

TWO, THREE AND FOUR BUTTRESSED PWR CONTAINMENT VESSELS A COMPARATIVE STUDY

C. J. DUFOUR, M. H. CHEYREZY, N. E. THORSEN

*Nuclear Department, Traction et Electricité,
31, Rue de la Science, B-1040 Bruxelles, Belgium*

SUMMARY

The purpose of the paper is to analyse the advantages and drawbacks of different arrangements of hoop tendons and buttresses for a PWR containment vessel. It is shown that the solution with two buttresses and full hoop tendons (through 360°) gives:

- acceptable secondary stresses and strains,
- a lower total cost of the prestressing,
- a shorter time schedule for prestressing operations,
- a smaller "forbidden area" for the penetrations lay out.

This arrangement has been used for the first time (to our knowledge) in PWR containment design for the nuclear plant of DOEL III, Belgium.

The comparative study has been carried out for a containment vessel with a 85 cm thick wall and an interior diameter of 42.50 m. The Guaranteed Ultimate Tensile Strength of the tendons is 9000 KN. The minimum required prestressing force is 10 300 KN per linear meter of height. The buttresses are 4.0 m long and 1.70 m thick on their vertical centerline. The following arrangements have been studied:

- A — 4 buttresses and 3/4 hoop tendons,
- B — 3 buttresses and 2/3 hoop tendons,
- C — 3 buttresses and full hoop tendons,
- D — 2 buttresses and full hoop tendons.

The ovalisation and other secondary effects result mainly from three different causes:

- the average prestressing force is not constant around a hoop,
- the buttress itself constitutes a sudden thickening and creates local disturbances even under an axisymmetric loading,
- the anchored tendons are straight over their first 6 meters and they initiate local stress perturbations in the vicinity of the junction of the buttress and the wall.

The determination of these secondary effects has been performed by a plane stress finite element analysis. According to the relevant degrees of symmetry a sector of 60° or 90° has been modelised with triangles and quadrilaterals. The model has a finer mesh in the critical area and comprises up to 157 nodes and 107 elements. There is a maximum of 6 elements and a minimum of 2 elements across the thickness of the wall. The principal loadings were taken as prestressing and test pressure. The prestressing was introduced with maximum precision. The instantaneous and deferred losses were computed at every point of the tendon. As the friction losses are significant the exact values were used instead of the usual approximation $e^{-f(\varphi+\beta x)} \approx 1 - f(\varphi+\beta x)$. The distributions of principal stresses under the different loadings for the various arrangements of prestressing show that all secondary effects remain considerably less than the admissible limits. The maximum effects obtained for the two buttress system is an ovalisation displacement of ± 2.6 cm (compared with 0.8 cm to 1.4 cm for the other systems investigated) corresponding to a bending moment of 125 kNm per 1.m. which gives a stress variation of ± 100 N per sq. cm. Taking into account the overlapping and the extra lengths of tendons required for tensioning, arrangement D requires 2.8%, 6.2% and 7.8% more prestressing tendons than arrangements C, B and A respectively. Including end anchorages, buttresses and tensioning operations the total cost for hoop prestressing in the arrangement D shows a saving of approximately 15% on arrangement A, 6% on arrangement B and 3% on arrangement C.

The present study shows that the commonly quoted drawbacks of the two buttress design (excessive friction losses and ovalisation) are not in fact obstacles to its use. Due to its specific technical and cost advantages one can predict an increased adoption of this system for present and future designs.

1. Introduction

On a observé, ces dernières années, une évolution dans la construction des enceintes de confinement des centrales PWR de 900 MW vers une utilisation d'unités de précontrainte de plus en plus puissantes.

C'est ainsi que les enceintes des centrales d'ASCO I et II en Espagne et de la centrale de DOEL III en Belgique, qui sont toutes trois en cours de construction, sont précontraintes à l'aide de câbles dont la résistance à la rupture garantie est de 9.400 kN (câbles Freyssinet 37 T 15). Cet accroissement de la force unitaire des câbles de précontrainte entraîne parallèlement une augmentation des dimensions des nervures sur lesquelles sont ancrés les câbles horizontaux de la robe. Ces nervures représentent une surface importante dans laquelle il n'est pas possible de faire des réservations pour le passage des très nombreuses conduites mécaniques ou électriques. Il est donc naturel d'essayer d'en réduire le nombre au maximum.

