Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht

Band: 13 (1988)

Artikel: Surveillance des enceintes nucléaires

Autor: Rousselle, Henri / Dubs, Claude

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-13012

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 29.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Surveillance des enceintes nucléaires

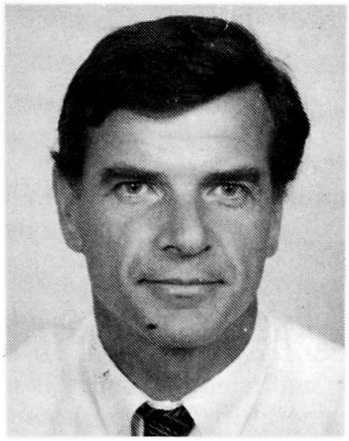
Überwachung von Sicherheitshüllen

Supervision of Nuclear Confinement Vessels

Henri ROUSSELLE
Ingénieur Auscultation
Electricité de France
Lyon, France

Henri Rousselle, né en 1945, est diplômé de l'E.N.S.M. de Nantes. Après s'être occupé d'auscultation de barrages pendant une dizaine d'années. I est actuellement responsable du Centre d'Auscultation Nucléaire de Lyon qui a en charge l'ensemble du parc nucléaire d'Electricite de France.

Claude DUBS
Ingénieur étanchéité
Electricité de France
Lyon, France



Claude Dubs, né en 1943, obtient ses diplômes à Strasbourg (T.S. Electrotechnique) et à Mulhouse (C.N.A.M.). Il s'occupe de conception et d'essais dans différents services, notamment pour la construction des centrales nucléaires de Bugey et Creys-Malville. Depuis 1983, il dirige la réalisation des essais d'étanchéité des enceintes nucléaires.

RÉSUMÉ
Electricité de France exploite un parc d'une quarantaine de tranches nucléaires à eau pressurisée; la protection de l'environnement en cas d'accident majeur est assurée notamment par une enceinte en béton précontraint: celle-ci doit conserver ses caractéristiques mécaniques et une bonne étanchéité sous l'effet de cette sollicitation. L'exposé montre les résultats généraux obtenus dans la surveillance de ces ouvrages lors des contrôles périodiques et permanents.

ZUSAMMENFASSUNG
Electricité de France betreibt circa vierzig Kernkraftwerksblöcke mit Druckwasserreaktoren. Der Umweltschutz im Fall eines Unfalls größeren Ausmaßes wird hauptsächlich durch eine Spannbetonhülle gewährleistet: diese Hülle muß, im Fall einer derartigen Beanspruchung, ihre mechanischen Eigenschaften und eine gute Undurchlässigkeit bewahren. Der Vortrag stellt die allgemeinen Ergebnisse dar, die aus der Überwachung dieser Vorrichtungen, mittels regelmäßiger und ständiger Kontrollen, hervorgegangen sind.

SUMMARY
Electricité de France operates around forty pressurized-water nuclear reactors; environmental protection in the event of a major accident is ensured most particularly by a prestressed concrete vessel: this vessel must be capable of retaining its mechanical characteristics and an efficient seal while subjected to these stresses. The paper illustrates the general results obtained in the supervision of these constructions during periodic and ongoing inspection processes.

1. INTRODUCTION

A la fin de l'année 1987, ELECTRICITE DE FRANCE exploite un parc de 44 tranches nucléaires à eau préssurisée -34 tranches de 900 MW et 10 tranches de 1300 MW- alors que 12 tranches de 1300 MW sont en construction. En cas d'accident majeur, la protection de l'environnement est assurée notamment par une enceinte en béton précontraint qui doit conserver ses caractéristiques mécaniques et une bonne étanchéité sous l'effet des sollicitations créées par la pression voisine de 5 bar absolus qui régnerait alors à l'intérieur de celle-ci. Elle constitue la 3ème barrière après la gaine du combustible et le circuit primaire principal.

Les tranches de 900 MW sont constituées d'une simple enceinte de 39 m de diamètre extérieur, 65 m de hauteur et 0,90 m d'épaisseur en partie courante du fût. Une peau métallique assure l'étanchéité. Celles du palier 1300 MW sont construites avec une double enceinte sans étanchéité métallique mais avec reprise des fuites indirectes dans l'espace entre enceinte. L'enceinte interne a un diamètre de 46 m, une hauteur de 66 m et l'épaisseur en partie courante du fût est selon le type considéré de 0,90 ou 1,20 m.

