



Diffusé le : Voir code barres ci-dessus

Réf. :

Département : MSIT

Rédacteur : B. ANDRICQ / J.L. COSTAZ

Nbre de pages : 133

Domaine d'application : Nucléaire – Toutes tranches

Nbre d'annexes :

Titre : Génie civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

E	N	SI	GD	/	01	00063	A
---	---	----	----	---	----	-------	---

Référence

Code Projet

N1388/N

Type de document : **Note**

Mots clés : EXPERIENCE – FILIERE RAPIDE - RNR

Résumé : Cette note s'inscrit dans le cadre du projet RECORD de capitalisation du savoir-faire technique ; elle a pour objectifs de tracer le recueil d'expérience du « spécialiste » du SEPTEN sur « Le Génie Civil et enceintes de confinement ». Ce recueil, obtenu à partir d'une interview effectuée par la société EURIWARE selon la méthode REX, permet de capitaliser l'expérience et le savoir-faire technique du spécialiste et ainsi de compléter les connaissances techniques du domaine contenues dans divers documents bibliographiques.

Diffusion : Par bordereau.

Rédacteur		Vérificateur		Approbateur	
Nom-Date	Visa	Nom-Date	Visa	Nom-Date	Visa
J.L. COSTAZ P. 20/11/01	<i>[Signature]</i>	B. ANDRICQ 20/12/01	<i>[Signature]</i>	C. SIMEON 15/11/02	<i>[Signature]</i>

Evolutions des trois derniers indices

Indice	Date d'approbation	Motif du changement d'indice	Modifications apportées

Dossier :

Prédiffusion effectuée :

Elaboré sous AQ :		Archivé au FDU : OUI		Copyright EDF 20	
<input type="checkbox"/>	Confidentiel	L'initiateur établit une liste nominative des destinataires. Chacun d'eux reçoit un exemplaire numéroté et ne peut étendre la diffusion sans l'accord de l'initiateur.			
<input type="checkbox"/>	Dif. Restreinte	L'initiateur établit une liste explicite des destinataires. Chacun d'eux peut étendre la diffusion sous sa responsabilité au sein de la D.I.S. (sur la base d'une liste explicite).			
<input checked="" type="checkbox"/>	Accès E.D.F.	Ne peut être transmis à l'extérieur d'EDF que par un chef de service.			
<input type="checkbox"/>	Accès libre	Document public.			
Inventaire protection	Sous famille : Etudes S.I.			Sensibilité (S) : 1	

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ**SYNTHÈSE**

Cette note s'inscrit dans le cadre du projet RECORD de capitalisation du savoir-faire technique ; elle a pour objectifs de tracer le recueil de l'expérience du "spécialiste" du SEPTEN sur "les études de la filière RNR". Ce recueil, obtenu à partir d'une interview effectuée par la société EURIWARE selon la méthode REX, permet de capitaliser l'expérience et le savoir-faire technique du spécialiste et ainsi de compléter les connaissances techniques du domaine contenues dans divers documents bibliographiques.

- Les éléments d'expérience sont retranscrits dans 32 fiches d'expérience.

Ils peuvent être complétés par des éléments bibliographiques identifiés dans chaque fiche.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

SOMMAIRE

1. RÉFÉRENCES.....	4
2. CONTEXTE DU RECUEIL D'EXPÉRIENCE : PROJET RECORD.....	4
3. THÈME TECHNIQUE : « GÉNIE CIVIL ET ENCEINTES DE CONFINEMENT ».....	4
4. VALIDATION DU RECUEIL - DIFFUSION.....	5
ANNEXE.....	6
ELEMENTS D'EXPERIENCE RELATIFS A LA GEOLOGIE ET A LA GEOTECHNIQUE.....	28
EEX01 - Intérêt pour le génie civiliste d'une expérience de chantier.....	29
EEX02 - Risque d'erreur en se contentant d'essais en laboratoire.....	34
ELEMENTS D'EXPERIENCE RELATIFS AUX FONDATIONS ET AUX CAISSONS EN BETON.....	38
EEX03 - Assurance qualité et documentation.....	39
EEX04 - Mise en service de la centrale de Saint-Laurent-Les-Eaux.....	42
EEX05 - Mesures des déformations de la structure des caissons.....	44
EEX06 - Elimination statistique des effets parasites sur les mesures de déformations des structures.....	47
EEX07 - Mesures des contraintes supportées par les structures.....	49
EEX08 - Suivi des ouvrages EDF par la division technique générale.....	51
EEX09 - Pseudo phenomene d'alcali-reaction dans le beton du caisson de la centrale de Saint-Laurent-les-Eaux.....	54
EEX10 - Gonflement tridimensionnel dans le beton du caisson de la centrale de Saint-Laurent-les-Eaux.....	57
ELEMENTS D'EXPERIENCE RELATIFS AUX ENCEINTES DE CONFINEMENT.....	62
EEX11 - Instrumentation des enceintes de confinement.....	63
EEX12 - Epreuves sur les enceintes de confinement.....	71
EEX13 - Mesures de fuites sur les enceintes de confinement.....	75
EEX14 - Fuites non transistantes sur les doubles enceintes des 1300 MW.....	81
EEX15 - Mesures de fuites en continu sur les enceintes de confinement.....	84
EEX16 - Mesures de fuites sur les organes d'isolement.....	86
EEX17 - Rôle du septen vis-a-vis du deroulement des epreuves.....	90
EEX18 - Avantages et inconvenients des enceintes a peau des 900 mw.....	92
EEX19 - Difficultés apportées par le sas sur les enceintes des 1300 mw.....	96
EEX20 - Principe de la simple enceinte drainée.....	99
EEX21 - Principe d'une peau d'étancheité au milieu du beton.....	101
EEX22 - Mesures de fuites sur la maquette maeva.....	103
EEX23 - Mauvaise résistance a la temperature des resines d'injection.....	108
ELEMENTS D'EXPERIENCE RELATIFS A LA RECHERCHE ET A LA MAINTENANCE EN GENIE CIVIL.....	110
EEX24 - Rôle respectif pour le genie civil de la direction des etudes et recherches et de techniques d'exécution géologique et géotechnique (TEGG).....	111
EEX25 - Généralités sur la maintenance en génie civil.....	113
EEX26 - Fuites sur les piscines de stockage de combustible irradié.....	117
EEX27 - Dossiers de systèmes élémentaires pour le génie civil.....	119
EEX28 - Ecaillage du béton hautes performances a Civaux 2.....	121
EEX29 - Phénomènes thermiques dans le béton.....	126
EEX30 - Limite des calculs aux elements finis.....	128
EEX31 - Intérêt de travailler sur les analyses de betons anciens.....	130
EEX32 - Bétons à Hautes Performances.....	131

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ**1. Références**

[1] - note d'opportunité du projet RECORD

2. Contexte du recueil d'expérience : projet RECORD

Le Projet RECORD, pour "Recueil d'Expérience de Conception Orienté Recherche Documentaire", se propose de capitaliser le savoir-faire technique des spécialistes ou experts, en priorité lors de leur départ en inactivité ou sur mutation, par la réalisation d'un recueil d'expérience à partir d'interviews conduites selon la méthodologie REX développée par le CEA et industrialisée par EURIWARE pour les outils informatiques associés à la démarche [1].

Dans un premier temps, on s'attache à recueillir l'expérience des spécialistes ou experts du SEPTEN et à mettre l'information recueillie à disposition au niveau du SEPTEN après analyse des liens nécessaires avec les outils documentaires : GED & FDE notamment, voire en utilisant un déploiement sur INTRANET (ultérieurement).

3. Thème technique : « Génie Civil et enceintes de confinement »

Le recueil d'expérience est établi à partir d'une interview du spécialiste selon le processus suivant :

- en préliminaire, une demi-journée de préparation de l'interview avec le spécialiste et un ingénieur connaissant les domaines de compétence du spécialiste pour préciser le cadre général de l'interview,
- un premier entretien non directif centré sur les sujets techniques identifiés au préalable et qui fait l'objet d'une retranscription, à partir des fiches d'expérience élaborées suite à l'entretien,
- un deuxième entretien pour relecture et compléments,
- enfin un dernier entretien pour validation du dossier de recueil de connaissances qui doit contenir entre 20 et 40 fiches d'expérience selon la richesse des propos recueillis,
- une demi-journée de finalisation pour faire examiner le rapport d'expertise par des utilisateurs ou d'autres experts,
- la réalisation du dossier final d'expertise.

Le thème technique "Génie Civil et enceintes de confinement", objet du présent recueil, a été choisi pour capitaliser l'expérience du spécialiste (Jean-Louis COSTAZ).

- Les éléments d'expérience du thème sont retranscrits dans un recueil joint en annexe sous forme de 32 fiches d'expérience.

Ils peuvent être complétés par des éléments bibliographiques identifiés dans chaque fiche.

4. Validation du recueil - Diffusion

Le recueil a été validé par le spécialiste lors de sa constitution ; il a été complété par les avis éventuels sur les fiches d'expérience concernées (champ : autre avis / complément) des participants à la réunion de finalisation :

- MM. FAURY (DUMEZ/GTM) – LACROIX (Expert) – PICAUT (COYNE & BELLIER)
- Mme CHAUVEL (GC)
- M. POUBLANC (Dept. TEGG)
- MM. CLAVERIE – TOURET -ANDRICQ

En accord avec la hiérarchie du spécialiste, le recueil fait l'objet d'une diffusion auprès des spécialistes ou utilisateurs du thème technique concerné au sein de la DIS (SQR - SEPTEN).

La présente note est à diffusion Restreinte ; elle est archivée au FDE.

ANNEXE

RAPPORT D'INTERVIEW DE MONSIEUR COSTAZ
GENIE CIVIL ET ENCEINTES DE CONFINEMENT

Approbation EDF SEPTEN

AUTEUR : Jean-Louis COSTAZ

Date :

Visa :

Approbation EURIWARE

	REDACTION	VERIFICATION	APPROBATION
VISAS			
NOMS	L. ALBERTY	J-M. SALLE	F. CALAIS

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

HISTORIQUE DES REVISIONS

VERSION	DATE	OBJET DE LA REVISION
V0M1	21.04.1999	Emission initiale
V0M2	03.05.1999	Correction suite au deuxième entretien avec Monsieur Jean-Louis COSTAZ
V1M1	26.05.1999	Compléments d'informations suite à la réunion de Finalisation
V1	31.08.1999	Corrections finales

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ**AVANT PROPOS**

Ce recueil de connaissances, réalisé le 30 mars 1999 auprès de Monsieur Jean-Louis COSTAZ par Monsieur Luc ALBERTY, a été effectué selon les modalités d'application de la procédure d'interview de la Méthode REX (Méthode REX - Procédure 5 - CEA - NT/SSAE/LSMI 96/0010 du 08/03/96).

La procédure de recueil de connaissances de la Méthode REX consiste en une série de trois entretiens entre le spécialiste et un intervenant externe :

- le premier entretien consiste en une interview enregistrée, le déroulement de l'interview étant guidé par un canevas d'interview. L'interview est ensuite saisie et le texte est analysé et mis en forme pour construire la première version des Eléments d'Expérience.
- lors du second entretien, ces Eléments d'Expérience sont présentés au spécialiste qui les corrige et les complète. Selon le cas, des interviews commentées d'Eléments d'Expérience peuvent être réalisées.
- le troisième entretien a pour but de valider la version finale des Eléments d'Expérience et de préciser le niveau de confidentialité de chacun.

Suite au troisième entretien, une réunion de finalisation est réalisée dans le but de finaliser la construction des Eléments d'Expérience. Cette réunion a un objectif double : d'une part celui d'informer le personnel de l'entreprise intéressé par le thème de l'interview et d'autre part, celui de consolider les Eléments d'Expérience avec les avis et les recommandations émis par d'autres spécialistes du domaine. En fin de prestation, un rapport d'interview est émis.

La structure du rapport d'interview diffère de la forme standard de présentation d'une note technique car chaque chapitre correspond à un Elément d'Expérience (EEx) et la structure du chapitre est organisée en fonction de la structure type des EEx.

Par rapport au texte de l'interview brut, un travail de réécriture a eu lieu afin de produire la forme finale des Eléments d'Expérience sans toutefois trahir la pensée initiale de la personne interviewée ("l'auteur").

PARCOURS PROFESSIONNEL de Monsieur Jean-Louis COSTAZ

Diplômé de l'Ecole Centrale Paris (1959)

Hydraulique :

1962-1963 : Chantier de creusement du canal EDF de Saint-Estève-Janson.

