The Double Wall Containment of 1300 MW Reactors

J.L. Costaz, J.F. Laboudigue
Electricité de France, SEPTEN,
Tour EDF-GDF, F-92080 Paris la Défense, Cédex 8, France

ABSTRACT

EDF 1300 MW programme is characterized by the erection of a double wall containment with leakage control instead of the former single wall containment with a steel liner, as in the 900 MW standard reactors.

The inner containment, in prestressed concrete, is designed to resist pressure and ensure a sound tightness.

The outside containment, in reinforced concrete, is designed to resist external impacts (plane crashes, explosions, etc...).

The space between the containments is kept at subatmospheric pressure and the release of air is controlled.

Some 20 containments of this type are now under construction or project in FRANCE.

As a consequence, EDF started investigations, in 1970, to provide a new containment system without steel liner, which implied a new basic conception of the problem : a tightness secured by the only prestressed concrete was considered a better solution in a first stage.

The leak-rate of the containment is directly linked with the quality of its execution. The leak-rate specified in safety requirements is 1 % per 24 h. of the air-steam mass and a second containment, in reinforced concrete, will be erected afterwards and leakage between the containments collected through filters.

Numerous tests have been carried out to the purpose of research and development, and demonstrate that concrete in itself is tight enough, and that it was possible - with the proper devices - to detect on site the defects in the execution and repair possible leaks.

The concrete - without requiring particular conditions of execution - must be carefully handled so as to reduce as much as possible the possibility of shrinkage, either hydraulic or thermic, of dessication and heterogeneity.

The first containments erected with this system prove that it is satisfactory.

1. INTRODUCTION

1.1 Rôle de l'enceinte - Expérience française

Une enceinte de confinement est un ouvrage qui abrite un réacteur nucléaire et divers circuits associés. Sa fonction essentielle concerne la sûreté d'une centrale nucléaire. Elle constitue en effet la troisième et dernière barrière s'opposant à la dissémination dans l'atmosphère de produits radioactifs, les deux autres étant :

- le gainage du combustible,
- l'enveloppe du circuit primaire.

En cas de rupture accidentelle de cette dernière enveloppe, l'enceinte est soumise à une pression d'un mélange air-vapeur d'eau et elle doit alors présenter une étanchéité suffisante.

L'enceinte de confinement sert également à la protection du circuit primaire contre les agressions externes (projectiles, explosions).

Si l'expérience française des ouvrages en béton (barrages, ponts, structures diverses) est très importante, la pratique des enceintes de confinement pour réacteur de puissance est assez récente. Néanmoins, un prototype avait été construit dès 1964 pour la centrale EL 4 des MONTS D'ARREE (70 MWe) refroidie au CO_2 et modérée à l'eau lourde. Il s'agit d'un bâtiment cylindrique en béton précontraint de 46 m de diamètre, 56 m de hauteur, de 0,60 m d'épaisseur courante conçu pour supporter en cas d'accident une pression de 1,6 bar absolu et une température maximale de 80 °C. L'étanchéité du confinement est améliorée par un revêtement intérieur du type peinture d'épaisseur 500 microns.

La filière eau lourde n'ayant pas eu de développement et la filière graphite-gaz ne nécessitant pas la présence d'une enceinte de confinement, aucun ouvrage de ce type n'a été construit en FRANCE pendant 7 ans.

L'année 1970 marque un tournant décisif dans le choix du type de réacteur. Après une association avec la BELGIQUE pour le lancement de la centrale de TIHANGE 1, deux tranches à eau sous pression (PWR) de 900 MWe sont commandées à FESSENHEIM. Le réacteur est du type WESTINGHOUSE, et l'enceinte de confinement est du type américain, ce qui impose la présence d'un revêtement métallique intérieur.

1.2 Du 900 MWe au 1300 MWe

Actuellement, il existe 34 tranches PWR 900 MWe en construction ou en exploitation.

Simultanément avec la réalisation des dernières tranches du palier 900 MWe ont débuté en 1977 les travaux de PALUEL, tête de série du palier 1300 MWe dit P4.

Ce palier comporte 8 tranches en construction.

A partir de 1980, la suite du programme 1300 MWe est basée sur le standard P'4 qui est très proche du standard P4 mais utilise l'expérience acquise pour apporter un certain nombre d'améliorations sur le plan de la conception et de la technologie.

Le palier P'4 comprend actuellement 14 tranches dont la plupart sont en début de construction.