Des contrôles en fin de construction puis périodiquement et en permanence pour certains, sont donc réalisés afin de vérifier si l'enceinte répond aux critères d'étanchéité requis par la Sûreté Nucléaire et si elle conserve ses caractéristiques mécaniques sous l'effet des sollicitations dues à la pression d'une part et en fonction du temps d'autre part.

Le dispositif d'auscultation a donc été étudié de façon à pouvoir contrôler les déformations locales de l'enceinte, son état thermique, les déplacements d'ensemble de la structure et les variations de tension des câbles de précontrainte lors des essais de mise en pression ainsi que, pendant toute la durée d'exploitation de la centrale, pour suivre les évolutions à long terme. Il est constitué par :
- des extensomètres à corde vibrante,
- des thermocouples,
- des pendules qui mesurent les déplacements horizontaux selon quatre génératrices à trois niveaux différents,
- des fils invar horizontaux et verticaux,
- un système de nivellement hydraulique noyé dans le radier,
- un système de nivellement direct dans la galerie basse du radier,
- des dynamomètres équipant quatre câbles verticaux injectés à la graisse.

La méthode de mesure du taux de fuite (le taux de fuite est la variation relative de la masse de gaz contenue dans l'enceinte par unité de temps) est basée sur l'application pratique de l'équation des gaz parfaits qui établit une relation mathématique entre la masse d'une quantité de gaz, le volume qu'elle occupe, sa pression et sa température. Les résultats sont obtenus avec une précision tout à fait étonnante, de l'ordre de quelques Nm^3/h de débit de fuite sur un volume total de 250000 à 400000 Nm^3, compte tenu des difficultés inhérentes à la mesure avec précision et une bonne représentativité de toutes les grandeurs physiques entrant dans ces résultats. Ainsi, par exemple les variations de la température moyenne doivent être mesurées à quelques centièmes de °C près dans un bâtiment cloisonné de plus de 50000 m^3 où les différences de température entre le bas et le haut (60 m) peuvent atteindre plusieurs °C.

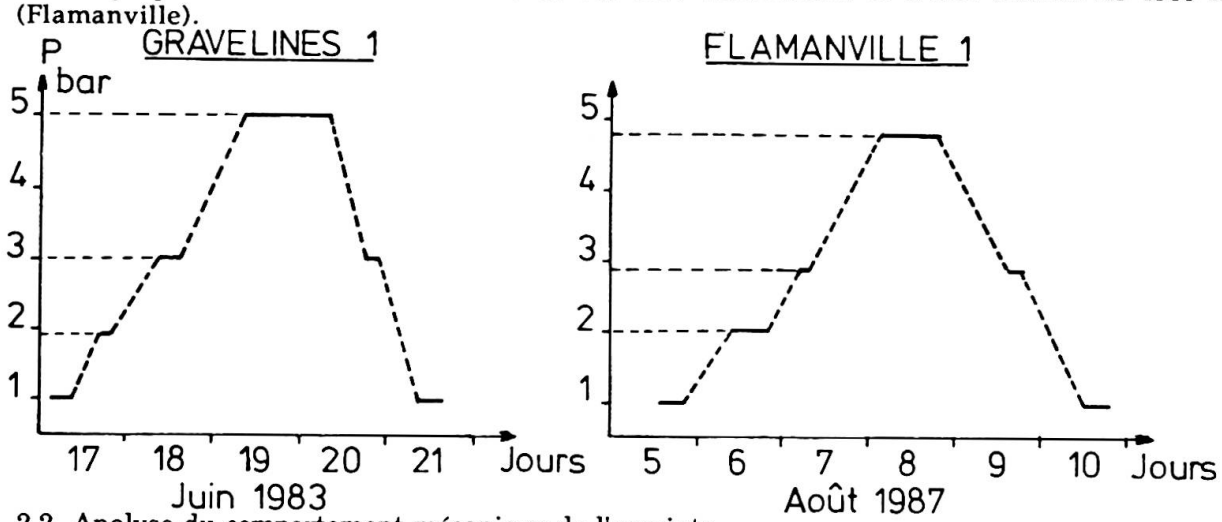
Deux systèmes complémentaires sont utilisés. Le premier permet de s'assurer, tous les dix ans, de la bonne qualité de l'étanchéité de l'enceinte dans les conditions équivalentes à l'accident de référence, le second vérifie uniquement, mais en permanence, la bonne configuration des "portes" de cette 3ème barrière.