Nucléaire :1963-1970 :

- Régions d'Equipement de Clamart puis de Tours - Etudes concernant la construction de la centrale graphite-gaz de Saint-Laurent-les-Eaux :
 - étude de sites,
 - étude du caisson en béton précontraint,
 - suivi continu, depuis les fondations jusqu'à la mise en service.

1970-1980 :

- SEPTEN (à Clamart puis à la Défense) - Enceintes de confinement (Tihange, Fessenheim, Bugey) :
 - études et suivi des réalisations.

1980-1997 :

- Chef de la Division Génie Civil :
 - entre autres, études concernant le démantèlement de la centrale de Saint-Laurent-les-Eaux (1992).

Depuis 1997 :

- Retraite - activités actuelles :
 - projet national « bétons hautes performances » jusqu'en 2001,
 - expertise en Inde.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ**CANEVAS D'INTERVIEW de Monsieur Jean-Louis COSTAZ****Personnes d'EDF SEPTEN présentes à la réunion**

- Monsieur Bernard ANDRICQ (Responsable du projet RECORD),
- Monsieur J.P. TOURET (Chef de la Division GC : Génie Civil).

Généralités

L'objet du présent Canevas d'interview est de servir de guide au Recueil d'expérience de Monsieur Jean-Louis COSTAZ, en mentionnant, et en détaillant le plus possible, tous les points déterminés comme importants au cours de la réunion du 24 février 1999.

La présentation détaillée, en début de réunion, du parcours professionnel de Monsieur Jean-Louis COSTAZ a servi de base à la réflexion qui a permis ensuite de préciser les thèmes et domaines sur lesquels devait porter l'interview.

Pour cette raison, il a semblé plus efficace d'abandonner la présentation classique sous forme de schémas de type « SADT », modélisant les grands domaines d'activité environnés des traditionnelles entrées, sorties, ressources et connaissances, contraintes, et retours d'expériences.

Le Guide d'interview présente donc, par thèmes et par projets ou affaires, la liste des sujets jugés intéressants et utiles par les personnes présentes à la réunion.

L'interview de Monsieur Jean-Louis COSTAZ porte sur le **GENIE CIVIL et les ENCEINTES de CONFINEMENT**.

Monsieur J.P. TOURET assistera à cette interview, afin d'apporter son soutien au bon déroulement de celle-ci, en intervenant dans la discussion, afin d'augmenter son efficacité et la précision du résultat obtenu.

Les dates de principe suivantes ont été retenues pour les réunions successives, qui doivent toutes avoir lieu avant le 15 mai 1999 :

- Interview : mardi 30 mars 1999, à 9 heures (durée généralement prévue : 4 à 5 heures),
- Deuxième entretien : mercredi 28 avril 1999, à 9 heures (durée prévue : toute la journée),
- Réunion de Finalisation : lundi 17 mai 1999, à 9 heures 30 (durée prévue : la matinée).

Partie 1 : Thème « Géologie et géotechnique »

Creusement du canal EDF de Saint-Estève-Janson

- L'expérience de chantier a servi pour la suite de la carrière :
 - études géologiques et géotechniques,
 - l'expérience « chantier » procure une bonne méthode de travail.

Construction de la centrale graphite-gaz de Saint-Laurent-les-Eaux

- Hydrologie, étude de sols, et étude de sites (durant 1 an).

Partie 2 : Thème « Fondations et Caissons en béton »**Construction de la centrale graphite-gaz de Saint-Laurent-les-Eaux****Etude**

- Etude du caisson (hauteur : 50 m, diamètre : 20 m, épaisseur : 5 m, pression de gaz : 30 bars) :
- c'était la deuxième réalisation (la première étant Chinon) ; GTM était le constructeur ; les fondations étaient profondes,
- nous avons tout à découvrir ; nous avons progressé en travaillant avec les anglais qui avaient démarré légèrement avant nous ; nous avons rencontré les mêmes problèmes,
- les études ont duré 3 - 4 ans :
 - réalisation des plans de fondations,
 - les fondations étaient moulées dans le sol, surmontées d'une couche de caoutchouc, puis du caisson en béton,
 - malgré un sol marno-calcaire compressible, le caisson n'a pas tassé et est resté vertical.

Construction

- Le chantier de construction s'est déroulé sans difficultés majeures :
 - acquisition de bonnes connaissances sur les bétons, bétons précontraints, et la pratique des réalisations.

Mise en service

- Mise en pression et mesures de fuites :
 - 5 mètres d'épaisseur de béton suffisaient-ils à garantir l'étanchéité vis-à-vis du CO₂ à 30 bars ?
 - Le caisson était recouvert intérieurement d'un calorifuge, puis d'une tôle de 25 mm d'épaisseur refroidie par des tubes où circulaient de l'eau (des sécurités permettaient de s'affranchir de tout risque de panne : circuit en double, pompes nombreuses, ...),
 - j'étais responsable de la partie mécanique, électrique et génie civil du caisson,
 - par la suite, je fus chargé de la mise en service sur le site (vérification de tous les relais, ...) : j'étais tout seul pour le faire, cela a fonctionné correctement malgré l'absence d'Assurance Qualité,
 - le grand intérêt du travail sur chantier est qu'il permet de tout voir et d'acquérir des connaissances pratiques ; à l'époque, la maîtrise d'oeuvre d'EDF était très importante ; actuellement EDF sous-traite une grande partie des travaux, ce qui rend beaucoup plus difficile l'acquisition de ces connaissances ; par exemple, il serait intéressant que la mise en service soit faite en grande partie par EDF.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ**Divers**

- Le système a fonctionné pendant 25 ans sans panne ; la qualité du matériel existait déjà avant l'apparition des procédures AQ.
- L'Autorité de Sûreté existait déjà à cette époque, mais le Groupe Permanent se contentait d'examiner les points importants ; en conséquence, nous nous sentions plus responsables que maintenant.
- Le chef de la Sûreté était à l'époque génie-civiliste, ce qui a été bien utile, d'autant que le CEA avait peu de compétences en génie civil.
- Constitution et mise en oeuvre du béton :
 - la résistance du béton devait être de 40 MPa, ce qui était particulier pour l'époque.
- Eléments finis :
 - à cette époque, la DER utilisait les premiers éléments de calculs par éléments finis ; GTM ne les possédait pas et utilisait un programme suisse que nous avons certifié,
 - la section horizontale du caisson de Saint-Laurent 1 et 2 était hexagonale, car GTM jugeait que les faces planes étaient plus faciles à réaliser qu'une face courbe ; cela engendrait des efforts parasites ; afin d'étudier ces contraintes, nous avons réalisé des études et construit des maquettes.

Règlements

- Les règlements de conception des bétons armés sont les suivants :
 - en 1960, le BA60 remplace le BA45 : il définit les grands principes, associés à quelques formules seulement,
 - puis, ont été émis le BA68 calculé aux contraintes admissibles (moitié ou deux tiers de la limite d'élasticité) et, en évolution avec les règlements précédents, le BAEL80 qui est dit « aux états limites »,
 - actuellement, Eurocode 2 est très détaillé et représente un gros volume.
- Les règlements de conception des bétons précontraints sont les suivants (ce sont des instructions provisoires) :
 - IP65, puis IP73 ; ce dernier n'a été que rarement appliqué car il est très compliqué,
 - le BPEL, également « aux états limites »,
 - le règlement actuel, Eurocode 2, inclut aussi les bétons précontraints.
- Face à un règlement pas trop détaillé, nous sommes amenés à nous poser des questions ; sinon, nous l'appliquons à la lettre sans réfléchir.
- Un changement de méthode s'est produit ; les règlements actuels sont semi-probabilistes : les états limites sont définis en résistance ultime ou de service ; cela permet d'utiliser des coefficients de sécurité adaptés au cas de charge, ce qui est une amélioration.

• Les règlements cités sont civils ; il n'y avait pas à l'époque de règlement particulier pour le nucléaire comme il y en a actuellement (voir plus loin : le RCC-G).

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

- Eurocode 2 n'est pas encore d'application :
 - il est provisoire et est contredit par d'autres documents ; il est actuellement utilisé avec adaptation,
 - il est d'inspiration allemande et anglaise car leurs gouvernements y ont mis les moyens, ce qui n'est pas le cas du gouvernement français,
 - il est par contre d'inspiration universitaire, très complexe, et n'a pas été réalisé par des praticiens,
 - il sera bientôt obligatoire ; nous avons réalisé des simulations pour l'appliquer à nos installations ; le coût induit est important.

Etude du démantèlement

- Peu de centrales sont actuellement en cours de démantèlement : la centrale à eau lourde de Brennilis, et celle au graphite-gaz (UNGG) de Marcoule ; après retrait du matériel contaminé, on attend généralement une trentaine d'année que la radioactivité du béton restant baisse.
- En 1992, une étude a été faite sur papier pour le démantèlement de Saint-Laurent-les-Eaux :
 - le coût d'un démantèlement complet est estimé au tiers du coût de la construction,
 - j'avais proposé que le caisson soit utilisé pour entreposer des déchets : cela ne peut être réalisé en raison de la réglementation,
 - il est maintenant prévu de laisser le caisson en béton avec un toit pour qu'il ne pleuve pas à l'intérieur ; l'exploitant situé à proximité permet d'exercer une surveillance,
 - les anglais avaient eu l'idée d'enfouir un caisson sous un tumulus de sable ; ils ne l'ont pas fait ; le caisson en béton est laissé tel quel avec un minimum de surveillance.

Viellissement des structures

- Les anciens caissons peuvent-ils apporter des réponses sur ce sujet à la mode ?
 - une instrumentation a été réalisée,
 - la DTG (Division Technique Générale) continue les mesures pour enrichir les connaissances sur le phénomène.
- Le défaut important du béton est sa déformée dans le temps : au final, elle représente 2 à 3 fois la déformée instantanée.
- Une précontrainte est réalisée à l'aide de câbles intégrés dans le béton ; elle permet de compenser la pression interne au caisson :
 - le nucléaire en France est le seul à utiliser un ensemble béton-câbles monolithique ; dans la plupart des autres pays, les câbles sont injectés à la graisse,

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

- L'injection des câbles a des raisons :
 - la basicité du béton étant forte (pH 13), l'acier qui y est plongé se passive ; une couche d'oxyde le protège et le conserve (si le pH ne diminue pas trop) ; or, les aciers de précontrainte, à haute teneur en carbone, sont très sensibles à la corrosion ; c'est donc une bonne solution, si l'injection est bien faite,
 - de plus, le câble étant plus intimement lié au béton, le comportement en rupture est meilleur ; par exemple, les fissures ont tendance à se résorber par tension locale du câble,
- L'injection des câbles présente des inconvénients : il est impossible de ressortir le câble, ni de le retendre,
- En conclusion, cette méthode est la meilleure si l'on ne rencontre pas de problème,
- Mais le dogme français sur ce sujet s'est progressivement affaibli,
- A l'arrêt du réacteur, la pression interne est supprimée, mais la précontrainte est conservée ; le béton subit alors une contrainte : quel peut être la conséquence ?
 - le fluage d'un béton très ancien et nouvellement comprimé a été suivi sur Saint-Laurent-les-Eaux et Bugey ; les résultats ne sont pas connus ; il faut contacter pour cela Monsieur GUINET
- Sur demande de l'Autorité de Sécurité, 4 câbles verticaux ont été rajoutés ; ils sont munis de dynamomètres.