Le palier suivant appelé N4 est en cours d'études : il correspond à la francisation de la filière PWR.

1.3 Notion de normalisation

L'ampleur du programme et les courts délais de réalisation ont amené à reconduire des dispositions analogues d'une tranche à l'autre.

Cette mesure est impérative pour l'installation (architecture d'ensemble, mécanique et électricité). Elle a pu être étendue largement au Génie Civil. Les enceintes d'une même série sont identiques dans leurs superstructures et ne diffèrent que par les radiers qui doivent s'adapter aux conditions particulières de site.

Pour le palier 900 MWe de TRICASTIN à BLAYAIS, les tranches sont jumelées 2 à 2. Il existe donc 12 enceintes "paires" (tranches 1, 3, 5) et 12 enceintes "impaires" (tranches 2, 4, 6).

La centrale de CRUAS constitue un cas particulier, la pression de calcul de l'enceinte étant différente de celle du palier.

Le principe de normalisation est reconduit pour le palier 1300 MWe d'une manière plus intégrale puisqu'il n'y a plus de tranches jumelées. La pré-série P4 a permis l'optimalisation de la série P'4.

La normalisation des superstructures est reconduite jusque dans les détails d'exécution, c'est-à-dire que les plans d'exécution tracés par les Bureaux d'Etudes et remis par EDF aux différents Entrepreneurs sont les mêmes pour tous les sites.

Ceci suppose que les sollicitations appliquées à l'ouvrage soient exactement les mêmes pour les différentes tranches. Cette condition est évidemment réalisée pour les efforts provenant de l'installation qui est normalisée.

Pour les effets liés à l'environnement, il est en revanche nécessaire de choisir les efforts enveloppe et de les appliquer à l'ensemble des tranches.

C'est le cas par exemple pour les actions suivantes :

- séismes,
- impacts d'avions,
- conditions climatiques.

On voit donc, malgré les avantages certains, les limites de la normalisation pour le Génie Civil :

- manque de souplesse vis-à-vis des demandes individuelles des entreprises (dispositions constructives),
- difficultés pour apporter des modifications dont l'expérience des tranches précédentes a montré l'intérêt,
- surcoût résultant de la prise en compte de l'enveloppe des cas de charge pour les différentes conditions de site.

Aussi, pour le palier 1300 MWe, des tentatives d'assouplissement de la doctrine de normalisation ont vu le jour dans les directions suivantes :

- examen des variantes proposées par les entreprises,
- existence d'une pré-série (P4) limitée à 8 tranches et d'une série (P'4),
- existence de deux sous-standards sismiques.

Le seule condition impérative qui n'admet pas de dérogation est l'identité des plans de coffrage pour les tranches d'une même série.

2. ENCEINTE A DOUBLE PAROI DU PROJET STANDARD 1300 MW

2.1 Raisons du choix d'un nouveau type de confinement

L'enceinte unique en béton précontraint avec peau d'étanchéité est une solution satisfaisante du point de vue de la sûreté, mais présente les sujétions suivantes :

- la réalisation d'une peau possédant les qualités requises de résistance et d'étanchéité est difficile et donc coûteuse,
- l'étanchéité pratiquement absolue demandée au confinement repose sur une membrane de 6 mm d'épaisseur dont les conditions de travail en cas d'accident de rupture du circuit primaire sont sévères,
- le bon comportement en cas d'accident de l'ensemble constitué par le béton précontraint et la peau n'est vérifié que par un essai à froid qui ne représente pas les contraintes dans la peau en cas d'accident à 140 °C.

Aussi, Electricité de France a entrepris, dès 1970, avec le Bureau d'Ingénieurs Conseils COYNE et BELLIER, l'étude d'un nouveau système de confinement permettant de supprimer la peau d'étanchéité. Pour cela, il a été nécessaire de reconsidérer le problème à la base.

Une enceinte de confinement est normalement hors pression. En cas d'accident de rupture du circuit primaire, la pression est relativement faible (4 bar rel.) et de courte durée (quelques heures) ; le fluide sous pression est alors essentiellement constitué de vapeur d'eau ; dans ces conditions, le rejet de substances radioactives dans l'atmosphère doit être réduit au maximum.

Le problème est donc très différent de celui des caissons en béton précontraint comme ceux de SAINT-LAURENT-DES-EAUX ou de BUGEY 1 où une pression de CO_2 de 30 à 40 bar est appliquée en permanence. Un revêtement métallique ne semble pas a priori indispensable.