La présente étude analyse les avantages et les inconvénients des solutions à deux, trois ou quatre nervures, la précontrainte étant réalisée soit par des câbles de 270° (3/4 de cerce), soit par des câbles de 240° (2/3 de cerce), soit encore par des câbles de 360° (cerces entières).

2. Définition de l'étude comparative

Pour l'étude comparative, on a utilisé les caractéristiques géométriques de la centrale de DOEL III.

Le diamètre intérieur de l'enceinte est de 42.50 m, son épaisseur est de 0.85 m (voir Fig. 1). Les nervures ont 4 m de long et ont une épaisseur de 1.70 m en leur milieu (voir Fig. 2). L'effort minimal de précontrainte horizontale dans la robe est de 10.300 kN par mètre linéaire de hauteur.

Les variantes suivantes ont été étudiées :

- A - quatre nervures et câbles de 270°
- B - trois nervures et câbles de 240° (voir Fig. 3)
- C - trois nervures et câbles de 360° (voir Fig. 4)
- D - deux nervures et câbles de 360° (voir Fig. 5).

La comparaison entre les différentes variantes doit s'effectuer sur plusieurs plans différents :

- sur le plan du calcul de la structure, il convient d'évaluer les efforts d'ovalisation et les contraintes et déformations auxquelles ils conduisent ;

- sur le plan économique, il convient d'évaluer le coût global de la précontrainte horizontale, y compris sa mise en oeuvre ;
- sur le plan des délais d'exécution, il convient de comparer la durée des opérations de précontrainte se trouvant sur le chemin critique dans le planning d'ensemble de l'enceinte ;
- sur le plan technologique, il convient de rechercher quelle variante de précontrainte s'inscrit le plus facilement dans le schéma d'ensemble très complexe de l'enceinte avec ses équipements.

Les variantes de précontrainte horizontale retenues sont examinées successivement suivant chacun de ces quatre critères.

3. Calculs de structure

3.1. Principes

Les efforts d'ovalisation dus à la précontrainte horizontale d'une enceinte cylindrique comportant des nervures ont des origines diverses.

- Au droit de la jonction entre la nervure et la paroi, la discontinuité entre les surfaces moyennes et les inerties de flexion entraîne l'apparition d'efforts locaux à distribution non linéaire dans l'épaisseur, même pour un chargement axisymétrique.

- Au tracé rectiligne des câbles de précontrainte dans la nervure et à son voisinage, correspond une excentricité variable de ces câbles. Même dans l'hypothèse de coque mince, cela entraînerait l'apparition de moments de cerces hyperstatiques.

- A l'extrémité du câble, la diffusion d'un effort sur la plaque d'ancrage conduit à des contraintes locales importantes.

- En partie courante, l'effort de précontrainte moyenne appliqué à la paroi n'est pas constant, d'une part à cause du phénomène de rentrée d'ancrage dans une zone de 10 mètres environ aux extrémités des câbles et d'autre part du fait que les pertes de tension dues au frottement sont de forme exponentielle et non pas linéaire (voir Fig. 6 et Fig. 7).

3.2. Méthode

L'étude de ces efforts d'ovalisation a été faite par la méthode des éléments finis en utilisant un programme de structure en élasticité linéaire dans l'hypothèse de déformation plane.

La variante A étant à priori la plus favorable vis-à-vis des effets d'ovalisation, seules les variantes B, C et D ont été étudiées en détail.

3.3. Modèle

On a modélisé un arc de 60° pour les variantes B et C et un arc de 90° pour la variante D (voir Fig. 8 et Fig. 9) en introduisant des conditions de symétrie adéquates aux extrémités. L'épaisseur du modèle est de 0.84 m.

3.4. Cas de charges

Les cas de charge étudiés sont la précontrainte horizontale, la surpression d'accident de 4.51×10^5 Pascals (en incluant la poussée de la peau d'étanchéité) et la superposition des deux. Il a été admis que les cas de charges thermiques n'étaient pas susceptibles d'avoir des effets différents dans l'une ou l'autre des variantes étudiées.

Le coefficient de Poisson pris en compte est de 0.15.

Le cas de charge précontrainte qui correspond à des charges permanentes, a été étudié avec un module d'élasticité du béton de 1.5×10^{10} Pascals. Le cas de charge pression d'accident qui correspond à des charges de courte durée a été étudié avec un module d'élasticité du béton de 3×10^{10} Pascals.