Points particuliers

- Prélèvement d'échantillons de béton sur le caisson de Saint-Laurent-les-Eaux :
 - généralement les essais sont faits à 7, 28, et 90 jours ; on considère alors que le béton a atteint sa résistance définitive, ce qui n'est pas vrai,
 - nous avons réalisé un stock d'éprouvettes ; elles sont conservées dans l'eau pour être testées au bout de 5, 10, et 15 ans ; nous avons constaté que la résistance du béton continuait à augmenter (elle a doublé par rapport à celle à 90 jours) ; le module d'élasticité a également augmenté ; nous pensons que le béton continue à s'hydrater.
- A Saint-Laurent-les-Eaux, nous avons cru détecter le phénomène d'alcali-réaction (réaction entre l'alcali du ciment et certains granulats) :
 - nous avons observé des fissurations non négligeables (1 mm), même si cela ne constituait pas un réel souci (des carottes montraient que les fissures étaient peu profondes),
 - nous avons envoyé des échantillons à des laboratoires spécialisés aux Etats-Unis, en Angleterre, et au Canada : ils ont tous conclu qu'il s'agissait d'un effet chimique d'un genre non répertorié, mais que ce n'était pas de l'alcali-réaction,
- les fissures apparaissent dans les zones moins comprimées ; en effet, le caisson présente des orifices (accès, gonflage) qui forcent la précontrainte à s'écarter pour passer autour ; la compression n'est donc pas uniforme,

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

- il serait intéressant d'observer ce qui se passe après suppression de la pression.
- Les caissons étaient posés sur des appuis en néoprène, constitués de 2 bandes représentant au total 1,5 cm d'épaisseur :
 - le caisson n'était ainsi pas posé rigidement sur la fondation ; nous pensions que cela pouvait compenser d'éventuelles déformations dues au fluage du béton,
 - le caoutchouc peut également jouer un rôle en cas de séisme,
 - même cassé et tordu comme il est actuellement, il joue encore son rôle.
- La SECN (Société d'Etudes des Caissons Nucléaires) comprenait les industriels GTM, Campenon-Bernard, Spie-Batignoles et SGE, ainsi qu'EDF et le CEA :
 - étude de caissons en béton pour la technique de l'eau légère : nous avons essayé pendant 5 ans de voir si la cuve en acier pouvait être remplacée par du béton ; le contenu était pressurisé à 150 bars et bouillant ; nous nous sommes concentrés sur le 1300 MW,
 - l'étude est restée sans suite ; l'acier fonctionne d'ailleurs correctement et, avec le béton, nous aurions certainement eu des difficultés,
 - les documents de référence existent certainement aux archives, à Blois ; Monsieur MOINET peut être contacté à ce sujet,
 - Cela a mis un terme à l'activité « caissons » en France.
- J'ai participé au groupe international FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte), devenu maintenant FIB (Fédération Internationale du Béton) :
 - il comprend en particulier un groupe sur les ouvrages nucléaires (enceintes, caissons), y compris pour des applications non nucléaires comme le domaine du pétrole ; dernièrement, il fut abandonné car le projet n'a pas percé, ni dans la chimie, ni dans les pétroles où tout est généralement en acier ; mais pendant 15 ans, le groupe a réalisé de la publicité pour l'utilisation du béton hors du nucléaire ; les applications viendront peut-être plus tard.
- Le HTR (réacteur à Haute Température ou « à boulets ») :
 - le combustible usagé était évacué par le bas ; le principe était très intéressant mais, en pratique, le système de soutirage se coinçait ; un réacteur de ce type existe en Allemagne, il a été arrêté avant de démarrer ; le réacteur américain a rencontré de nombreuses difficultés,
 - les hautes températures (400°C au lieu de 300°C) permettent d'obtenir un rendement meilleur, mais la corrosion est aussi beaucoup plus importante,
 - le caisson du réacteur allemand était réalisé par les français.
- Le travail de chacune des 3 Régions d'Équipement Nucléaire (Clamart, Tours et Lyon) se fait trop en autarcie.

Partie 3 : Thème « Enceintes de confinement »**Enceintes 900 MW**

- La première enceinte construite près du territoire Français concernait Tihange 1 en Belgique :
 - les belges souhaitaient suivre la philosophie du code américain IASME, en incluant quelques règlements qui leur étaient propres,
 - la technologie américaine consistait en une enceinte en béton armé ou précontraint, associée à un revêtement intérieur ou « peau », en acier de 6 mm d'épaisseur non refroidi,
 - les belges ont été prudents et ont construit une enceinte à double paroi qui n'existait pas sur les centrales américaines ; l'enceinte externe était prévue pour récolter d'éventuelles fuites ; l'enceinte a été réalisée par Campenon-Bernard qui a essayé de convaincre les belges de supprimer l'enceinte externe.
- Fessenheim a été construit sans enceinte externe ; la sûreté française nous faisait remarquer que les belges avaient une double enceinte :
 - en conséquence, Fessenheim et Bugey présentent des plaques en acier prévues pour réaliser un bardage externe en acier soudé ; ce dernier n'a jamais été réalisé,
 - La série CP1-CP2 (enceintes 900 MW standardisées) ne présente plus de plaques d'acier.

Technologie de la « Peau »

- Au moment de la décision d'étudier les enceintes des centrales 1300 MW, nous avons proposé d'utiliser une enceinte double, mais en supprimant la peau :
 - les concepts étaient donc :
 - 900 MW : enceinte simple avec peau,
 - 1300 MW : enceinte double sans peau,
 - les bétonniers et les ingénieurs des mines s'opposaient sur ce sujet.
- La peau est en acier doux, donc ductile :
 - la peau suit la déformée du béton, et est assez bien contrôlée ; c'est une bonne solution qui a fait ses preuves,
 - les experts ont montré que l'étanchéité était bonne ; les traversées électriques sont bien étanches ; c'est plus délicat pour les mécaniques présentant des vannes.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

- « Relignage » des vannes :
 - il est admis qu'avant de faire une épreuve décennale, au cours de laquelle l'enceinte est mise sous pression, on religne les vannes ; en conséquence, les résultats sont bons,
 - les vannes sont également relignées tous les ans.
- Fluage du béton par compression :
 - les enceintes ne sont jamais sous pression, sauf au cours des épreuves ou en cas d'accident,
 - les règlements « Béton Armé » étaient appliqués et permettaient un fonctionnement correct,
 - le BAEL, plus récent, est plus compliqué ; en conséquence, nous rencontrons des difficultés par rapport à la précision de déformée due au fluage ; dans certains cas, des dépassements existent ; la peau permet de ne pas se poser de question, car c'est une technologie qui permet d'être moins exigeant sur la qualité du béton,
 - les dernières études probabilistes de sûreté ont montré que les enceintes devaient rester étanches jusqu'à une pression de 8 bars ; une bonne marge existe, car les études d'accidents envisagent une pression de 4 bars.
- Abandon de la technologie de la « peau » :
 - des problèmes dans l'association béton / acier existaient sur les centrales graphite-gaz ; nous avons voulu les supprimer,
 - des entreprises différentes réalisaient le béton et la peau ; cela créait des problèmes d'interface ; un principe de base de la sûreté est de séparer les difficultés,
 - nous avons également constaté des cloquages de la peau à Tihange,
 - à Fessenheim, le coulis d'injection est passé à travers la gaine pas suffisamment étanche et a abîmé la peau,
 - par la suite, les améliorations de la technologie ont permis d'éviter l'apparition d'autres incidents ; les soucis étaient exagérés.

Enceintes 1300 MW sans peau

- L'absence de peau est compensée par un système à fuites contrôlées.
- Les études ont été nombreuses ; le taux de fuite doit être de l'ordre de 1 %.
- Nous avons réalisé une maquette à Saint-Rémy-les-Chevreuse (1,5 m sur 3 m en béton précontraint), afin de faire des essais simulant tous les défauts de chantier :
 - la maquette ne fuyait pas,

• à l'aide de vérins situés à l'intérieur, nous avons poussé sur les deux fonds de la maquette ; nous avons obtenu des fissures importantes ;

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

- les fissures ont été bouchées à la résine ; comme la résine prend mieux à haute température, un radiateur électrique a été utilisé ; celui-ci ayant par mégarde été laissé toute une nuit à l'intérieur de la maquette, la résine a bien pris, mais la paroi de la maquette a présenté des fissures thermiques ; de nombreuses fuites ont ainsi été créées, mais cela fuyait finalement peu car il s'agissait de microfissures,
- un essai à la vapeur d'eau a été demandé, afin de simuler un accident ; nous n'avons rien pour réaliser les mesures, mais nous avons tout de même constaté que rien ne sortait de l'enceinte (ni eau, ni vapeur) ; cela nous a convaincu que le taux de fuite de 1 % était jouable,
- La valeur limite admissible du taux de fuite (1 %) n'est pas toujours facile à tenir ; cela reste un dogme inamovible de la sûreté, et constitue notre marge de sécurité contre l'absence de peau.

Essais en vraie grandeur

- Une épreuve a eu lieu sur Paluel 1 ; nous étions inquiets car, dans l'espace entre les deux enceintes, nous entendions un fort bruit de fuites ; en fait, le taux était de 0,7 % ; cela nous a rassuré.
- Pour Paluel 2, nous sommes passés à un taux de 1,2 % ; des injections de produits spécifiques ont permis de faire tomber le taux en dessous de 1 % :
 - discussions stériles avec l'Autorité de Sûreté concernant le dépassement des seuils (0,99 est bon, alors que 1,01 % ne l'est pas).
- A Belleville, le béton était moins bon ; nous avons obtenu un taux de fuites de 1,8 % :
 - le Groupe Permanent a demandé la réparation de l'enceinte,
 - les fuites n'étaient pas localisées, le béton étant micro-poreux,
 - la seule solution envisageable fut un revêtement interne ; nous avons utilisé un polyuréthane suisse épais, appliqué surtout dans les parties hautes et basses de l'enceinte,
 - le résultat fut très décevant, car le taux de fuite était quasiment le même,
 - un revêtement externe fut ajouté, avec la même absence d'amélioration,
 - les cheminements des fuites devaient être complexes,
 - nous avons proposé d'augmenter le système de collecte et de filtration ; nous l'avons fait, mais cela n'est pas entièrement indispensable, en raison de la marge de sécurité sur les taux de fuites.
- A Flamanville, le béton a mal vieilli ; habituellement, la résistance du béton augmente avec le temps.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ**Béton et étanchéité**

- Un béton ordinaire est rempli de trous à l'échelle microscopique ; son étanchéité est due au maintien d'eau libre dans ces trous :
 - pour les enceintes, si le béton n'est pas suffisamment compact, l'eau se vaporise avec le temps et laisse libres les pores du béton,
 - entre un béton complètement sec et un béton humide, la perméabilité va de 1 à 100,
 - les caractéristiques de vieillissement vont dans le bon sens pour la résistance du béton, mais pas pour l'étanchéité ; une étude a été réalisée par Monsieur DUHOUX,
 - le taux de fuites de 1 % doit être utilisé seulement à la réception de l'ouvrage de génie civil, comme objectif de bonne réalisation,
 - les marges sont nécessaires pour faire face au vieillissement, car 40 ans constituent une longue période pour du matériel.

Fuites directes

- Les enceintes présentent des sas permettant l'entrée du personnel et du matériel :
 - les fuites à ce niveau sont les plus importantes.

P'4 (Palluel - Flamanville - Saint-Alban)

- P4 était très coûteux ; P'4 est dérivé du P4, avec l'objectif de réaliser des économies sur le génie civil :
 - en grattant sur les marges (un peu trop ?), tout en restant réglementaire, l'économie fut importante,
 - à Flamanville, un fluage trop important entraînera peut-être une diminution trop forte de la précontrainte.

Autres

- Développement du système TENSIO MAG :
 - une double bobine, située dans le béton, est sensible à la tension du câble ; en effet, la perméabilité magnétique change faiblement si le barreau situé à l'intérieur de la double bobine est tendu,
 - la mesure est délicate :

le fournisseur de précontraintes (FREYSSINET) a réalisé des appareils qui fonctionnent, mais sans suffisamment de précision et avec peu de fiabilité,

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

- le problème a été repris par des spécialistes ; l'appareil fonctionne en laboratoire, dans des conditions bien particulières (température constante, ...) ; l'étude est coûteuse et n'a pas été poursuivie ;
- le principe est très compliqué, mais un jour on y arrivera.

- Récemment, la tradition des constructeurs consiste à respecter les règlements, mais pas plus ; tout cela est dû à la tendance actuelle à retenir le moins disant ; les économies ainsi réalisées ne sont pas compréhensibles pour un exploitant, car l'interruption d'une tranche coûte très cher ; il ne sert à rien de réaliser de petites économies, on s'y retrouvera ensuite.

- En matière de sûreté, après l'annonce de l'obtention d'une marge de sécurité, on ne peut plus y toucher.

- Généralités concernant le génie civil :
 - précontrainte verticale : il ne doit pas y avoir de traction,
 - 1 MPa de contrainte résiduelle est habituel en génie civil,
 - le béton n'est pas parfaitement linéaire.

- Action d'EDF lors des travaux de construction :
 - définition du cadre des travaux,
 - étude du dimensionnement,
 - contrôle.

- EDF ne réalise pas les plans et sous-traite la réalisation.