La première idée qui vient à l'esprit est de remplacer la peau par un revêtement élastomère (type peinture). C'est la solution qui a été adoptée pour la centrale des MONT D'ARREE où la pression d'accident était faible et la température maximale peu élevée.

Dans le cas du PWR, le revêtement doit résister à des températures élevées (140 °C en moyenne, 180 °C localement).

Aussi, il a semblé préférable de s'orienter vers une solution où l'étanchéité est assurée par le béton précontraint seul. Le taux de fuites d'un tel ouvrage dépend essentiellement de la qualité de l'exécution. Pour une réalisation correcte, le taux de 0,1 % du volume en 24 heures sous la pression d'accident doit pouvoir être atteint. Néanmoins, par prudence et pour les premières réalisations, le taux de fuites retenu dans les évaluations de sûreté est dix fois plus grand et il est prévu une seconde enceinte en béton armé avec collecte et filtration des fuites entre enceintes. Les rejets nocifs sont ainsi très réduits même en présence de fuites plus importantes que prévu.

L'enceinte du standard 1300 est donc composée de deux parties :

- une enceinte interne en béton précontraint sans peau d'étanchéité,
- une enceinte externe en béton armé.

Le radier commun aux deux enceintes est partiellement précontraint.

Des avantages supplémentaires peuvent être attribués au concept d'enceinte double :

- les contraintes thermiques en régime normal sont réduites,
- l'espace annulaire de 2 m entre enceintes permet d'effectuer les opérations de précontrainte sans interférence sur les bâtiments voisins. (Dans le standard 900, des parties de bâtiments devaient être laissées en attente jusqu'à la fin des opérations de précontrainte),
- les armatures de précontrainte sont mieux protégées puisque l'enceinte externe les abrite des intempéries,
- la résistance aux agressions externes (projectiles, explosions) est améliorée grâce à la double enveloppe.

2.2 Programme de recherche et de développement

Si la conception de telles enceintes n'est pas fondamentalement différente des enceintes à simple paroi, il a fallu par contre s'assurer par un programme de recherche et de développement que le béton était par lui-même un matériau relativement étanche et que par des dispositifs appropriés l'on pouvait remédier sur le chantier aux fuites éventuelles.

Essais concernant l'étanchéité du béton

Des essais au Laboratoire des bétons de SACLAY (C.E.A.) ont été réalisés sur petites éprouvettes : cylindres creux ou plaques. Trois fluides ont été utilisés :

- l'azote sec à 20 °C sous 5 bar,
- l'eau à 20 °C,
- la vapeur d'eau à 140 °C.

Les éprouvettes permettaient de représenter :

- du béton humide,
- du béton sec,
- une reprise de bétonnage,
- une traversée,
- l'effet de la précontrainte.

Des essais sur grosse maquette au Laboratoire de Saint-Rémy-les-Chevreuse du Centre expérimental de recherches et d'études du bâtiment et des travaux publics (C.E.B.T.P.) ont permis de vérifier les résultats précédents et de mettre au point des procédés de réparation des zones défectueuses.

Il s'agit d'un caisson en béton armé d'axe vertical de 3,40 m de hauteur, 1,80 m de diamètre et 0,40 m d'épaisseur. Il est précontraint dans le sens vertical uniquement.

Les fluides utilisés ont été :

- l'air sous des pressions variables jusqu'à 5 bar,
- la vapeur d'eau à 140 °C.

Les divers essais réalisés ont montré que la bonne qualité d'un béton d'enceinte nucléaire permettait d'obtenir des coefficients de perméabilité à l'air et à la vapeur d'eau suffisamment faibles pour que la fuite totale de l'enceinte soit assez largement inférieure à 0,5 % du volume intérieur en 24 heures.

La vitesse de percolation d'un gaz ou de la vapeur d'eau est liée très directement au pourcentage d'eau libre subsistant dans le béton. Heureusement, dans un ouvrage de 90 cm d'épaisseur, la désorption est très difficile et ne se produit que sur une dizaine de cm à

partir des parements.

Par contre, la solution de continuité créée par une fissure, une reprise mal traitée ou un mauvais scellement d'une traversée reste la voie la plus facile pour le passage du fluide. Mais la précontrainte du béton et le traitement par injections peuvent y remédier. Comme pour tous les ouvrages de qualité, l'exécution doit évidemment être aussi soignée que possible pour réduire au minimum le retrait hydraulique et le retrait thermique, la dessiccation et l'hétérogénéité.

