7 épreuves sur 7 ans environ). La surface inférieure du piédestal de l'enceinte est encastrée pendant toute la durée du calcul et une pression allant jusqu'à 4.2 bars est appliquée en peau interne pendant les épreuves.

Le temps de calcul pour les parties thermique et hydrique est de 13h environ et de 4 jours environ pour la partie mécanique en séquentiel (version 12.4 de Code\_Aster). Les versions suivantes de Code\_Aster et le calcul parallèle permettent de gagner en performance. La faible performance de la partie mécanique est principalement due au nombre de multiplicateurs de Lagrange entre les câbles et le béton (183516 couples sur 818844 degrés de libertés au total). La matrice tangente a un taux de remplissage très faible de 0.017%.

## 4.2 Résultats

Vu le nombre de capteurs de la maquette, le post-traitement doit être automatisé. Pour cela, la réalisation des études de VeRCoRs est accompagnée du développement d'une plateforme de calcul ARMORIC<sup>1</sup> permettant l'automatisation des calculs et des post-traitements.

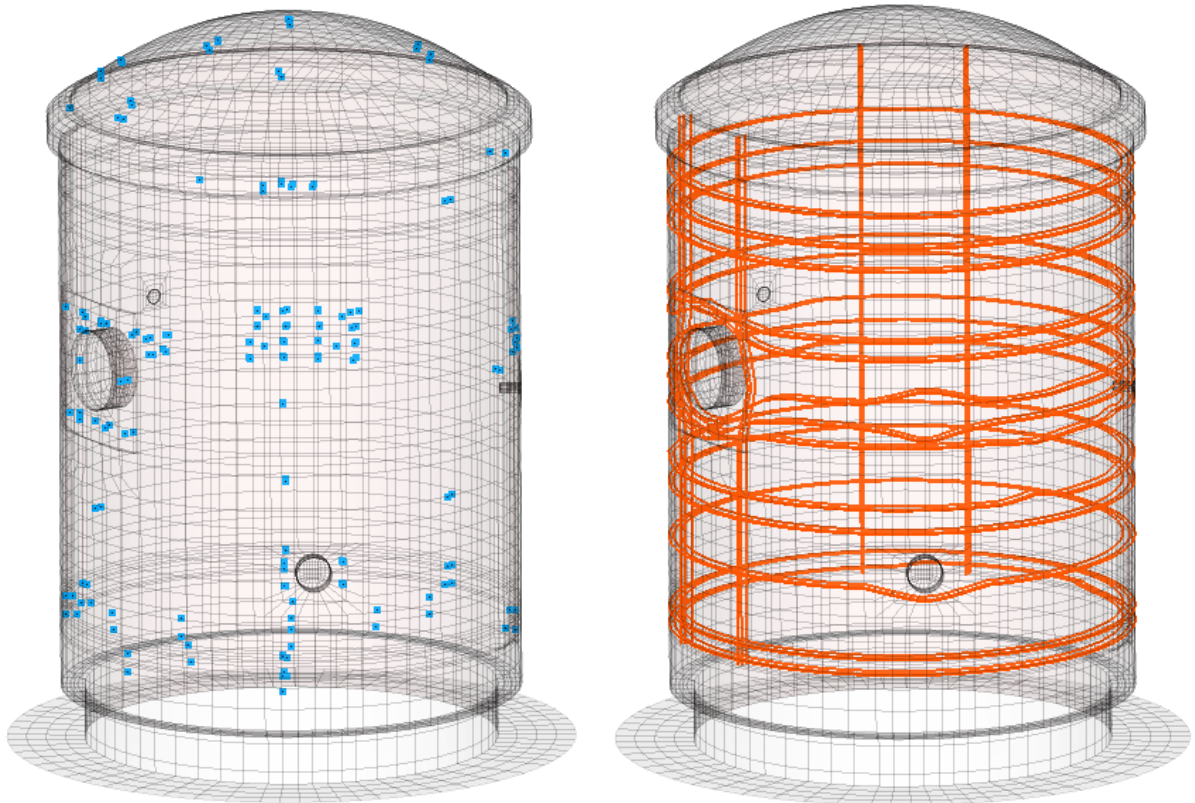
Plus précisément, les résultats du calcul complet sont d'abord projetés sur des maillages de points ou de lignes représentant les capteurs de VeRCoRs. Ainsi, les résultats du calcul peuvent être directement comparés aux mesures. Par exemple, les déformations calculées peuvent être directement comparées aux mesures par cordes vibrantes.