- Nous sommes capables de vérifier en refaisant les calculs définitifs réalisés par les bureaux d'études (nous avons une fois réalisé les calculs en éléments finis) ; il serait intéressant d'être partie prenante dans ces calculs.

- Pour P'4, des réunions avec toutes les entreprises concernées ont permis un bon retour d'expérience débouchant sur des économies.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ**Partie 4 : Thème « Divers »****Etablissement du RCC-G**

- Il est bon de s'appuyer sur des règlements nationaux ; mais le nucléaire présente des particularités (accidents de référence, pression interne, essais en service, chutes d'avion, explosions, ...).
- Au début (Fessenheim, Bugey, Tihange), les enceintes étaient réalisées au forfait, avec un CDC (Cahier des Charges).
- Le RCC-G a été créé en réunissant tous les CDC des différentes centrales, jusqu'aux 900 MW ; il concerne les enceintes et tout leur environnement immédiat.
- Il s'agissait de faire reconnaître ces CDC par l'Autorité de Sécurité ; le premier RCC-G (décembre 1980) était d'ailleurs une RFS (Règle Fondamentale de Sécurité).
- Le RCC-G présente seulement des règles, sans explication ; il comprend :
 - une première partie pour la conception,
 - une seconde partie pour la réalisation et les essais,
 - des annexes,
- Plusieurs RCC-G successifs ont existé :
 - le premier traitait des 900 MW ; il est non public,
 - le deuxième traitait plutôt des 1300 MW (en 1985, et la révision 2 en 1988) ; il est édité par l'AFCEN, et peut être acheté en librairie,
 - en 1987, le RCC-GR était prévu pour traiter des règles particulières aux « Rapides » ou RNR ; il est resté à l'état de projet,
 - lors du projet européen EPR, une dernière édition du RCC-G a été réalisée ; elle prend le nom de ETCC (EPR Technical Code for Civil works), et est basée sur l'Eurocode 2.
- Le RCC-G est contracté avec l'administration ; il donne lieu à de nombreuses discussions.
- Le RCC-G est la loi ; or pour la partie exécution, le génie civil a une forte tradition d'adaptation ; cela constitue une grande difficulté avec les entreprises qui exécutent les travaux ; l'administration réalise des inspections par l'intermédiaire de la DSIN ; maintenant, les entreprises connaissent le RCC-G et font plus attention.
- Le RCC-G est particulièrement développé sur 2 points, précontrainte et peau d'étanchéité.
- Nous avons eu l'idée de l'exporter ; cela a été fait en Inde et en Chine, avec succès.
- La culture anglo-saxonne des indiens les amenait toutefois à être très pointilleux ; l'apport de Monsieur LACROIX a été important.
- En France, le RCC-G est un bon document, très pratique, qui résume assez bien les contraintes du nucléaire

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

- Le reste du monde (sauf l'Inde, la Grande-Bretagne et la France) utilise l'ASME (règles américaines).
- Le CCTG (Cahier des Clauses Techniques Générales) est un contrat entre EDF et l'entreprise qui exécute les travaux.

Simple enceinte drainée

- Ce principe prévoit une double enceinte réalisée en une seule ; un drain situé derrière la peau récupère les fuites :
 - les études,
 - pourquoi il n'a pas été donné suite.

R & D et actions diverses

- Le SEPTEN a toujours eu un devoir, même si celui-ci n'était pas toujours officiel, de représenter EDF à l'extérieur ; en participant au CORGEC, nous nous sommes fixé une activité de représentation du génie civil.
- le CORGEC (Comité d'Organisation et de Recherche en Génie Civil) est une émanation du Ministère de l'Équipement :
 - notre objectif est d'orienter la recherche actuelle :
 - BHP (Bétons Hautes Performances) :
 - grâce à l'État, nous avons réuni 50 partenaires ; les recherches sont intéressantes ; des contrats sont passés à des participants ; leur apport personnel permet de doubler le budget initial, soit au final 40 MF sur 5 ans,
 - étude de la résistance au feu des BHP ; le béton tient mieux au feu que le métal, mais le BHP est controversé car il dégage de l'eau qui ne peut être évacuée et fait exploser le béton ; le sujet est délicat,
 - autres projets nationaux,
 - le budget total est de l'ordre de 10 MF par an,
 - En France, la recherche en génie civil est partagée entre les ministères de l'Équipement et de la Recherche :
 - ils travaillent maintenant bien ensemble,
 - le budget total est faible, mais non négligeable,
 - le Ministère de la Recherche participe peu financièrement,
 - la France ne conçoit pas de recherche publique sans un chapeau de l'administration (corps des Ponts).
- IREX.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

- Expertise en Inde :
 - en particulier, discussions sur la partie courante.

Reconnaissance du métier EDF

- La renommée d'EDF en génie civil est exceptionnelle ; EDF est un maître d'ouvrage reconnu :
 - pour sa technique,
 - pour la manière de gérer les chantiers.

Maintenance

La maintenance sera également abordée lors de la réunion.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

Abréviations, sigles, synonymes

AFCEN	Appartient à l'AFNOR, pour le nucléaire
APRP	Accident par Perte du Réfrigérant Primaire
AQ	Assurance Qualité
ASME	American Society of Mechanical Engineers (code américain équivalent du RCC-G français)
BAX	Règlements concernant le Béton Armé (BA45, BAEL, ...)
BHP	Béton à Hautes Performances
BPE	Béton Prêt à l'Emploi
BTHP	Béton à Très Hautes Performances
BUHP	Béton à Ultra Hautes Performances
CCTG	Cahier des Clauses Techniques Générales
CDC	Cahier des Charges
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique
CORGEC	Comité d'Organisation et de Recherche en Génie Civil
DER	Direction des Etudes et Recherches de l'EDF
DES	Département Etudes de Sûreté du CEA - IPSN
DSIN	Direction de la Sûreté des Installations Nucléaires
DTG	Division Technique Générale de l'EDF
EAU	Enceintes Auscultation
EPN	Exploitation du Parc Nucléaire
EPR	European Pressurised Reactor
ETCC	EPR Technical Code for Civil works (code européen : dernière édition du RCC-G)
FIB	Fédération Internationale du Béton
FIP	Fédération Internationale de la Précontrainte
GC	Division Génie Civil de l'EDF
GTM	Grands Travaux de Marseille (actuellement Groupe DUMEZ)
GV	Générateur de Vapeur
HTR	Réacteur à Haute Température (ou à « boulets »)
IASME	voir ASME
IREX	Institut pour la Recherche Expérimentale en génie civil
LCPC	Laboratoire Central des Ponts-et-Chaussées

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

MAD	Mise à l'Arrêt Définitif
MTE	Mémento Technique de l'Équipement
ORI	Office Régional d'Intervention
R & D	Recherche et Développement
RCC-G	Règles de Conception et de Construction en Génie civil
RECORD	Recueil d'Expérience de Conception Orienté Recherche Documentaire
RFS	Règles Fondamentales de Sécurité
RNR	Réacteur à Neutrons Rapides
SECN	Société d'Études des Caissons Nucléaires
SEPTEN	Service Études et Projets Thermiques et Nucléaires (EDF)
SGE	Société Générale d'Entreprises
TEGG	Techniques d'Exécution Géologiques et Géotechniques
UNGG	Uranium Naturel Graphite-Gaz

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ**LISTE DES PARTICIPANTS A LA REUNION DE FINALISATION**

Les participants prévus pour la réunion de Finalisation du recueil de connaissances de Monsieur Jean-Louis COSTAZ sont :

- Madame CHAUVEL (Division Génie Civil),
- Monsieur Jean-Louis COSTAZ,
- Monsieur Bernard ANDRICQ (Responsable du projet RECORD),
- Monsieur CLAVERIE (Chef du Département Systèmes et Installation) : absent,
- Monsieur FAURY (DUMEZ / GTM),
- Monsieur LACROIX (Expert),
- Monsieur PICAUT (COYNE et BELLIER),
- Monsieur POUBLANC (Département TEGG),
- Monsieur J.P. TOURET (Chef de la Division Génie Civil),
- Monsieur Luc ALBERTY (EURIWARE).

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

**ELEMENTS D'EXPERIENCE
RELATIFS A LA GEOLOGIE ET A LA GEOTECHNIQUE**

EEX01 - Intérêt pour le génie civiliste d'une expérience de chantier**INTRODUCTION / CONTEXTE**

Au début de ma carrière au sein d'EDF, j'ai eu l'occasion d'acquérir une sérieuse expérience pratique, en participant à des chantiers et à la réalisation d'études géologiques et géotechniques :

- pour le creusement du canal EDF de Saint-Estève-Janson, près d'Aix-en-Provence,
- lors de la construction, puis de la mise en service de la centrale de Saint-Laurent-les-Eaux.

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUEEtudes géologiques et géotechniques

J'ai travaillé avec Monsieur GOUVERNET, professeur de géologie à Marseille, puis avec Monsieur FLORENTIN de la société MECASOL. Cette entreprise réalise depuis longtemps de nombreuses études pour EDF.

J'ai par exemple appris une méthode efficace et très simple à mettre en œuvre. Elle consiste à enlever la quantité de terrain qui correspond approximativement au poids de l'ouvrage qui va être construit.

A quelques mouvements près, de décompression, il n'y aura pas de tassement.

Cette expérience m'a été utile pour la construction du réfrigérant de CIVAUX.

Nous avons enlevé 15 mètres de sol, que nous n'estimions pas de qualité suffisante. Cela correspondait pratiquement au poids du réfrigérant. J'ai donc considéré que nous n'aurions pas de souci avec les tassements.

Les spécialistes ont tout de même recalculé un tassement, correspondant à l'implantation du bâtiment sur le nouveau sol obtenu après enlèvement de la couche superficielle.

Mise en service du caisson de la centrale de Saint-Laurent-les-Eaux

Je fus chargé de la mise en service du caisson de la centrale de Saint-Laurent-les-Eaux, en particulier pour la vérification des parties mécaniques et électriques.

J'étais seul pour accomplir cette tâche. Tout a très bien fonctionné malgré l'absence, à l'époque, de procédures d'Assurance Qualité.

Formation initiale des jeunes embauchés

Actuellement, le Département Théorie du SEPTEN est celui qui embauche le plus de jeunes ingénieurs.

Ils réalisent généralement des stages de 2 à 3 mois sur des chantiers.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ**AVIS / COMMENTAIRE**

Le travail sur chantiers permet d'acquérir des connaissances pratiques, qui sont difficiles à imaginer en observant uniquement un plan.

Même si cela est plus ou moins utile selon les caractères, je pense que cette expérience est importante.

Elle est aujourd'hui moins facile à acquérir, du fait de la diminution du nombre de chantiers en cours.

Savoir évaluer rapidement, à l'aide de principes simples, l'ordre de grandeur d'un paramètre ou d'un résultat permet d'éviter de nombreuses déconvenues.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTURExpérience pratique

Les jeunes ingénieurs sont habitués aux études théoriques. Commencer par une expérience professionnelle pratique me paraît extrêmement intéressant, en tout cas pour ce qui concerne le génie civil.

Il ne faut toutefois pas faire du chantier pendant trop longtemps, sauf si nous désirons y réaliser toute notre carrière. 2 ou 3 ans me semblent néanmoins nécessaires pour bien appréhender le sens des études théoriques, comprendre les essais de sol, connaître la géologie et la géotechnique, ...

Maîtrise d'oeuvre

La maîtrise d'oeuvre d'EDF était autrefois très importante.

Actuellement, EDF sous-traite une grande partie des études, ce qui rend beaucoup plus difficile l'acquisition des connaissances correspondantes.

La mise en service des centrales devrait être faite en grande partie par EDF.

DOCUMENTS DE REFERENCE

[1] Fiche MTE n° 155 : « Caractéristiques statiques des sols »

QUESTIONS/REPONSES (REUNION DE FINALISATION)**LACROIX :**

A la sortie des Grandes Ecoles, les jeunes ingénieurs sont bien rodés aux mathématiques. Il n'est pas mauvais qu'ils commencent leur carrière au sein d'un bureau d'études.

En effet, si un jeune diplômé commence par travailler sur des chantiers, il risque ensuite de devoir se reformer aux techniques de calculs.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

Par ailleurs, la formation alternée me semble une formule intéressante. Lorsque j'étais professeur à l'école des Ponts-et-Chaussées, les élèves totalisaient une année complète de chantier avant d'obtenir leur diplôme.