2. CONTROLES PERIODIQUES PAR MISE EN PRESSION DE L'ENCEINTE

Un premier contrôle -essai préopérationnel- réalisé à la fin de la construction de l'enceinte avant sa mise en service constitue l'essai de reception de celle-ci. Le même type de contrôle est ensuite réalisé tous les dix ans, le premier d'entre eux intervenant au moment du premier rechargement du réacteur en combustible, soit approximativement deux à trois ans après l'essai préopérationnel. Fin 1987, 88 essais ont été réalisés, 66 dont 34 préopérationnels pour les tranches du palier 900 MW et 22 dont 16 préopérationnels pour les tranches du palier 1300 MW.

2.1 Déroulement d'un essai

A titre d'exemple, on présente ci-après les diagrammes de la variation de la pression interne en fonction du temps pour un essai d'une tranche de 900 MW (Gravelines) et d'une tranche de 1300 MW (Flamanville).



2.2 Analyse du comportement mécanique de l'enceinte

Les mesures d'auscultation réalisées lors des différents paliers de gonflage et de dégonflage permettent de vérifier la linéarité et la réversibilité des déformations sous l'effet des variations de pression. Lors de l'essai préopérationnel, on vérifie également la concordance des résultats des mesures avec ceux déterminés par les études. Les résultats des essais en exploitation sont analysés par comparaison avec ceux des essais précédents de la même tranche ainsi qu'avec ceux des tranches identiques du même site et ceux des tranches de même type des autres sites.

2.3 Contrôle de l'étanchéité de l'enceinte

Le système comporte plus de soixante dix capteurs de haute précision dont soixante capteurs de température protégés contre les effets de paroi (rayonnement), dix hygromètres au chlorure de lithium et deux capteurs de pression de très haute précision (10^{-4}) dont la cellule de mesure est maintenue à température constante. Pour réaliser régulièrement (tous les quarts d'heure) les mesures sur ces capteurs et effectuer les très nombreux calculs nécessaires, on fait appel à une chaîne d'acquisition automatique comprenant un voltmètre numérique de précision, un scanner et un calculateur pilotant cet ensemble et ses périphériques. La méthode de mesure, l'emplacement des capteurs et l'installation d'essai ont fait l'objet d'une étude spécifique et une procédure unique d'essai a ensuite été définie pour chaque type d'enceinte. Des mesures du taux de fuite sont réalisées aux différents paliers de pression précédant le palier nominal, permettant en cas de défauts graves, un retour rapide à la pression nominale. A la pression d'essai, le palier de mesure dure entre 15 heures (1300 MW) et 24 heures (900 MW) si les variations des paramètres sont faibles et stabilisées. En effet, on constate que les estimations du taux de fuite sont plus précises en fin de palier de mesure, lorsque les hétérogénéités de la température et de l'hygromètrie de l'air, dues au gonflage, se sont estompées.

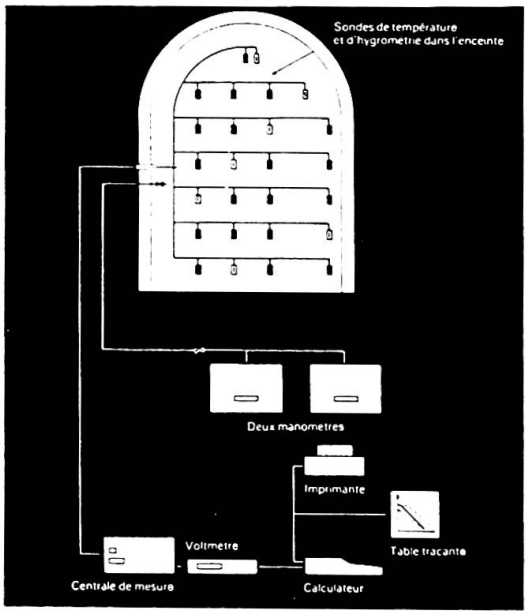


Schéma du dispositif de mesure du taux de fuite

Le critère d'étanchéité a été déterminé en prenant en compte notamment la température (très différente entre l'essai : quelques dizaines de °C, et l'accident : quelques centaines de °C)et le vieillissement du béton. Pour les enceintes simples à peau métallique type 900 MW, le taux de fuite doit être inférieur à 0,165%/j soit un débit de fuite de 16 Nm^3/h. Pour les enceintes doubles sans peau métallique type 1300 MW, le taux de fuite doit être inférieur à 1%/j, soit un débit de fuite de 150 Nm^3/h. A noter que cette dernière valeur est directement liée à la capacité de traitement du système de reprise des fuites dans l'entre-enceinte.