Trois zones d'intérêt ont été examinées :

- la zone PACAR située en partie courante de fût, partie fortement instrumentée,
- la zone autour du Tampon d'Accès matériel (TAM),
- le gousset.

---

<sup>1</sup> Plateforme ARMORIC : Analysis, Research & MOdelling for Reactors Improvement of Containment capacity.



**Figure 3 : Exemple de maillages de capteurs : Cordes vibrantes (gauche) et Fibres Optiques (droite)**

En ce qui concerne la température, comme on pouvait s'y attendre avec des conditions limites relativement simplifiées, on observe des différences entre les résultats du calcul et des mesures (Figure 4 et Figure 5). Les oscillations observées sur les mesures sont dues aux cycles annuels de température qui ne sont pas représentés dans le modèle numérique. Cependant, les deux paliers de température sont globalement représentatifs du champ de température moyen.

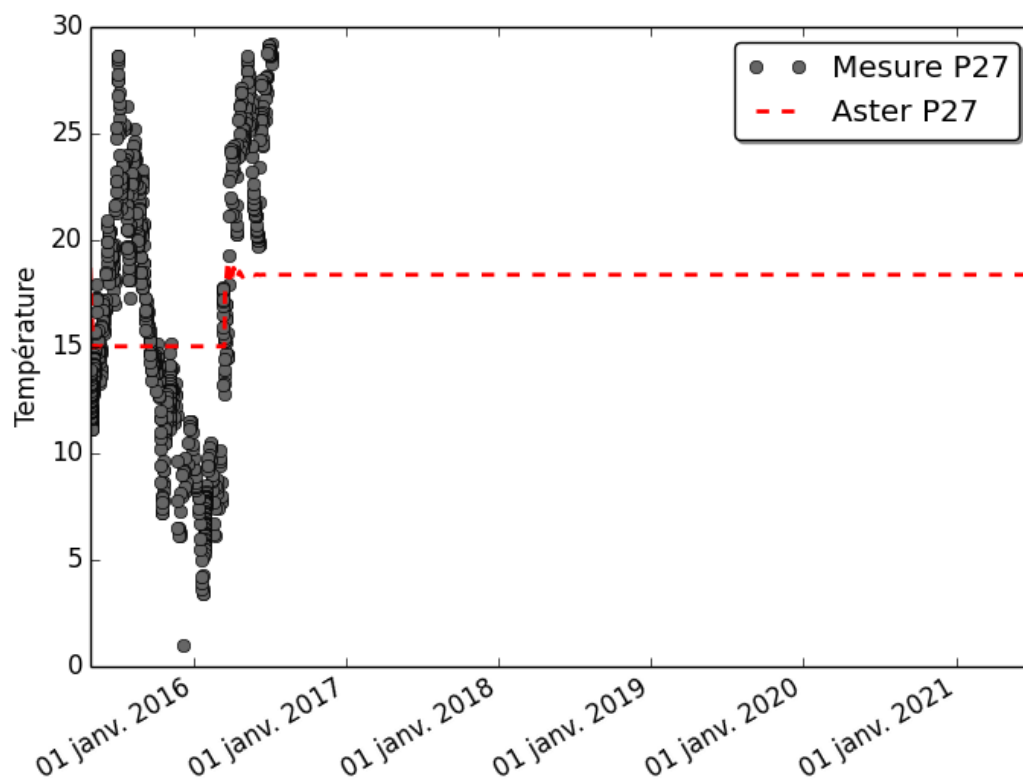


Figure 4 : Comparaison des températures mesurées et calculées près du bord extrados