ANDRICQ :

La méthode allemande est analogue. Elle consiste à faire suivre aux ingénieurs une année d'exercices pratiques.

FAURY :

C'est le seul système efficace, car envoyer une personne pendant trois ans sur un chantier n'est pas rentable pour une entreprise, si ensuite cette personne est destinée à travailler au sein d'un bureau d'études.

Par contre, il est utile qu'un jeune ingénieur ait conscience des particularités propres aux chantiers, de la différence entre les plans et la mise en œuvre qui en découle, mais aussi des problèmes humains.

PICAUT :

Je connais un entrepreneur qui développait le point de vue inverse. Lorsqu'il sentait qu'un jeune désirait réellement travailler sur les chantiers, il lui proposait préalablement deux années au sein d'un bureau d'études.

Tous :

Ce n'est pas contradictoire.

PICAUT :

La maîtrise d'œuvre comprend deux parties :

- 1 - Les études.
- 2 - Le suivi de travaux.

Le suivi de travaux reste complètement assurée par EDF. Par contre, une certaine délégation a lieu pour les études concernant certains ouvrages.

TOURET :

Cette délégation est certainement plus importante dans le domaine nucléaire.

Les personnes qui travaillaient dans le domaine hydraulique se prévalaient souvent auprès de nous d'avoir réalisé elles-mêmes les études.

PICAUT :

Je n'en ai jamais entendu parler à l'extérieur d'EDF.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

TOURET :

Ce sentiment était surtout développé au sein d'EDF.

COSTAZ :

La mise en service des centrales au graphite-gaz était réalisée uniquement par EDF, à la fois par l'Équipement et par la Production Thermique. J'ai ainsi acquis énormément d'expérience.

Aujourd'hui, les tâches sont beaucoup plus réparties, et EDF acquiert une position de maîtrise d'ouvrage. En conséquence, les personnes de l'Équipement perdent un certain nombre de connaissances. Elles ne travaillent véritablement sur les centrales qu'au moment de leur mise en service.

En participant à la mise en service d'une centrale, nous pouvons également appréhender certains problèmes concernant des domaines connexes à notre spécialité, comme les pompes, la thermique, la chimie, ...

Même si une grande partie des études nucléaires est sous-traitée, EDF conserve une bonne maîtrise d'ensemble.

TOURET :

EDF conserve pas mal de compétences en génie civil, ce qui n'est pas toujours le cas dans d'autres domaines. Par exemple pour la chaudière nucléaire, les mécaniciens se contentent de passer le contrat avec FRAMATOME.

COSTAZ :

Le gros œuvre représente 15% du prix d'une centrale pressurisée. En incluant le sol, la fondation, la VRD, et tout ce qui est connexe, le génie civil au sens large représente 30% du prix. C'est du même ordre de grandeur que le coût de la chaudière.

Par tradition et par habitude des chantiers, EDF intervient plus pour le génie civil que pour d'autres domaines, comme la mécanique.

ANDRICQ :

Dorénavant, du fait de la très forte diminution du nombre de chantiers de réalisation, les jeunes vont rencontrer d'énormes difficultés pour former leur expérience.

FAURY :

Au sein de ma mission d'homogénéisation des méthodes avec les plans d'exécution fournis par EDF, mes interlocuteurs ont toujours largement anticipé sur les résultats du bureau d'études. La compétence d'EDF est donc totale, le bureau d'études n'étant destiné qu'à fournir les précisions ultimes.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

POUBLANC :

Jusqu'à maintenant, les grands groupes électromécaniciens ne possédaient pas de génie-civilistes. Ce que nous pourrions appeler le risque de dérapage vers le « clé en main » n'a pas encore atteint le génie civil.

ANDRICQ :

Les Mémentos Techniques de l'Équipement (MTE), rassemblent l'expérience et le savoir-faire d'EDF, en particulier de la Direction de l'Équipement. Mais certaines de ces fiches commencent à dater. En effet, plus des deux tiers n'ont pas été mises à jour depuis plus de dix ans.

COSTAZ :

Les paramètres qui caractérisent statiquement les sols n'ont pas sensiblement varié en dix ans.

Dans l'ensemble, les fiches MTE sont suffisamment générales pour être utiles malgré leur ancienneté.

Il serait préférable de les mettre à jour, mais ce travail est ingrat et n'est jamais prioritaire. La baisse d'activité permettra peut-être de dégager du temps pour entreprendre cette tâche.

ANDRICQ :

Chaque mise à jour dépend de la Division dépositaire des fiches concernées. Dans le cadre de ses contrats d'objectifs avec la Direction, la Division Génie Civil doit préciser si cela fait partie ou non des activités à développer.

COSTAZ :

Le Mémento Technique de l'Équipement consiste en une collection de fiches dont chacune réalise un point technique sur un sujet précis.

ANDRICQ :

Le MTE comprend 180 fiches.

TOURET :

Chaque année, nous prévoyons des heures pour la remise à jour de la plupart des fiches MTE. Compte tenu des autres priorités, cette activité est systématiquement retardée.

C'est vraiment dramatique. En effet quand je suis arrivé à EDF, je me souviens m'être beaucoup servi des fiches MTE. Elles représentent l'expérience de la maison.

Aujourd'hui, nous rencontrons des difficultés lorsque nous recommandons à un jeune ingénieur de suivre ce qui est indiqué dans une ancienne fiche.

Les fiches MTE sont très intéressantes. Elles constituent de véritables guides, et incluent de nombreuses références.

EEX02 – Risque d'erreur en se contentant d'essais en laboratoire

INTRODUCTION / CONTEXTE

MECASOL est une société sérieuse. Elle est pourtant à l'origine d'une erreur concernant les fondations de la centrale de Nogent-sur-Seine, construite sur de la craie.

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

2 types d'études de sol sont généralement pratiqués :

- les essais en laboratoire, à partir de prélèvements d'échantillons de sol : MECASOL privilégie cette méthode,
- les mesures in situ, à l'aide d'un pressiomètre qui fournit les caractéristiques du sol en place : cette méthode est utilisée par certains autres bureaux d'études.

L'essai triaxial et l'essai à l'oedomètre sont réalisés en laboratoire. Ils fournissent davantage de renseignements que les mesures in situ, mais leurs résultats peuvent être influencés par le remaniement du sol lors de son prélèvement.

Essai en laboratoire

A Nogent-sur-Seine, la craie était formée de nodules durs contenus dans une pâte beaucoup plus malléable.

L'oedomètre utilisé s'est révélé trop petit par rapport à la dimension des éléments durs. En conséquence, l'appareil n'appuyait pas sur l'ensemble du matériau, mais seulement sur les grains.

La valeur du module d'Young obtenu était donc beaucoup trop élevée.

L'essai prévoyait un tassement de quelques centimètres seulement.

Essai in situ

Au cours de la phase de recherche des sites d'implantation pour la centrale de Nogent-sur-Seine, la Division Géologie-Géotechnique d'EDF (actuellement TEGG) avait fait réaliser des essais in situ au pressiomètre. Ceux-ci avaient prévu un tassement de 40 cm.

Personne n'imaginant que la craie pouvait être de si mauvaise qualité, les essais au pressiomètre ont été considérés comme erronés.

Résultats

En réalité, nous avons obtenu un tassement de 33 cm.

Nous avons même craint un fluage latéral de la quasi-totalité du sol, sous l'effet du poids du bâtiment. Le tassement a maintenant pris fin.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

Le Bassin Parisien est une zone très peu sismique. Un séisme sur un sol aussi mou aurait eu tendance à accentuer le tassement.

AVIS / COMMENTAIRE

L'étude des sols constitue un domaine très complexe, sur lequel même des sociétés sérieuses peuvent faire des erreurs.

En général, un bon mécanicien des sols prend une marge de sécurité. Il prévoit un tassement plus important que la réalité, jusqu'à deux fois le tassement réel.

La Région d'Equiperment de Paris était responsable de l'adaptation au sol de la centrale de Nogent-sur-Seine. Elle se fait à son bureau d'études habituel. Les avis du SEPTEN ou du Département TEGG n'étaient pas vraiment pris en compte.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR

Il est toujours utile de connaître l'ordre de grandeur du phénomène étudié.

Nous préconisons l'utilisation en parallèle de 2 méthodes d'investigation, une en laboratoire et une in situ, afin de pouvoir ensuite comparer les résultats.

Lorsqu'apparaît une divergence sensible entre les résultats obtenus par des méthodes différentes, il faut toujours essayer d'en comprendre la raison, avant de postuler une erreur de mesure.

Au sein des fiches MTE, une note ([1]) a été réalisée par le SEPTEN en ce sens.

DOCUMENTS DE REFERENCE

- [1] Fiche MTE n° 155 : « Caractéristiques statiques des sols »
- [2] Fiche MTE n° 002 : « Caractéristiques dynamiques des sols (l'analyse sismique) »
- [3] Fiche MTE n° 037 : « Protection de et contre la nappe souterraine »
- [4] Fiche MTE n° 070 : « Critères généraux des choix des sites nucléaires »
- [5] Fiche MTE n° 160 : « Calage et implantation d'une centrale »

QUESTIONS/REPNSES (REUNION DE FINALISATION)

PICAUT :

Les essais de sol avaient été réalisés sur des échantillons non représentatifs.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

POUBLANC :

Il est difficile de ne pas remanier un échantillon de sol avant son analyse. Le problème est fréquent.

COSTAZ :

L'étude de sol constitue le domaine le plus délicat du génie civil.

Il est très intéressant de confronter des résultats issus de bureaux d'études différents, même si cela coûte un peu plus cher au départ.

PICAUT :

Chaque bureau d'études était très spécialisé. MECASOL refusait-il de prendre connaissances des essais qui ne provenaient pas d'un laboratoire, ou bien leur mission était-elle partielle, et consistait à déduire les tassements à partir des seuls essais en laboratoire ?

COSTAZ :

La mission de MECASOL consistait à réaliser des études de sol, afin d'en déduire les tassements.

Nous ne leur avons rien imposé. Ils avaient leurs habitudes, et nous étions confiants envers l'ingénieur conseil.

La Région d'Équipement de Paris a eu connaissance des essais réalisés par TEGG, préalablement à l'ouverture du site. Ces essais ont été considérés comme erronés. Je ne sais même pas si MECASOL a été informé.

POUBLANC :

Ce dysfonctionnement était probablement lié à des conditions particulières de management, sur de tels projets à l'époque. Aujourd'hui, cela ne devrait plus se reproduire.

LACROIX :

Cet événement concerne l'époque postérieure à Monsieur FLORENTIN. Il est dangereux qu'un bureau d'études repose sur une seule personne.

PICAUT :

De surcroît, MECASOL repose quasiment sur un unique procédé.

Monsieur FLORENTIN possédait une technique de mise au point particulière et avait une connaissance très approfondie de l'essai triaxial, qui représentait la base de l'activité de la société MECASOL.

COSTAZ :

Je suis surpris qu'ils aient pu être piégés par la taille de l'éprouvette.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ**TOURET :**

Concernant les études de sol, les pièges sont nombreux.

Par exemple en 1980, nous avons dû effectuer des essais au pressiomètre et au pénétromètre, sous la surface des réfrigérants de Dampierre. En effet, les essais in situ avaient été trop limités. Or le sous-sol, constitué de karsts, était très hétérogène.

Des injections ont ensuite été réalisées sous les réfrigérants.

COSTAZ :

Il est toujours difficile de prévoir la quantité optimum d'essais de sol à effectuer.

A Dampierre, deux sondages réalisés à quelques mètres de distance donnaient parfois des résultats complètement différents.

TOURET :

A l'inverse, de trop nombreux essais sont difficiles à interpréter.

CHAUVEL :

Pour les aéro-réfrigérants de Civaux, nous avons instauré un partage des responsabilités concernant les sols.

COSTAZ :

Contrairement à l'îlot nucléaire, le réfrigérant est sous la responsabilité d'une entreprise. Il est acheté « clé en main » à une société qui garantit un certain refroidissement d'eau.

Compte tenu des habitudes d'EDF, il ne s'agissait pas tout à fait d'un « clé en main », mais l'entreprise prenait les décisions.

Dans ce cas, les problèmes de sol sont encore plus cruciaux, compte tenu du fait que l'entreprise arrive tardivement sur le projet. En effet, l'appel d'offre est connu peu de temps seulement avant que ne commencent les travaux. L'entreprise prend donc la responsabilité du sol, sans avoir les moyens de véritablement le connaître. En cas de problème dû au sol, la recherche des responsabilités devient inextricable.