Par ailleurs, l'ensemble des traversées mécaniques et électriques de l'enceinte sont testées individuellement par mise sous pression avant l'épreuve globale, pour s'assurer de leur qualité individuelle et pour connaître la valeur du taux de fuite directe des enceintes doubles.

3. CONTROLES EN EXPLOITATION COURANTE

3.1 Contrôle du comportement mécanique

A partir de l'essai préopérationnel, les mesures d'auscultation sont faites une fois par trimestre sur l'ensemble du dispositif, sauf les mesures de nivellement direct qui sont réalisées en général une fois par an, de façon à contrôler les évolutions de l'ouvrage dans le temps.

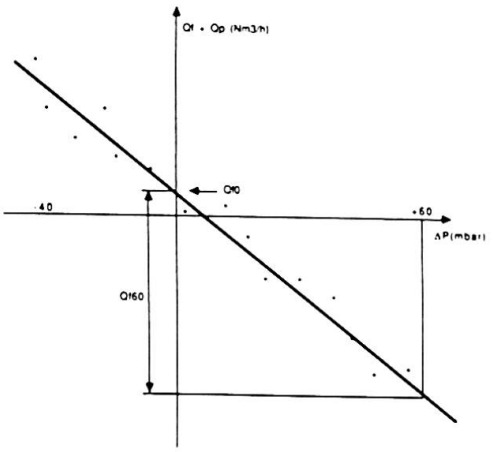
L'interprétation des résultats repose sur la comparaison du comportement actuel de l'ouvrage à celui du passé considéré comme normal; l'état de référence est celui observé lors de l'essai préopérationnel. L'expérience montre que les mesures brutes réalisées sur les enceintes résultent de la superposition de trois états principaux théoriquement indépendants :

- un état irréversible correspondant à une évolution du phénomène dans le temps, évolution qui peut avoir tendance à s'amortir (adaptation ou consolidation) ou à s'accélérer (dégradation),
- un état réversible correspondant à l'effet de la pression interne,
- un état réversible lié à la répartition des températures dans l'ouvrage,

auxquels il y a lieu cependant d'ajouter les erreurs expérimentales ainsi que les effets de toutes les autres causes secondaires que l'on néglige par simplification. Lorsqu'on dispose d'un échantillon de mesures suffisant (environ une trentaine), on réalise un traitement statistique qui consiste à rechercher le modèle de comportement permettant de séparer la part irréversible du phénomène observé de la part réversible.

3.2 Contrôle du débit de fuite en fonctionnement

Le système de contrôle en exploitation et en continu sous très faible pression (0 à quelques dizaines de mbar) utilise une version allégée du système de contrôle périodique (une dizaine de capteurs seulement) et un traitement mathématique des données différent, qui intègre des temps de mesures beaucoup plus longs. De telles mesures, déjà très difficiles à réaliser dans un bâtiment réacteur à l'arrêt, semblaient a priori pratiquement irréalisables dans une enceinte en exploitation, notamment en raison des variations importantes des températures et de l'hygromètrie induites par le fonctionnement du réacteur. Du fait des fuites d'air comprimé des actionneurs, la pression dans l'enceinte s'élève lentement jusqu'à sa valeur maximale d'exploitation. Il y a alors rejet, après contrôle, à l'atmosphère. La pression de l'enceinte varie selon une courbe en "dents de scie". La durée d'un cycle est d'environ 20 jours . L'analyse de la courbe d'évolution du débit de fuite en fonction de cette pression effective permet de donner un diagnostic complet de la configuration de l'enceinte.



Courbe Qfj = f (ΔPj)(cycle de pression enceinte)

4. PRINCIPAUX RESULTATS

4.1 Essai de mise en pression de l'enceinte

4.1.1 Comportement mécanique

Pour un même type d'enceinte, l'ensemble des résultats obtenus présente une très bonne homogénéité et les écarts observés, pour une tranche donnée, entre les résultats de l'essai préopérationnel et ceux du premier essai en exploitation ne montrent pas de différence de comportement significative sous l'effet des variations de pression. Par ailleurs, la linéarité et la réversibilité des phénomènes ont toujours été mises en évidence.