Pour la détermination de la précontrainte à introduire dans les modèles, on a pris en compte les pertes de tension instantanées (frottements, rentrées d'ancrage, raccourcissement élastique) et différées (fluage et retrait du béton, relaxation des aciers). Pour l'évaluation des pertes par frottement, on a utilisé la relation :

$$T_x = T_0 e^{-f(\alpha + \beta x)} \text{ avec } f = 0.16 \text{ et } \beta = 0.006$$

x étant la distance du point considéré à l'ancrage et α la déviation angulaire cumulée.

On a considéré la précontrainte moyenne de 2 câbles consécutifs pour les variantes A et B et de 3 câbles consécutifs pour la variante C.

Dans tous les cas, le minimum de précontrainte est obtenu au droit de la jonction de la paroi avec la nervure. Pour la comparaison des variantes, on a utilisé un espacement des câbles tel que l'effort de précontrainte utile soit identique en ce point.

3.5. Contraintes

Le calcul des contraintes principales dans toutes les mailles des modèles pour les cas de charge de précontrainte (proche du cas de charge en service) et d'accident (précontrainte + pression d'accident et poussée de la peau d'étanchéité) montre que dans aucune des variantes il n'y a de contraintes principales de traction autres que celles correspondant aux efforts d'éclatement derrière les plaques d'ancrages des câbles (voir Fig. N 10 et 11 pour la variante D).

Dans l'axe des nervures, on obtient les valeurs suivantes de contraintes :

	Précontrainte		Accident	
	σ_i	σ_e	σ_i	σ_e
VARIANTE B	149	36	13	62
VARIANTE C	151	18	15	45
VARIANTE D	152	41	11	69

σ_i contrainte sur la fibre externe en 10^5 Pa

σ_e contrainte sur la fibre interne en 10^5 Pa

Au voisinage de l'azimut 10° par rapport à l'axe des nervures, c'est-à-dire dans la zone des mailles n° 46 à 51, on obtient :

	Précontrainte		Accident	
	σ_i	σ_e	σ_i	σ_e
VARIANTE B	127	115	17	5.6
VARIANTE C	121	122	12	15
VARIANTE D	129	114	16	3.2

En termes de contraintes, la comparaison apparaît donc être très légèrement défavorable à la variante D. Toutefois, les inconvénients qui en résultent sont très mineurs et tout à fait acceptables.

3.7. Déformations

Les déformations d'ovalisation dues à la précontrainte sont très voisines pour les variantes B et C et un peu plus importantes pour la variante D (voir Fig. n° 12). Néanmoins, dans la variante D le déplacement radial obtenu ne dépasse pas 3 cm, ce qui est compatible avec les tolérances générales de construction.

4. Coût global de la précontrainte

Pour réaliser une précontrainte équivalente et en tenant compte des surlongueurs de câbles nécessaires pour leur mise en tension, il apparaît que la variante D nécessite respectivement 2.8 %, 6.2 % et 7.8 % de plus d'acier de précontrainte que les variantes C, B et A.

Par rapport à la variante D, le nombre d'ancrages nécessaires est de 3 % inférieur pour la variante C, de 41 % supérieur pour la variante B et de 23 % supérieur pour la variante A.

En ce qui concerne la construction des nervures proprement dites, il est bien évident que les variantes B et C sont plus onéreuses que la variante D de 50 % et la variante A de 100 %. Il convient de ne pas oublier, en outre, que cet handicap existe aussi pour les équipements de nervures tels que les treuils et passerelles de mise en tension.

Avec les informations dont on dispose pour quelques cas concrets, on peut conclure qu'en coût global de précontrainte, la variante D fait apparaître une économie de 15 % sur la variante A, 6 % sur la variante B et 3 % sur la variante C.

5. Délais d'exécution

Le problème des délais d'exécution est à la fois important et complexe et ne peut être apprécié qu'en fonction des moyens dont dispose l'entrepreneur chargé des opérations de précontrainte.

Toutefois, dans tous les cas, le volume total des prestations de précontrainte déterminé à partir :

- des temps unitaires des opérations d'enfilage de mise en tension et d'injection de câbles de différentes longueurs (240°, 270° et 360°) ,
- du nombre total de câbles à mettre en oeuvre ,
- et des manipulations d'équipements (bobines de câbles, vérins et pompes)

montre que la variante D correspond au nombre minimum d'homme-heures de travail. La variante C en requiert à peine plus, par contre les variantes B et A en nécessitent entre un tiers et un quart en plus.