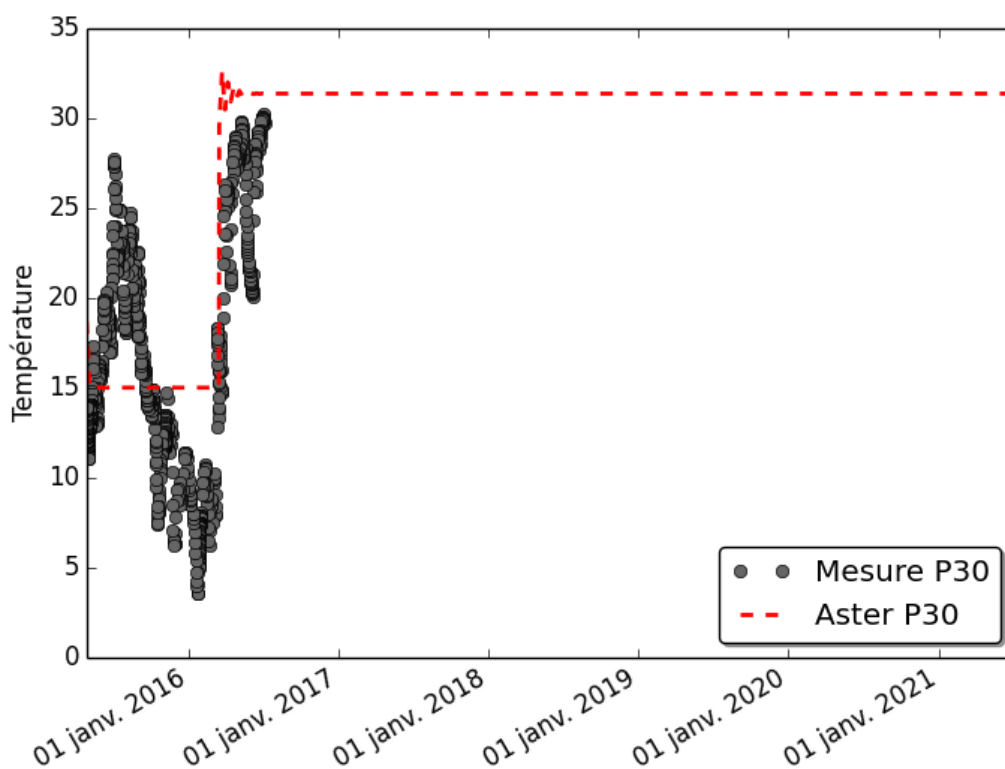
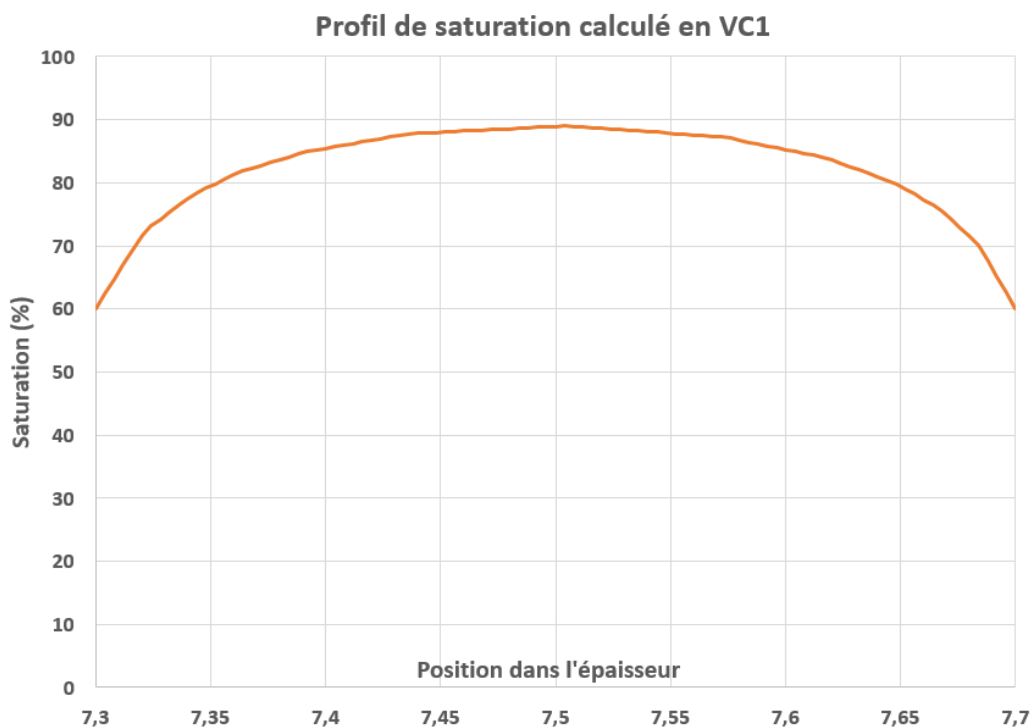