Contrôle de l'exécution "in situ"

La qualité de l'exécution de l'enceinte doit être vérifiée tout au long de la construction. Outre les contrôles classiques concernant la qualité du béton et des armatures, il convient de vérifier la mise en oeuvre des matériaux pour être en mesure de repérer les erreurs d'exécution susceptibles d'avoir une influence sur l'étanchéité de l'ouvrage.

Des essais ont eu lieu au C.E.B.T.P. sur un mur expérimental pour étudier les moyens de repérage des défauts d'exécution :

- variations de la compacité du béton,
- nids de cailloux,
- fissures,
- mauvaises reprises de bétonnage,
- mauvais contact acier-béton autour des traversées.

Une maquette à l'échelle 1 d'une portion de la paroi a été construite sur le site de TRICASTIN dans des conditions de chantier. Son but est double :

- trouver une solution satisfaisante aux problèmes constructifs dont certains ne sont pas liés à l'étanchéité (supportage et dépassement des traversées),
- essayer divers dispositifs de contrôle de l'étanchéité au niveau des reprises de bétonnage et des traversées, ces dispositifs permettant par la suite d'effectuer des injections.

Le dispositif retenu a été essayé sur une maquette à l'échelle 1 construite sur le site de PALUEL.

Le réseau de contrôle et d'injection est constitué d'un tube poreux (gaine spirale de 26 mm de diamètre) entouré d'un matériau non tissé (type BIDIM) faisant office de filtre à la laitance de ciment.

Il est situé sur toutes les reprises de bétonnage horizontale ou verticale et autour des fourreaux de traversées.

Produits d'injection

Les essais à l'air sous une pression réduite de 0,5 bar relatif faits à partir du réseau de contrôle ont mis en évidence deux types de défauts :

- les défauts importants et ponctuels dus à une mauvaise qualité de la mise en oeuvre,
- les défauts dus à la structure même du béton tels que la microfissuration de retrait thermique.

Si les premiers défauts cités sont réparables à l'aide de produits courants, il n'en va pas de même des seconds. Pour ceux-là une recherche a été menée pour trouver des produits capables de colmater des fuites provenant d'une fissuration dont l'ouverture moyenne est de l'ordre de 50 µ.

Cette recherche est orientée vers deux catégories de produits et se poursuit encore actuellement. Il s'agit :

- de produits organiques, essentiellement des résines,
- de produits minéraux, des silicates ou leurs dérivés.

Différents types de résines ont été essayés pour ne retenir en définitive que des résines époxydiques dont la viscosité a pu être abaissée à 50 centipoises. Ces résines ont l'avantage de ne pas présenter de retrait mais elles sont d'une mise en oeuvre délicate (DPU et viscosité très sensible à la température) et ne sont fabriquées pour l'instant qu'à titre expérimental.

Parmi les produits minéraux n'ont été essayés que des silicates purs ou des produits du commerce à base d'acide silicique. Ces produits d'un emploi aisé ont donné satisfaction à court terme et des essais sur maquette sont menés actuellement pour vérifier leur tenue à long terme et sous forte pression.

2.3 Description (cf. schémas)

A la différence des enceintes 900 MWe où l'étanchéité quasi absolue était réalisée par une peau métallique, l'enceinte 1300 MWe est à double paroi.

L'enceinte interne en béton précontraint assure à la fois la fonction de résistance à la pression et la fonction d'étanchéité.

En cas de rupture du circuit primaire qui est l'accident de référence, l'enceinte interne est soumise à une pression voisine de 5 bar absolus et les fuites à travers sa paroi sont entièrement collectées dans l'espace en légère dépression entre l'enceinte interne et l'enceinte externe en béton armé.

Bien que le radier soit unique et commun aux deux enceintes, la continuité de l'espace entre enceintes est assurée par un réseau de drainage constitué par un ensemble orthogonal de drains espacés d'environ 1 m et situés au tiers inférieur du radier. Toute fissure éventuelle dans l'épaisseur du radier recoupe ainsi le réseau de drainage.

Le radier est en béton armé, partiellement précontraint.