Il en résulte que dans les conditions normales de déroulement d'un chantier d'enceinte nucléaire, c'est-à-dire avec au maximum deux équipes travaillant simultanément aux mêmes opérations de précontrainte, la variante D est celle pour laquelle les délais d'exécution sont les plus courts.

6. Avantages technologiques

Avec l'emploi de grosses unités de précontrainte, les nervures sont larges (environ 4 m) et représentent une zone assez importante de la paroi interdite au passage des très nombreuses pénétrations. De ce point de vue, l'intérêt de n'avoir que deux nervures au lieu de trois ou quatre est évident. En outre, pour les centrales à double enveloppe, l'espace interannulaire entre les enceintes primaire et secondaire est très encombré d'équipements et de conduites diverses, et les saillies que représentent les nervures réduisent l'espace disponible et conduisent à des modifications de tracé parfois gênantes pour les conduites rigides.

Pendant la phase de réalisation de la précontrainte, il n'est pas possible pour les mécaniciens et pour les électriciens de travailler dans une zone de l'espace interannulaire s'étendant sur une dizaine de mètres de part et d'autre de chaque nervure (sécurité - stockage des câbles - mouvement des passerelles). Dans la variante D à deux nervures les opérations de précontrainte ne mobilisent que deux zones de 25 m de l'espace interannulaire, laissant ainsi la possibilité d'effectuer simultanément d'autres travaux dans deux zones de 40 m de long. Cela peut avoir une incidence favorable pour l'organisation et le planning général des travaux de l'enceinte. Avec trois nervures, on ne dispose plus que de 3 zones de moins de 20 m, ce qui présente beaucoup moins d'intérêt; avec 4 nervures, la précontrainte mobilise la totalité de l'espace interannulaire.

7. Conclusion

Il nous est apparu que le choix d'une solution à deux nervures (variante D) pour la précontrainte d'une enceinte de confinement :

- ne présente aucun problème vis-à-vis des calculs de structure ;
- correspond à un coût total de précontrainte inférieur à celui de la variante B qui est la plus fréquemment retenue ;
- correspond à des délais d'exécution généralement inférieurs à ceux des autres variantes ;
- présente des avantages technologiques importants.

On devrait donc voir ce choix se généraliser surtout pour les grosses unités de précontrainte et les enceintes à double enveloppe.

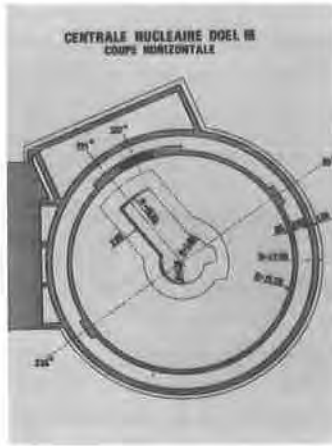


Fig. 1 - Coupe transversale des enceintes de DOEL III.



Fig. 2 - Coupe transversale d'une nervure.

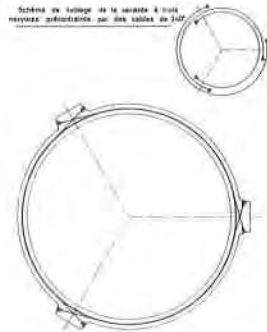


Fig. 3 - Schéma de câblage de la variante B.

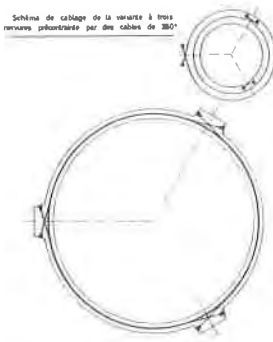


Fig. 4 - Schéma de câblage de la variante C.

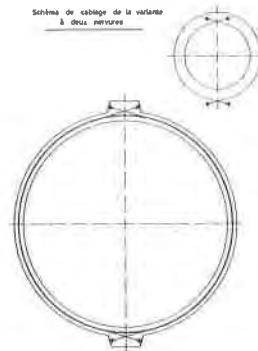


Fig. 5 - Schéma de câblage de la variante D.

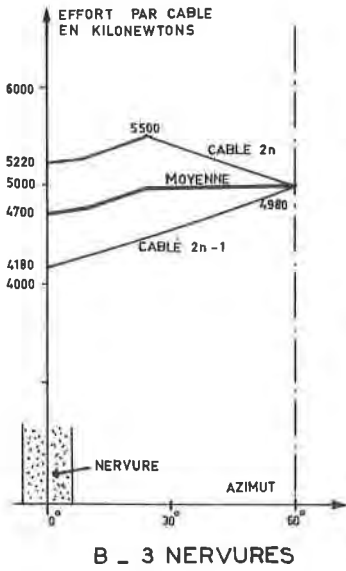


Fig. 6 - Variation de l'effort de précontrainte horizontale - Variante.