Figure 5 : Comparaison des températures mesurées et calculées près du bord intrados

En termes de séchage, les mesures de teneur en eau disponibles sont encore peu nombreuses. Elles donnent une saturation du béton encore très élevée au moment de la mise en route du chauffage (mars

2016) autour de 0.98 à cœur. Le calcul montre un séchage beaucoup plus important avec une saturation de 0.85 à cœur juste avant le chauffage (Figure 6). On peut donc anticiper un vieillissement trop rapide du clone vis-à-vis du comportement réel de la maquette.



**Figure 6 : Profil de saturation calculé juste avant chauffage dans l'épaisseur à mi-fût**

En termes de déformations, seules les mesures par cordes vibrantes ont pu être exploitées. Le calcul est globalement en accord avec les mesures, cependant, un écart sur la vitesse de fluage est observé. Entre la mise en précontrainte et le début du séchage, la vitesse de fluage observée expérimentalement est relativement faible et est surestimé par le modèle. Après chauffage, les cinétiques de fluage paraissent en meilleur accord (Figure 7 et Figure 8). Cette amélioration de la cinétique après chauffage devra être vérifiée avec l'arrivée de nouvelles mesures.



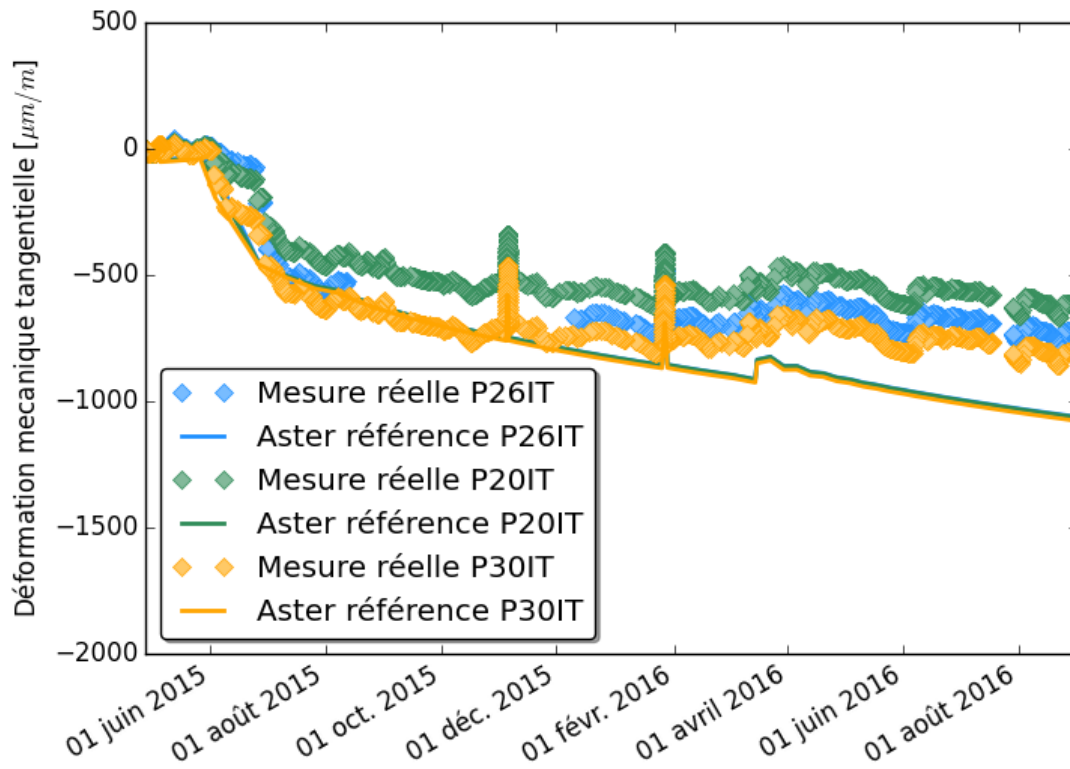


Figure 7 : Comparaison des déformations tangentielles mesurées et calculées en zone courante intrados.