La précontrainte du radier et de l'enceinte interne est réalisée à l'aide de câbles FREYSSINET 37 T 15 deux fois plus puissants que ceux des enceintes 900 MWe. On dénombre 4 familles de câbles :

- les câbles du radier suivant un maillage carré au pas de 1 m,
- les câbles horizontaux de la jupe de longueur égale à la circonférence et ancrés sur deux nervures verticales diamétralement opposées,
- les câbles verticaux purs de même nature que ceux des enceintes 900 MWe,
- les câbles verticaux retournés sur le dôme et qui assurent la précontrainte du dôme.

2.4 Hypothèses de calcul

Comme pour tout ouvrage d'art, on considère, pour le calcul, des sollicitations normales et des sollicitations majorées.

Sollicitations normales

. en service normal, l'enceinte peut subir de légères dépressions ou surpressions, les effets de la température et les effets climatiques,

. les cas de charge en service normal sont combinés avec l'effet du séisme normal admissible correspondant à une accélération horizontale du sol de 0,075 g (spectre NRC),

. l'accident de référence est pris en compte dans ce type de sollicitations. Il porte l'enceinte à une pression maximale de 4,8 bar absolus, une température maximale moyenne de 140 °C avec des points chauds à 180 °C. La durée de l'accident à pleine charge est de 1 000 secondes, la décroissance des charges dure 9 000 secondes environ.

. l'épreuve de réception est prise aussi en considération. Il s'agit d'une mise en pression d'air à froid à la pression d'accident.

Pour ces divers cas de charge, l'enceinte ne doit pas se fissurer.

Notons que l'accident de référence, dont la probabilité d'occurence est très faible, est néanmoins considéré dans les sollicitations normales. Ceci signifie que l'enceinte est en mesure de supporter les effets de l'accident pendant unetrès longue durée ou un grand nombre de fois. Une marge de sécurité importante est liée à ce concept.

Sollicitations majorées

Elles correspondent à un état limite ultime de la structure défini par la limite d'élasticité des armatures métalliquesactives ou passives.

Ce sont les cas suivants :

- pression majorée par un coefficient1,5,
- séisme majoré de sécurité (0,15 g) (spectre NRC),
- accident de référence et séismemajoréde sécurité,
- ruptures de tuyauteries à la traversée de l'enceinte,
- agressions dues aux agressions externes.

2.5 Construction

Les méthodes mises au point sur les enceintes 900 MWe sont généralement conservées. Néanmoins, l'absence de peau d'étanchéité et la nécessité d'obtenir un béton suffisamment étanche conduit à quelques particularités.

a) Le radier est toujours découpé en quatre levées mais le bétonnage par plots est désormais remplacé par un bétonnage continu ce qui évite les difficultés liées aux reprises verticales.

b) Les faces des deux enceintes sont réalisées en coffrage grimpant. Il est à noter que la tolérance normale pour un coffrage fin de cette dimension (± 2 cm) est meilleure que celle de la peau métallique des enceintes 900 MW (± 5 cm). L'épaisseur de 90 cm de l'enceinte interne du palier P4 ne présente aucune marge pour loger les nappes de ferraillage et de précontrainte perturbées par les 245 traversées. C'est la raison pour laquelle cette épaisseur a été portée à 120 cm sur le palier P'4. Cette évolution a également permis d'araser les fourreaux de traversées au niveau des parements alors que ces fourreaux dépassaient de 20 cm sur les enceintes P4 d'où la nécessité de percer les coffrages.

c) Le pont tournant repose sur un corbeau continu en béton.

d) Le dôme interne est coulé sur des éléments préfabriqués en béton constitués de poutres et prédalles, les poutres reposant sur un appui central provisoire solidaire des poutres du pont tournant.

e) Le dôme externe est coulé surdes éléments préfabriqués étayés sur le dôme interne.

2.6 Epreuve de l'enceinte

L'épreuve de l'enceinte est une épreuve d'étanchéité et de résistance qui consiste en une montée puis une descente en pression d'air par paliers.

Pour chaque palier des mesures de taux de fuite et des mesures des appareils d'auscultation sont effectuées.

Pour les enceintes 1300 MWe, l'épreuve d'étanchéité et de résistance est faite au palier de pression de 3,8 bar relatifs, et le taux de fuite admissible est de 1 % par 24 h de la masse d'air intérieure : un niveau de fuite plus important que pour les enceintes 900 MW est toléré puisque les fuites sont collectées dans l'espace entre enceinte ou par les drains du radier.