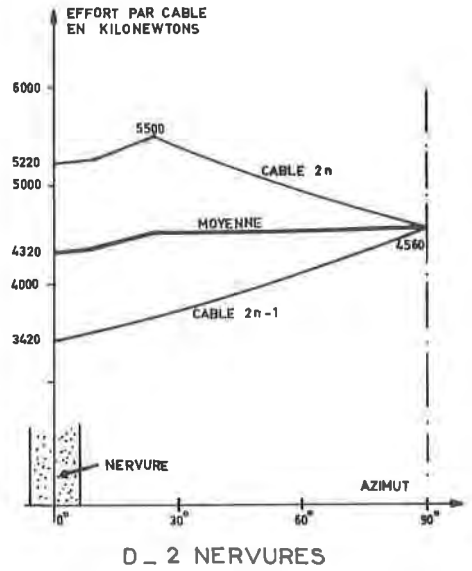


Fig. 7 - Variation de l'effort de précontrainte horizontale - Variante.

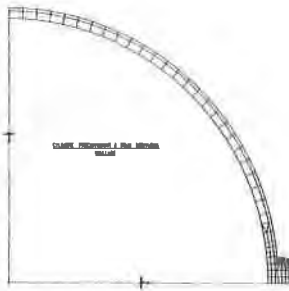


Fig. 8 - Modèle pour l'étude de la variante D.

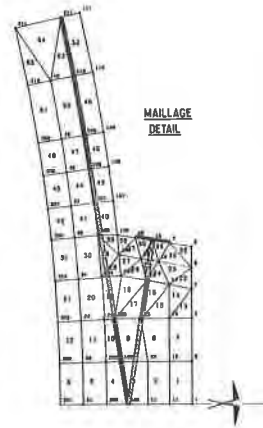


Fig. 9 - Détail du maillage de la nervure.

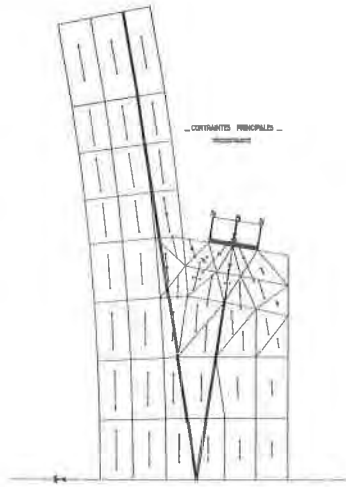


Fig. 10 - Contraintes principales pour le cas de charge "précontrainte" - Variante D.

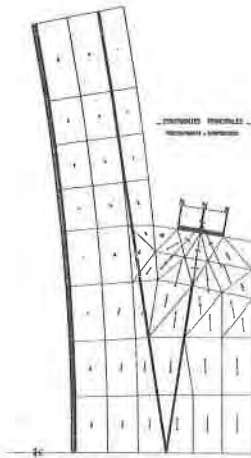


Fig. 11 - Contraintes principales sans le cas de charge "accident" - Variante D.

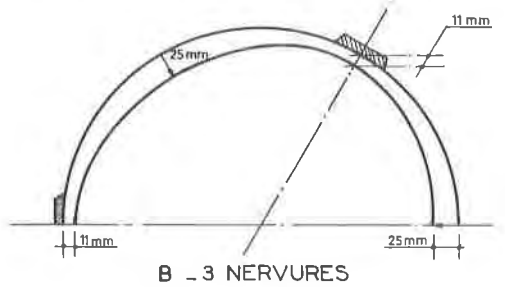
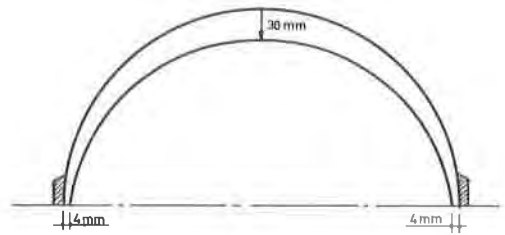


Fig. 12 - Déformations sous le cas de charge "précontrainte" - Variantes B et D.