A partir de Civaux, nous avons essayé d'instaurer une responsabilité partagée.

EDF devait donner à l'entreprise un dossier géotechnique de bonne qualité. L'entreprise proposait alors un type de fondations, et la décision était prise en accord.

Cette procédure, habituelle, est ainsi devenue officielle.

Le partage des responsabilités fonctionne bien, même si à Civaux nous avons réalisé trop d'essais. Le sol consistait en une succession de couches dures et de couches molles d'argile surconsolidée.

Pour chaque couche dure identifiée, nous voulions observer la qualité du matériau situé immédiatement en dessous. Ce faisant, nous arrivions toujours dans une nouvelle couche molle. Nous cherchions alors la couche dure suivante. Nous avons ainsi creusé assez profond, avant de décider de nous arrêter.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

ELEMENTS D'EXPERIENCE
RELATIFS AUX FONDATIONS ET AUX CAISSONS EN BETON

EEX03 – Assurance qualité et documentation

INTRODUCTION / CONTEXTE

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

La centrale de Saint-Laurent-les-Eaux a fonctionné pendant 25 ans sans panne majeure.

La qualité du matériel produit et installé préexistait donc à l'apparition des procédures d'Assurance Qualité.

Néanmoins, cette méthode possède de nombreux avantages, en particulier pour la traçabilité.

Pour améliorer la qualité et le suivi du travail accompli, mon chef avait instauré une pratique en avance sur son temps. Il nous demandait d'explicitier par écrit nos projets avant de les réaliser. Cette façon de procéder présentait en outre l'avantage de nous forcer à réfléchir et à prendre l'avis des diverses personnes concernées.

Aujourd'hui par contre, nous produisons trop de documents.

Archivage des documents

Il ne suffit pas de conserver des armoires pleines de documents. Il est nécessaire de pouvoir retrouver tous les documents utiles lorsque nous en avons besoin, et cela même après plusieurs années.

L'archivage électronique et la possibilité de sélection à l'aide de mots-clés, permettent aujourd'hui de réaliser un stockage des informations beaucoup plus aisé et efficace.

Par exemple pour les réfrigérants, nous avons archivé sur CD-ROM la plupart de nos documents (« avant-projet », projet d'exécution, calculs, suivi du chantier avec ses incidents, ...).

Un logiciel permet d'interroger notre base documentaire, en précisant la zone concernée (fondation, coque, ...).

Cette méthode d'archivage a été mise en place parfois longtemps après la clôture du chantier. Appliquée dès le début d'une étude ou d'une réalisation, elle se serait révélée encore plus efficace.

~~Actuellement, tous les documents sont scannés et portés au Fonds Documentaire d'un mot d'Unité. Mais nous ne disposons pas toujours d'un moyen efficace de les retrouver.~~

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZSignatures des documents

La série des signatures, nécessaires sur tout document rédigé, constituent une dilution des responsabilités.

Doivent en effet signer successivement, le réalisateur, le vérificateur, le Chef de Division, et le Chef de Département. Chaque signature a un rôle différent : aspect technique, diffusion, confidentialité, ...

Auparavant, deux signatures suffisaient, celle du réalisateur et celle d'un contrôleur.

AVIS / COMMENTAIRE

Si le nombre de signataires est trop élevé, chaque intéressé a tendance à se reposer en partie sur les autres personnes qui lisent le document avant ou après lui.

La procédure des signatures est longue et pas toujours utile. Deux signatures présentent l'avantage de la clarté et de l'efficacité.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR

Un bon système d'archivage est absolument nécessaire.

DOCUMENTS DE REFERENCEQUESTIONS/REPONSES (REUNION DE FINALISATION)**LACROIX :**

Auparavant, la qualité était basée sur la conscience professionnelle.

L'Assurance Qualité est d'ailleurs mal nommée, car elle garantit un savoir-faire, mais pas la bonne réalisation du travail prévu. Ce n'est donc pas une garantie de qualité, mais une garantie de moyens. La vigilance doit donc rester la même.

ANDRICQ :

C'est pour cela que nous lançons le projet TQM (Total Quality Management). L'Assurance Qualité est justifiée, mais n'est pas une garantie en soi.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ**FAURY :**

L'Assurance Qualité est positive, mais seulement si la culture des entreprises concernées possède le même état d'esprit. En effet, si les lois ne correspondent pas aux habitudes des personnes qui doivent les respecter, il est d'usage de tricher.

Par exemple dans les entreprises, un spécialiste de l'écriture des documents rédige généralement la documentation pour le compte du chef d'équipe, du chef de chantier, du conducteur de travaux, voire même du directeur de l'entreprise. Pour autant, la culture de l'entreprise n'a pas changé.

Si la culture évolue, l'Assurance Qualité devient alors un instrument merveilleux.

Mais, ce n'est généralement pas le cas aujourd'hui.

COSTAZ :

L'Assurance Qualité est issue des militaires et du travail en usine. Il n'est pas très aisé de l'appliquer au génie civil.

Malgré cela, l'Assurance Qualité a eu un effet positif face aux perpétuels conflits, dans les années 1960, entre le Maître d'Ouvrage et les entreprises réalisatrices. Aujourd'hui, les entreprises prennent leurs responsabilités, avant même que le responsable du suivi des travaux n'ait besoin d'intervenir.

CHAUVEL :

L'archivage sur CD-ROM des documents concernant les réfrigérants est aujourd'hui pratiquement terminé.

Nous allons maintenant essayer de mettre en place un archivage du même type concernant les enceintes. Il est intéressant d'utiliser toute la puissance actuelle de l'électronique et de l'informatique.

Toutefois, cette démarche n'est pas prioritaire.

COSTAZ :

Nous avons rencontré beaucoup de difficultés pour retrouver certains documents concernant les réfrigérants. Pourtant, ces documents étaient assez récents. Cela montre tout l'intérêt d'un archivage électronique sérieux.

Nous devons avoir en permanence le souci de garder une trace des éléments importants ayant permis la conception et la construction. Mais, la facilité nous fait maintenant conserver trop de documents.

EEX04 – Mise en service de la centrale de Saint-Laurent-Les-Eaux**INTRODUCTION / CONTEXTE**

A l'époque de la mise en service de la centrale de Saint-Laurent-les-Eaux, j'appartenais à la Direction de l'Équipement d'EDF.

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

Nous étions chargés de mettre en service la centrale, pour montrer ensuite à l'Exploitant qu'elle fonctionnait correctement. Ma partie concernait uniquement le caisson.

Nos moyens étaient réduits, surtout en ce qui concerne les vérifications. Nous étions moins nombreux qu'actuellement, mais aussi plus responsables.

L'Exploitant revérifiait tout ce que nous avons fait. Ensuite, il prenait en charge le fonctionnement de la centrale.

Mises en service actuelles

Aujourd'hui, l'Exploitant participe davantage, et dès le début, aux essais de mise en service d'une centrale.

Nous constituons avec lui des équipes mixtes. Celles-ci sont utiles, par la mise en commun de points de vue différents. L'Équipement connaît mieux les systèmes mis en place, alors que l'Exploitant appréhende mieux la conduite d'une tranche.

AVIS / COMMENTAIRE

L'ancienne méthode est redondante, mais elle a fait ses preuves.

La mixité actuelle des équipes de mise en service constitue un avantage certain. Une meilleure coopération entre la Direction de l'Équipement et la Direction Production - Transport a permis des actions plus rapides et de meilleure qualité.

D'ailleurs, les deux Directions sont maintenant regroupées au sein d'un seul organisme, le Pôle Industrie.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR

Il est important de pouvoir bénéficier d'un éclairage sur les techniques connexes à celles que nous maîtrisons.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

DOCUMENTS DE REFERENCE

QUESTIONS/REPONSES (REUNION DE FINALISATION)

Pas de remarque particulière des participants à la réunion de finalisation.

EEX05 – Mesures des déformations de la structure des caissons

INTRODUCTION / CONTEXTE

Sous l'impulsion de la DTG (Division Technique Générale), chargée des mesures sur les ouvrages en service, nous avons bénéficié de l'expérience acquise depuis cinquante ans sur les barrages EDF.

Les mêmes appareils ont été utilisés sur les centrales nucléaires, car ils donnaient entière satisfaction.

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

Mesures au dynamomètre

Diverses familles de câbles d'auscultation (horizontaux, verticaux, en nappes) ont été installés sur les caissons. Chaque caisson comportait une douzaine de câbles d'auscultation injectés à la graisse.

Un dynamomètre TESTUT était installé aux deux extrémités des câbles. L'appareil était constitué d'un cylindre en acier dur, dont la déformation était mesurée par des jauges.

A l'époque pour les caissons, la relaxation des câbles était de l'ordre de 12%.

Aujourd'hui pour les enceintes de confinement, nous utilisons des câbles à très basse relaxation. Au bout d'un temps infini, la relaxation atteint seulement 3 à 4%.

Nous observons une différence significative entre l'extrémité de traction et l'extrémité passive des câbles. Nous avons ainsi pu vérifier que les câbles verticaux rectilignes frottaient.

Pour des raisons de température, de vibrations, ..., les tensions aux deux extrémités du câble variaient dans le temps. Leurs valeurs se rapprochaient progressivement, grâce à un léger mouvement du câble.

Mesures aux témoins sonores

De nombreux témoins sonores étaient également installés sur les caissons. Ils permettaient également de mesurer les déformations de la structure.

Il s'agissait de cordes vibrantes de même longueur que la portion de béton mesurée (10 à 20 cm).

Le principe des témoins sonores consiste en une mesure de leur fréquence de vibration. Celle-ci dépend principalement de la longueur de la corde, c'est-à-dire de la déformation du béton. Mais la température influe également (voir chapitre suivant).

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ**AVIS / COMMENTAIRE**

Les dynamomètres fonctionnent bien, à condition qu'il n'y ait pas d'humidité. Le principe de mesure est conservé aujourd'hui, en protégeant l'appareil.

Les témoins sonores fonctionnent mieux pour un matériau homogène et non fissuré, donc en précontrainte plutôt qu'en béton armé.

Les frottements des câbles d'auscultation ne créent pas de difficulté car ils restent faibles.

Evolution des câbles de précontraintes

En France, les câbles qui ne servaient pas aux mesures étaient généralement injectés au coulis de béton et constituaient un ensemble monolithique béton-câbles.

Actuellement, les câbles sont de plus en plus souvent injectés à l'aide d'un produit souple. Ce principe permet ensuite de changer le câble ou de le retendre.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR**DOCUMENTS DE REFERENCE**

[1] The prestressed nuclear containment - Cost saving on the french project

J.C. BERTEL, M. POUSSE, E. FAURE, G. ITHURRALDE

EDF - SEPTEN, Freyssinet international, Groupement pour la Précontrainte Nucléaire, 1986

QUESTIONS/REPONSES (REUNION DE FINALISATION)

PICAUT :

La DTG ausculte également les barrages importants, dont la hauteur est supérieure à 15 mètres.

COSTAZ :

Leur expérience concerne une cinquantaine de barrages, souvent construits en béton. Les cordes vibrantes, inventées par Coyne et Bellier, y sont utilisées de manière systématique. Au bout de 50 ans, elles fonctionnent toujours.

LACROIX :

La mesure des déformations est intéressante, mais il est ensuite nécessaire d'interpréter les résultats.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

La centrale au graphite-gaz de Bugey était instrumentée de nombreuses cordes vibrantes et de nombreuses jauges de contraintes. EDF s'est trouvé dans l'incapacité d'exploiter tous les résultats.

La Société d'Etudes des Caissons Nucléaires (SECN) nous avait passé une commande d'étude, afin de dépouiller ces résultats. Cette étude n'a pas plus abouti.

La mise en œuvre de moyens de mesures des déformations, nécessite de prévoir à l'avance la synthèse que nous voulons en faire, le suivi prévu, le type de conclusions recherché, ...

COSTAZ :

Les mesures sont relativement simples, et sont de plus en plus automatisées. Par contre, l'exploitation des résultats est beaucoup plus délicate.

La DTG s'intéresse à la sécurité de l'ouvrage, avec l'idée d'observer les dérives des mesures de déformations.

Les mesures effectuées permettent généralement d'obtenir le module du béton, et sa variation dans le temps. Le béton étant un matériau complexe, aux effets différés, il est difficile de détecter tous les phénomènes qui s'y produisent.