On trouvera ci-dessous, pour chaque type d'ouvrage, les ordres de grandeur des variations des paramètres les plus caractéristiques pour la pression nominale :

	Enceinte 900 MW	Enceinte 1300 MW
- Augmentations de diamètre (mm)		
. en partie supérieure du fût	de 5 à 7	de 5 à 7
. au deux tiers de la hauteur	de 9 à 12	de 9 à 14
. au tiers de la hauteur	de 8 à 9	de 9 à 11
. du radier	négligeable	négligeable
- déformations locales (µm/m)		
. à mi-hauteur du fût : circonférencielles	de 200 à 220	de 220 à 270
verticales	de 60 à 80	de 60 à 100
- flèche du radier (mm)		
entre le centre et la périphérie	de 3 à 6	de 2 à 4

D'autre part, les variations de tension des câbles de précontrainte verticaux sont dans l'ensemble très modiques, inférieures à 50 kN pour chaque type d'enceinte.

4.1.2 Mesure du taux de fuite

L'incertitude obtenue sur le calcul de taux de fuite est de 0,005 %/j à 0,02 %/j soit de l'ordre du Nm^3/h. Le calcul des incertitude de mesure s'appuie sur une étude particulière qui révèle que la précision des mesures dépend non seulement des caractéristiques métrologiques des capteurs et appareils de mesure, mais surtout des conditions de température et d'hygrométrie régnant dans l'enceinte au moment de l'essai. Un phénomène parasite vient également perturber la mesure ; il s'agit de l'engazage, ou retard à la mise en pression, du béton et des structures qui se poursuit en se réduisant pendant le palier de mesure. La détermination de la durée des paliers tient compte de ce phénomène qui conduit à donner une valeur de fuite par excès. Les résultats annoncés sont donc conservatifs vis à vis de la sûreté.
Pour les enceintes simples à peau métallique, le critère est toujours respecté, mieux encore les taux de fuite sont en général au moins quatre à cinq fois plus faibles et souvent de l'ordre de grandeur de l'incertitude. Les seules exceptions ayant momentanément conduit à un résultat hors critère , provenaient d'un défaut de traversée mécanique. Dans ce cas, la précision de la méthode permet une localisation rapide du défaut et son élimination avant la fin de l'essai.

Pour les enceintes doubles, les résultats se situent généralement légèrement sous le critère. Il est remarquable de constater que l'on arrive à construire des enceintes sans peau d'étanchéité à ce niveau de qualité. Ce dernier exige une mise en oeuvre du béton tout à fait particulière faisant entre autre appel à un système de contrôle de l'étanchéité des reprises à l'avancement et à leur injection éventuelle. Néanmoins, sur certains sites la "porosité " trop importante des parois a nécessité la mise en place d'une étanchéité complémentaire sous forme d'un enduit résine sur le parement interne. Des investigations supplémentaires ont été réalisées pour améliorer la connaissance des chemins de fuites et se rapprocher plus encore des conditions accidentelles. Il s'agit de la mesure du taux de fuite après immersion totale du bas de l'enceinte (cas de rupture du circuit primaire). Les résultats sont sensiblement améliorés de l'ordre de 10 à 20 %.