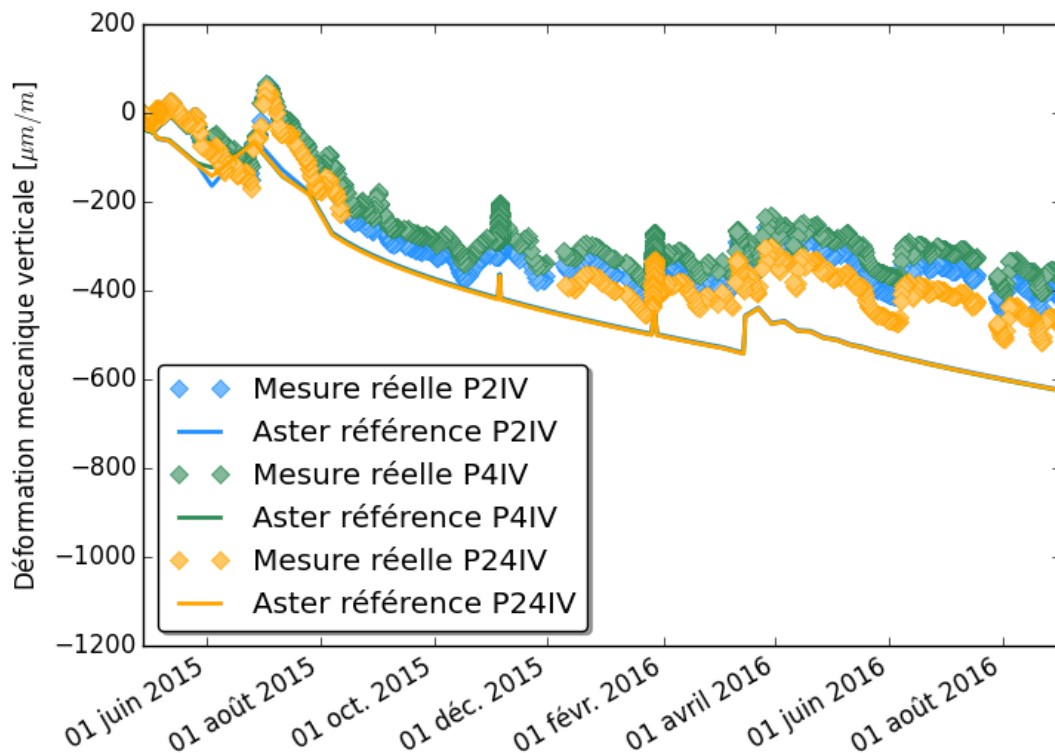


Figure 8 : Comparaison des déformations verticales mesurées et calculées en zone courante intrados.

De plus, les comparaisons montrent qu'un effort est à faire concernant la modélisation des conditions aux limites thermiques et hydriques. Elles devront être réactualisées en utilisant les dernières valeurs disponibles.