COSTAZ :

L'étude des déformations est intéressante, car la destruction d'un ouvrage est toujours la conséquence d'une déformation excessive, nettement au delà de la déformée élastique.

Même si nous ne comprenons pas toujours ce que signifient les déformations observées, il est important de les mesurer.

PICAUT :

Les témoins sonores ont pas mal évolué avec le temps.

Il y a une cinquantaine d'années, leur lecture était beaucoup moins aisée qu'aujourd'hui.

Par ailleurs, les matériaux constituant la coque étaient différents de ceux de la corde. Les coefficients de dilatation n'étaient pas les mêmes, ce qui compliquait les interprétations.

Pour finir, les mesures réalisées à l'aide de témoins sonores sont souvent livrées corrigées, sans que nous sachions de quelle façon elles l'ont été.

COSTAZ :

Elles sont corrigées statistiquement (voir chapitre suivant).

PICAUT :

Nous demandons toujours les mesures brutes, ainsi que les mesures de températures, de façon à réaliser nous-mêmes l'interprétation.

EEX06 – Elimination statistique des effets parasites sur les mesures de déformations des structures

INTRODUCTION / CONTEXTE

Le résultat d'une mesure de déformation des structures (voir chapitre précédent) est souvent perturbé par la température. Heureusement, l'acier et le béton ont à peu près le même coefficient de dilatation.

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

La méthode de la DTG (Division Technique Générale) consiste à faire un traitement statistique, grâce à la prise en compte de nombreuses mesures. Par exemple, nous réalisons sur les enceintes des mesures tous les trois mois.

Une relation simple exprime la proportionnalité entre la mesure réalisée et un grand nombre de paramètres influents. Pour les caissons, ces paramètres sont :

- la pression interne,
- la température interne,
- d'autres paramètres : la température de l'appareil lui-même, la température d'autres zones du caisson, ...

Grâce à un grand nombre de mesures, nous obtenons suffisamment d'équations pour résoudre le problème. L'expérience nous a montré qu'au moins cinquante ou cent mesures sont nécessaires.

La méthode est intéressante car, à chaque nouvelle mesure, le système peut être amélioré. Les coefficients rattachés à chaque paramètre sont recalculés périodiquement.

Paramètres mesurés

L'évolution de la structure est mesurée à caractéristiques constantes, sauf en ce qui concerne la température.

Enceintes de confinement

Les mesures réalisées sur les enceintes de confinement fournissent essentiellement des informations concernant le fluage de la structure.

Caissons

Les caissons sont également soumis à une pression interne permanente.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

Par contre, ils sont moins sensibles à la température ambiante que les enceintes, du fait de leur protection par un bardage.

AVIS / COMMENTAIRE

Je ne croyais pas à cette méthode uniquement statistique. Je me suis aperçu qu'elle permettait d'éliminer progressivement les effets parasites de l'environnement. Ceci est important, car les effets thermiques gênent considérablement les mesures.

La méthode présente l'avantage de fonctionner, même sans l'aide d'une théorie physique du phénomène étudié.

Sa fiabilité est très bonne.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR**DOCUMENTS DE REFERENCE****QUESTIONS/REPOSES (REUNION DE FINALISATION)**

COSTAZ :

A partir d'une trentaine de mesures, nous pouvons, statistiquement et sans l'aide de la physique, séparer les effets de la température des autres effets parasites.

Je constate que cette méthode fonctionne et donne une indication sur la physique du phénomène observé.

Toutefois, lorsque surviennent des variations inopportunes, nous devons les expliquer à l'aide de la physique du phénomène dans l'ouvrage. Cela devient alors délicat.

EEX07 – Mesures des contraintes supportées par les structures

INTRODUCTION / CONTEXTE

En général, les mesures réalisées sur les structures, à l'aide de témoins sonores (voir les deux chapitres précédents) ou d'autres méthodes, ne mesurent que des déformations.

Seuls les dynamomètres mesurent des forces.

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

Nous avons depuis longtemps essayé de mesurer les contraintes présentes dans le béton, mais la mesure d'une pression dans un solide n'est pas aisée.

Pour ce type de mesures, un témoin sonore est placé dans la structure à mesurer, entre deux vérins plats susceptibles de modifier le champ de contraintes.

En l'absence de pression dans les vérins, la déformation du témoin sonore est presque nulle. Nous faisons ensuite monter progressivement les vérins en pression, jusqu'à obtenir une déformation du témoin sonore identique à celle mesurée dans une zone analogue. La pression mesurée correspond alors à la contrainte présente au sein du béton.

De nombreux essais de ce type ont été réalisés aux Etudes et Recherches.

Comme souvent, les mesures sont correctes si elles sont réalisées au sein d'un laboratoire. In situ, cela n'a jamais été le cas.

J'ai eu l'occasion, avec la Société Campenon Bernard, de manipuler ce type d'appareils sur le pont de Saint-Cloud. Nous ne sommes jamais arrivés à le faire fonctionner correctement, essentiellement pour des problèmes pratiques.

Cellules GLOETZ

Le principe des cellules GLOETZ est le même que précédemment, avec un seul vérin au lieu de deux.

La pression nécessaire pour ramener dans son état initial la cellule déformée par sa mise en situation, est égale à la contrainte présente dans le sol ou dans le béton.

Les cellules GLOETZ ont été utilisées pour la centrale de Creys-Malville. Un laboratoire, installé sur le chantier, avait été confié à un thésard de l'INSA de Lyon. Elles ont très bien fonctionné pour les études de sol.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

AVIS / COMMENTAIRE

Les cellules GLOETZ sont surtout prévues pour étudier les contraintes dans les sols, qui sont constitués de matériaux déformables. Elles ne permettent pas de mesurer de façon suffisamment précise les contraintes dans un matériau raide comme le béton.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR

La mesure des contraintes supportées par les structures est une bonne idée, mais je crois qu'il faut l'abandonner, à cause de l'influence de nombreux parasites sur le résultat des mesures.

DOCUMENTS DE REFERENCE

QUESTIONS/REPONSES (REUNION DE FINALISATION)

LACROIX :

La fiche précise que « pour les mesures des contraintes, un témoin sonore est placé dans la structure à mesurer, entre deux vérins plats susceptibles de modifier le champ de contraintes ». Pour cela, faut-il scier le béton ?

COSTAZ :

Non, si la mesure est prévue avant.

LACROIX :

Lors du coulage du béton, il faut donc ménager un espace pour les vérins.

COSTAZ :

La méthode était astucieuse, mais il était difficile de trouver deux points véritablement identiques.

PICAUT :

L'efficacité des cellules GLOETZ dépend beaucoup de la qualité de leur mise en place.

TOURET :

Concernant les mesures de contraintes, une R & D a-t-elle été lancée ?

COSTAZ :

La DER s'occupait de ces mesures.

EEX08 - Suivi des ouvrages EDF par la division technique générale

INTRODUCTION / CONTEXTE

Sur un chantier, les paramètres ne sont pas aussi bien maîtrisés qu'en laboratoire où, de surcroît, les personnes sont habituées à réaliser des mesures.

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

Le suivi des ouvrages EDF, centrales nucléaires et barrages, est de grande qualité, car un organisme particulier en est chargé. La DTG (Division Technique Générale) est composée de 200 à 300 personnes.

Le Service Auscultation de la DTG possède les moyens nécessaires à la réalisation des mesures et à leur interprétation.

L'intérêt de la DTG réside dans son habitude à réaliser des mesures in situ.

Mais les personnes de la DTG sont plus des statisticiens que des physiciens.

Ils sont surtout intéressés à corriger les valeurs mesurées, à l'aide de leur méthode statistique (voir chapitre « Elimination statistique des effets parasites sur les mesures de déformation des structures »), puis à représenter les résultats sur un graphique en fonction du temps.

Ils vérifient la linéarité du phénomène, essayent de déceler la moindre inflexion de la courbe vers le haut ou vers le bas, et repèrent les variations de pentes importantes, qui sont susceptibles d'indiquer une alarme.

Ne possédant pas toutes les caractéristiques issues de la conception, ils ne peuvent pas toujours expliquer le phénomène observé. Toutefois aujourd'hui, à force de réaliser des mesures et de découvrir un certain nombre d'anomalies, leur expérience de la physique des phénomènes s'est enrichie.

Interprétation des résultats

Une droite indiquant une déformation lente matérialise un phénomène normal :

- si la déformation est dans le sens de la diminution, il s'agit d'un fluage,
- si elle augmente légèrement, cela peut provenir de la relaxation des câbles.

Une évolution rapide est évidemment anormale.

Procédure de suivi des ouvrages

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZRéalisation des mesures

L'exploitant des centrales a la charge de réaliser tous les trois mois les nombreuses mesures d'auscultation le concernant.

Conformément à une demande de la DTG, les mesures sont de plus en plus automatiques et télémessurées.

La DTG a également formé des personnes sur place, chargées de réaliser les mesures non encore automatiques. Mais les mesures perturbent souvent le chantier ou l'exploitation en cours. Elles ne sont donc pas faites systématiquement, ou parfois avec trop de précipitation.

L'automatisation des mesures n'a pas toujours été acceptée par l'Équipement, à cause de son coût important. Mais elle se généralise, car elle évite les erreurs manuelles et permet d'augmenter facilement le nombre de mesures.

Suivi des mesures

Les mesures réalisées sont ensuite envoyées à la DTG, pour leur enregistrement et leur traitement.

Périodiquement, certaines personnes de la DTG se déplacent également sur les sites, afin de vérifier qu'il n'y a pas d'erreur d'enregistrement due, par exemple, à la dérive des appareils.

La DTG ne réalise donc pas les mesures, mais les suit, les vérifie et les interprète.

Pour ce travail, 50 à 70 personnes sont situées à Lyon (pour le nucléaire) et à Grenoble (pour les barrages).

Concernant le nucléaire, ils suivent chaque ouvrage important : enceintes de confinements, caissons, réfrigérants atmosphériques, et massifs supports de groupes turbo-alternateurs.

Edition des résultats

Tous les 2 ans, la DTG produit des rapports pour chaque ouvrage suivi. Le SEPTEN fait partie des destinataires. Les conclusions des rapports sont fournies à la DSIN.

En cas de dérive constatée, la DTG nous prévient avant la publication du document.

Le SEPTEN est alors chargé de présenter une conclusion définitive sur le problème soulevé.

AVIS / COMMENTAIRE

En toute rigueur, il faudrait pouvoir réaliser des mesures in situ comme si nous étions dans un laboratoire. Pour la centrale de Creys-Malville, un laboratoire avait été installé sur le chantier et confié pendant 3 ans à un thésard de l'INSA de Lyon.

Cela peut constituer une bonne solution, permettant d'obtenir des mesures fiables, et réalisées de façon suffisamment continue.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

Sur les centrales en exploitation, les mesures sont parfois confiées à des manoeuvres. Ce n'est pas souhaitable. Les mesures devraient être réalisées par des techniciens qui doivent accepter d'aller de temps en temps sur les chantiers.

La procédure de suivi des ouvrages fonctionne correctement.

La DTG remplit le rôle important d'alarme, ce qui permet au SEPTEN de n'intervenir que lorsqu'un phénomène pourrait se révéler anormal.

Il est alors important que l'information revienne au concepteur, afin qu'il puisse comprendre physiquement ce qui se passe.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR**DOCUMENTS DE REFERENCE****QUESTIONS/REPONSES (REUNION DE FINALISATION)**

PICAUT :

Le choix de la mesure initiale est très important. En effet, nous partons souvent d'un point qui ne représente pas le début du phénomène.

Il est important de suivre les mesures au plus près, dès le coulage du béton.

La DTG en est bien consciente aujourd'hui.

COSTAZ :

Auparavant, la DTG prenait en charge les mesures après que l'Equipement lui en ait confié les responsabilités. Les premières mesures étaient donc réalisées par une entreprise extérieure.

Ainsi, la DTG avait beaucoup de difficultés à trouver le point origine.

CHAUVEL :

Nous aurions intérêt à donner à la DTG la liste des critères qui nous intéressent, ainsi que les nouvelles méthodologies. Par exemple, les fibres optiques présenteront certainement de l'intérêt dans le futur.

FAURY :

L'entreprise ne peut réussir dans sa mission que si elle possède sur le chantier un technicien qui prend en compte, comme sa propriété, l'ensemble du suivi. Cette personne doit être choisie.