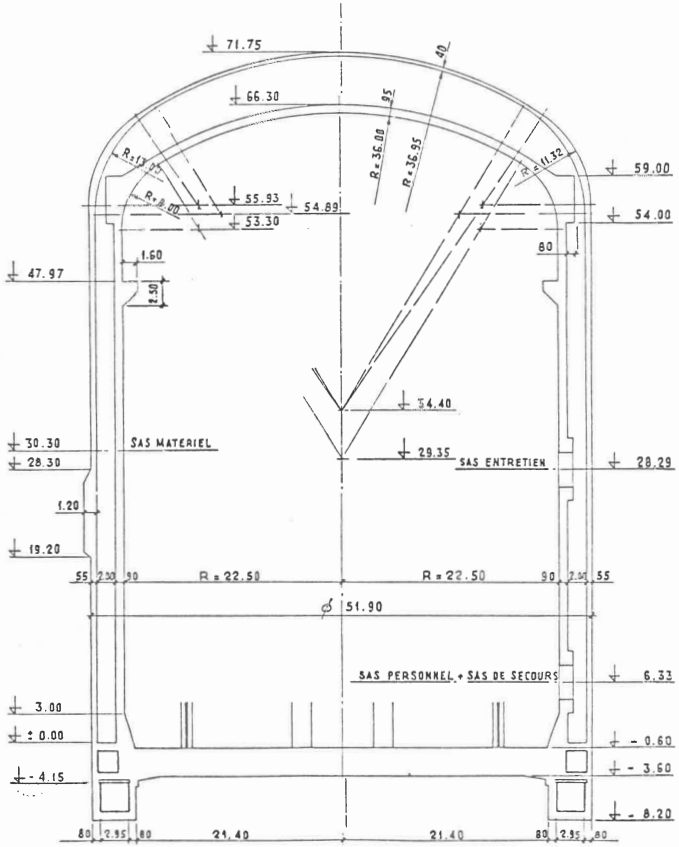
3. CONCLUSION

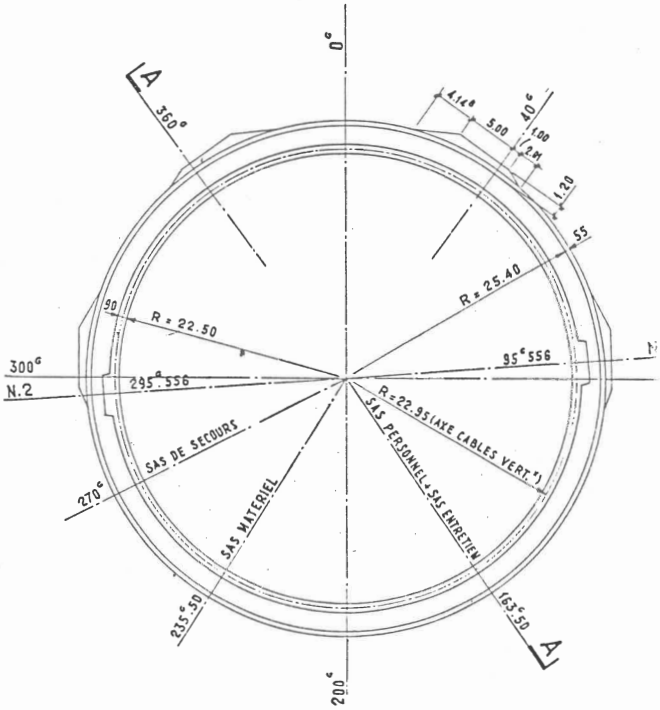
La première épreuve d'enceinte 1300 MW est prévue à la fin de l'année 1981. Toutefois les essais effectués à partir du dispositif de contrôle au fur et à mesure de la construction des différentes enceintes permettent moyennant quelques injections de réparation d'être confiant dans le résultat de la première épreuve globale.

En effet ces résultats partiels montrent que si l'on injecte, suivant les sites et les enceintes, entre 10 et 25 % des réseaux de contrôle (dont la longueur totale atteint presque 5 000 m pour une enceinte) le taux de fuite spécifié sera respecté. Or ces résultats ne tiennent compte ni de l'effet bénéfique de la précontrainte ni de celui du temps qui a tendance à colmater les fissures, effets qui cumulés peuvent abaisser d'un facteur 2 le taux de fuite. Il ne faudrait donc en définition procéder à une injection que sur moins de 10 % des réseaux mis en place dans une enceinte de confinement.

PWR 1300

COUPE VERTICALE A.A



PWR 1300

COUPE HORIZONTALE