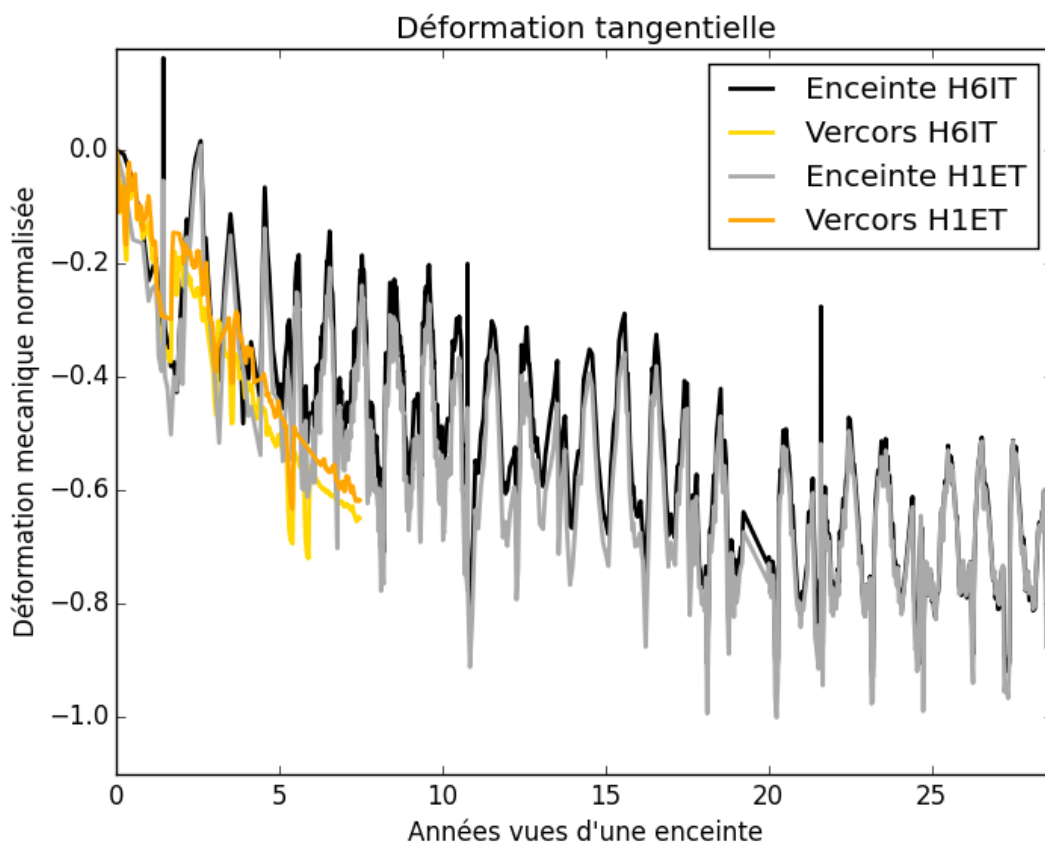
L'axe principal d'amélioration est évidemment une meilleure identification des paramètres de séchage et de la loi de fluage. Ces paramètres doivent être ré-identifiés en utilisant des essais prolongés sur une durée plus longue afin d'être plus représentatif (notamment fluage propre) mais aussi de nouveaux essais actuellement en cours tel que le fluage en température ou des essais de fluage séchant.

Il est à noter qu'un travail important reste à faire sur l'analyse des mesures. Comme on peut le voir sur la Figure 7, trois capteurs relativement proches donnent des mesures assez écartées. Il est nécessaire de comprendre ces écarts afin de savoir si ce sont des incertitudes de mesures ou des différences de comportement.

## 5 Premiers éléments de représentativité

Actuellement, seul le clone de VeRCoRs est disponible et les premiers éléments de représentativité ne peuvent être fournis que par des comparaisons sur des mesures.

En attendant le clone d'une enceinte du parc, on présente ici une comparaison VeRCoRs avec une enceinte du Parc représentative en termes de déformation. Le temps pour la représentation des déformations de VeRCoRs est mis à l'échelle (x9). On peut voir que l'ordre de grandeur est respecté entre les deux enceintes et que la cinétique de fluage semble comparable (Figure 9).



**Figure 9 : Comparaison des mesures de VeRCoRs et d'une enceinte du Parc : déformations tangentielles en intrados (H6IT) et en extrados (H1ET)**

## 6 Conclusion

Pour conclure, un premier clone numérique de VeRCoRs est disponible avec tous les outils de post-traitement nécessaires développés dans la plateforme ARMORIC. Les comparaisons avec les mesures montrent un vieillissement plus rapide du clone. Celui-ci est principalement dû au séchage et au fluage

dont les cinétiques ont été surestimées. Une meilleure identification des paramètres des modèles sur de nouveaux essais devrait permettre un meilleur recalage sur les mesures.

Il faut souligner que le nombre important de mesures nécessite encore une analyse plus fine que ce qui a été fait jusqu'ici.

Enfin, les premières comparaisons avec des mesures sur enceinte semblent montrer une bonne représentativité de VeRCoRs en termes de vitesse de vieillissement.

## Références

[1] L. Granger. Comportement différé du béton dans les enceintes de centrales nucléaires, Analyse et modélisation, 1996, Thèse du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

[2] A. Foucault. Relation de comportement BETON\_BURGER\_FP pour le fluage propre du béton. Documentation de référence de Code\_Aster. R7.01.35