4.2 Evolution des paramètres en fonction du temps

4.2.1 Comportement mécanique

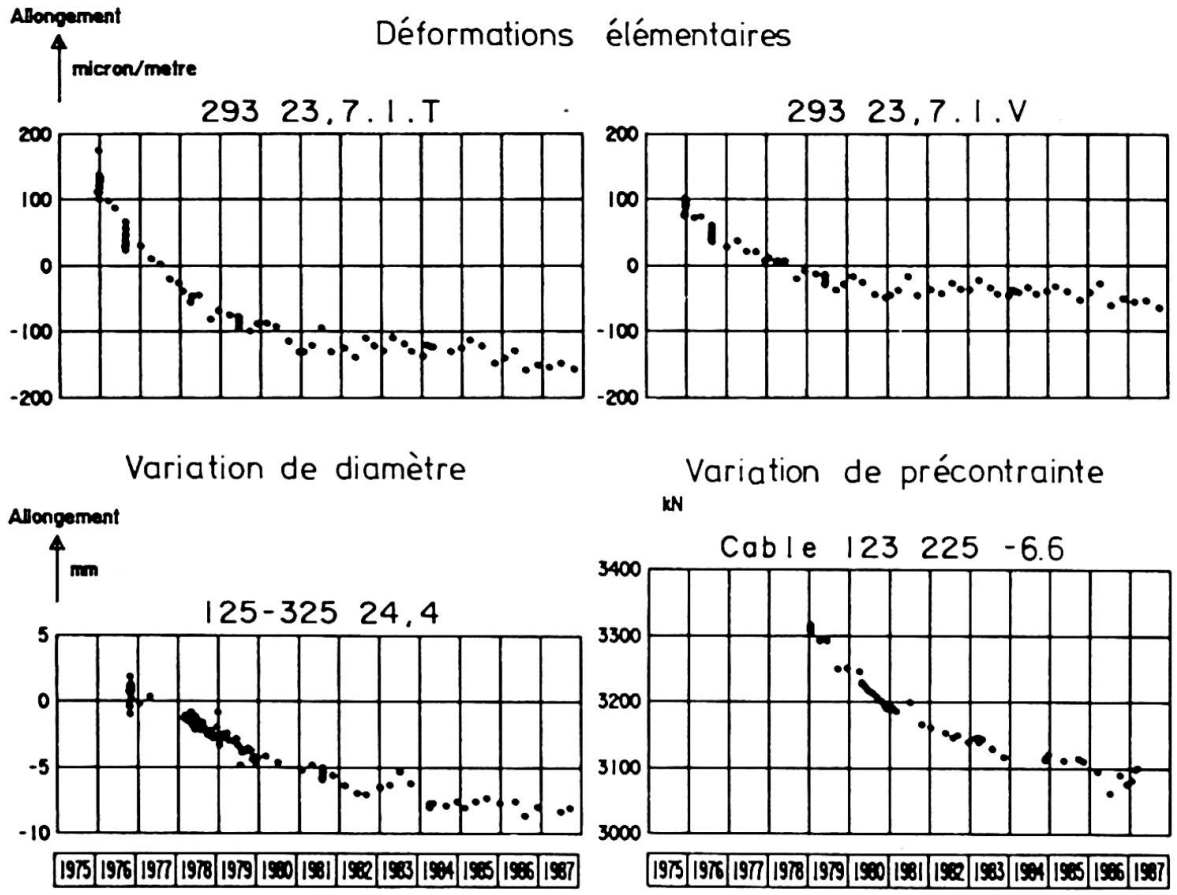
Le comportement des enceintes qui reste très directement comparable d'un ouvrage à l'autre est caractérisé par des raccourcissements de la plupart des grandeurs mesurées. Ils sont dus essentiellement aux phénomènes de retrait et fluage du béton qui se manifestent plus particulièrement au cours des cinq à six premières années de la vie de l'ouvrage. L'expérience acquise à ce jour montre qu'au-delà, ces évolutions sont nettement ralenties et tendent souvent vers un amortissement complet.

De la même façon, en ce qui concerne la précontrainte, on observe logiquement une diminution de la tension initiale due au retrait et au fluage du béton ainsi qu'au phénomène de relaxation de l'acier. Ces évolutions qui s'amortissent également après cinq à six ans d'exploitation sont toujours restées en-deçà des valeurs maximales admises par les notes de calcul.

Par ailleurs, les tassements de l'enceinte, dont la connaissance est importante pour juger des déplacements relatifs avec les autres bâtiments de l'ilôt nucléaire qui sont également contrôlés, varient évidemment d'un site à l'autre en fonction de la nature du sol de fondation et s'accompagnent parfois d'un léger basculement.

On donne ci-après les amplitudes des évolutions caractéristiques observées sur les premières enceintes de 900 MW dont les essais préopérationnels ont été réalisés de 1975 à 1979 ainsi que quelques exemples de graphiques de surveillance.

- diminutions de diamètre (mm)				
. en partie supérieure du fût	de	6	à	8
. au deux tiers de la hauteur	de	8	à	10
. au tiers de la hauteur	de	8	à	10
. du radier	de	2	à	3
- déformations locales (µm/m)				
. dans le radier : radiales et circonférencielles	de	30	à	50
. à mi-hauteur du fût circonférencielles	de	200	à	300
verticales	de	130	à	250
- diminution de la tension de précontrainte (kN)	de	150	à	200



4.2.2 Contrôle de l'étanchéité

Il n'y a pas d'évolution notable des taux de fuite entre le premier et le second essai de mise en pression. (1ère épreuve décennale en 1989).
En ce qui concerne la Surveillance en continu en Exploitation du Taux de fuite des ENceintes, le système appelé SEXTEN est installé ou en cours d'installation sur toutes les centrales. Ce système est sollicité chaque fois qu'il détecte automatiquement une augmentation anormale des fuites. Un programme spécifique de recherche de fuite est alors utilisé qui permet, grâce à sa sensibilité, une recherche rapide du défaut de configuration et un retour à l'exploitation normale. Ce système double, avec plus d'efficacité, la méthode dite "manuelle" déjà en place depuis la divergence.