Il serait bon de mettre cette obligation dans le cahier des charges.

EEX09 - Pseudo phénomène d'alcali-réaction dans le béton du caisson de la centrale de Saint-Laurent-les-Eaux

INTRODUCTION / CONTEXTE

Sur le caisson de la centrale de Saint-Laurent-les-Eaux, nous avons cru détecter le phénomène d'alcali-réaction, qui consiste en une réaction chimique entre les alcalins du ciment et certains types de granulats présents dans le béton.

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

Des fissurations non négligeables, de l'ordre de quelques millimètres, apparaissent dans les zones les moins comprimées du caisson.

En effet pour permettre le gonflage et les accès de personnel et de matériel, un caisson présente des orifices qui forcent la précontrainte à s'écarter, afin de les contourner. La compression n'est donc pas uniforme. Des tractions existent probablement, ce qui pourrait suffire à produire de petites fissures.

Les fissures que nous observions ne constituaient pas un réel souci, car elles n'étaient pas traversantes pour l'épaisseur du caisson, à savoir 5 mètres de béton.

Nous avons envoyé des échantillons à plusieurs laboratoires spécialisés, aux Etats-Unis, en Angleterre, et au Canada.

Ils ont tous conclu qu'il s'agissait d'un effet chimique d'un genre non répertorié, mais qu'il ne s'agissait pas d'alcali-réaction.

AVIS / COMMENTAIRE

Les granulats potentiellement réactifs à l'alcali des bétons sont décelables par analyse pétrographique. Mais même pour ceux-ci, les cas observés d'alcali-réaction sont rares.

Le phénomène est mal connu. Nous savons qu'il nécessite de l'eau et apparaît, souvent, pour des températures supérieures à 20°C. La réaction entre le ciment et les granulats produit autour de ces derniers des gels susceptibles de gonfler en présence d'eau.

Le gonflement se produit généralement longtemps après la construction, la période critique se situant environ au bout de 15 ans.

Le phénomène local de Saint-Laurent-les-Eaux n'a pas pu être reconstitué en laboratoire.

La précontrainte équilibre à peu près la pression. Autour des zones singulières, le béton est probablement tendu, ce qui explique la présence des fissures.

Il serait intéressant d'observer l'évolution du phénomène après suppression de la pression.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

Toutes les centrales du type UNGG étant actuellement mises à l'arrêt définitif (MAD), cette observation peut être réalisée aisément. Cela a peut-être déjà été fait.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR

Le phénomène est difficile à cerner. Par exemple, à Saint-Laurent-les-Eaux, nous n'avions pas, à l'époque, trouvé de gel. Il faudrait refaire les essais avec les méthodes actuelles.

D'autres renseignements utiles existent certainement à la DTG, au sein des rapports réalisés par celle-ci sur les ouvrages concernés (voir chapitre précédent, paragraphe « Edition des résultats »).

DOCUMENTS DE REFERENCE

[1] The prestressed nuclear containment - Cost saving on the french project

J.C. BERTEL, M. POUSSE, E. FAURE, G. ITHURRALDE
EDF - SEPTEN, Freyssinet international, Groupement pour la Précontrainte Nucléaire, 1986

QUESTIONS/REPONSES (REUNION DE FINALISATION)

COSTAZ :

Le phénomène décrit remonte aux années 1960 - 1970. Je veux ainsi montrer que certains phénomènes ont encore une origine inconnue.

LACROIX :

Nous avons depuis réalisé quelques progrès dans la chimie des réactions différées du béton. Il s'agit d'une famille bien précise de réactions qui aboutissent à la formation d'une étringite bien particulière.

TOURET :

Des échantillons ont été prélevés à l'époque. Y a-t'il un intérêt à reprendre l'étude ?

COSTAZ :

Il serait intéressant de savoir ce que deviennent les fissures et le béton lorsque la pression interne n'existe plus.

LACROIX :

L'inverse est également vrai, car les anglais ont proposé d'arrêter le phénomène d'alcali-réaction en comprimant le béton.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

COSTAZ :

Cela a été demandé au cours d'une réunion. La DTG en était chargée. Je ne sais pas si cela a été fait.

Il serait intéressant d'observer les réactions d'un béton de 20 ans comprimés.

CHAUVEL :

La DTG continue les mesures, en vue de réaliser un calcul de la cinétique d'évolution du phénomène.

EEX10 - Gonflement tridimensionnel dans le béton du caisson de la centrale de Saint-Laurent-les-Eaux

INTRODUCTION / CONTEXTE

Les caissons sont comprimés dans tous les sens.

La pression interne s'applique sur tous les parements internes du caisson, alors que la pression de précontrainte s'applique comme une pression externe, sur tous les parements externes.

En conséquence, le béton comprimé flue. Toutes ses dimensions diminuent.

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

Pendant 5 à 10 ans après sa construction, le caisson de la centrale de Saint-Laurent-les-Eaux a commencé par présenter une réduction de ses dimensions, dans toutes les directions y compris radialement. Ce phénomène est normal.

Mais au-delà de cette période, les appareils de mesure ont tous indiqué une augmentation des dimensions.

Au bout de vingt ans, le fluage était exactement compensé.

L'Autorité de Sûreté pensait que l'augmentation des dimensions du caisson était due à une diminution progressive de la précontrainte. Mais dans ce cas, à cause du coefficient de Poisson du béton, nous aurions assisté à une contraction radiale du caisson.

Le gonflement du béton se produisant dans les trois directions, nous avons pu montrer qu'il s'agissait d'un phénomène propre au matériau.

Par ailleurs, un problème sur les câbles n'aurait pas entraîné une évolution aussi régulière des dimensions. De plus, tous les types d'appareils de mesure indiquaient un effet d'expansion, y compris les dynamomètres situés sur les câbles injectés à la graisse.

Nous sommes ainsi arrivés à convaincre l'Autorité de Sûreté.

Le phénomène n'a jamais été observé sur d'autres bâtiments.

AVIS / COMMENTAIRE

Le fluage du béton a curieusement été compensé entièrement par une déformation du matériau, peut-être liée au phénomène de pseudo alcali-réaction (voir chapitre précédent).

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

Nous n'avons jamais su vraiment expliquer le phénomène. Nous pouvons seulement préciser que le béton a été l'objet d'un phénomène physico-chimique de gonflement tridimensionnel, extrêmement régulier.

Avec l'augmentation de la quantité d'adjuvants utilisés actuellement dans les bétons, le phénomène risque de se reproduire.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR**DOCUMENTS DE REFERENCE**

[1] Fiche MTE n° 084 : « Précontrainte »

[2] The prestressed nuclear containment - Cost saving on the french project

J.C. BERTEL, M. POUSSE, E. FAURE, G. ITHURRALDE
EDF - SEPTEN, Freyssinet international, Groupement pour la Précontrainte Nucléaire, 1986

QUESTIONS/REPONSES (REUNION DE FINALISATION)

TOURET :

Qu'entends-tu par Autorité de Sûreté ?

COSTAZ :

J'étais en relation avec le Service Technique de l'Autorité de Sûreté.

De nombreux comptes-rendus ont été réalisés. Les documents concernant Bugey sont situés à Lyon. Ceux concernant Saint-Laurent-les-Eaux ont été stockés à Tours, mais ils ne peuvent plus être retrouvés, car une erreur au cours d'un déménagement les a fait irrémédiablement détruire.

L'Exploitant doit néanmoins avoir conservé une documentation.

TOURET :

Avez-vous lancé des actions communes ?

COSTAZ :

EDF l'a fait car le Département Etudes de Sûreté du CEA (DES) n'avait pas de budget.

LACROIX :

Le comportement du béton reste toujours un peu mystérieux.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

COSTAZ :

Nous arrivons quand même à peu près à cerner les phénomènes.

TOURET :

Surtout en tridimensionnel.

COSTAZ :

Et surtout pour un béton épais, de l'ordre de cinq mètres.

ANDRICQ :

Le béton est un produit vivant.

COSTAZ :

Sur les deux centrales de Saint-Laurent-les-Eaux, nous avons utilisé des additifs expansifs, sous la forme de poudre d'aluminium qui faisait gonfler le coulis d'injection des câbles de précontrainte.

Peu de temps après, le Laboratoire Central des Ponts-et-Chaussées (LCPC) a considéré qu'il s'agissait d'une hérésie, avec en particulier un risque de destruction du câble par de l'hydrogène naissant.

LACROIX :

Ils ont reconnu par la suite que c'était par erreur qu'ils avaient interdit les adjuvants à la poudre d'aluminium.

COSTAZ :

Le CEA prétendait que la poudre d'aluminium entraînait peut-être la disparition de la précontrainte.

FAURY :

La corrosion des câbles de précontraintes est connue pour les tirants du CNIT à la Défense.

COSTAZ :

Les caissons sont protégés de la pluie. Par contre, nous pourrions envisager une corrosion des câbles de précontraintes des enceintes simples, mais cela n'a jamais été constaté.

POUBLANC :

Tu laisses entendre que les adjuvants pourraient entraîner des réactions pour l'instant inconnues.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

COSTAZ :

Oui, car les produits organiques se décomposent. Il serait intéressant d'étudier le devenir de ces produits.

POUBLANC :

Nous consommons énormément d'adjuvants.

COSTAZ :

Un effet négatif est peu probable.

POUBLANC :

De toute façon, nous employons peu de coulis.

ANDRICQ :

Faut-il préconiser un suivi dans le temps de l'évolution des bétons sujets au phénomène de gonflement tridimensionnel ?

COSTAZ :

Oui.

Etudes SECN sur les caissons

LACROIX :

Les caissons nucléaires en béton ont disparu avec la fin de la filière graphite-gaz.

COSTAZ :

Je n'ai pas beaucoup évoqué la SECN, car il n'y a pas eu de suite.

La SECN regroupait les quatre entreprises principales (SGE, Spie-Citra, GTM, et Campenon-Bernard), pour un programme de recherches cofinancé par EDF et le CEA.

Le SEPTEN et l'équivalent à l'époque de TEGG y participaient.

Nous avons réalisé des études importantes, dont les résultats doivent être centralisés au Service des Archives à Blois. Je sais qu'un bordereau d'envoi précise une liste de documents qui concernent une partie du graphite-gaz, en particulier les études SECN.

1401
11
1100

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

LACROIX :

Ces études comprenaient également le comportement de la précontrainte en température. En effet, dans les parois du caisson, nous atteignons des températures de 80 à 90°C, ce qui est peu courant. Nous avons fait effectuer des essais assez coûteux de relaxation à chaud.

COSTAZ :

Nous avons ainsi constaté que les premiers TBR ne résistaient pas au feu.

LACROIX :

Nous constatons que la température accélérât le phénomène de relaxation, mais ne déplaçait probablement pas l'asymptote.

CHAUVEL :

C'est toujours le cas.

COSTAZ :

J'ai fait partie de la commission FIP qui avait essayé d'étendre l'utilisation des caissons en béton, hors du domaine nucléaire. Pendant de nombreuses années, les pétroliers ont été sollicités, en particulier pour le secteur chimique. Mais ils ont conservé les bidons métalliques qui leur donnaient entièrement satisfaction.

De la même façon, FRAMATOME avait l'habitude des cuves métalliques.

Le concept de cuve en béton aurait pu être utilisé pour les réacteurs bouillants, en particulier en 1300 MW. En effet dans ce cas, nous ne savions plus fabriquer de cuve métallique, car l'acier ne résiste plus. Mais les réacteurs bouillants ont été abandonnés.

ANDRICQ et LACROIX :

Il y en a eu, en Suède.

COSTAZ :

Nous avons effectivement réalisé quelques études avec les suédois.

A l'époque, nous envisagions une pression interne de 140 bars, ce qui constituait une limite pour le béton. Aujourd'hui, nous y arriverions probablement, grâce aux BHP (Bétons Hautes Performances).

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

**ELEMENTS D'EXPERIENCE
RELATIFS AUX ENCEINTES DE CONFINEMENT**

EEX11 - Instrumentation des enceintes de confinement

INTRODUCTION / CONTEXTE

En 1973, dès le lancement du programme nucléaire prévoyant la réalisation de quatre tranches par an, nous avons décidé de ne pas instrumenter toutes les tranches avec les mêmes appareils de mesure.

En effet, les tranches étaient à peu près toutes identiques, à part Fessenheim et Bugey. Ces deux prototypes à eau légère n'étaient pas conçus et réalisés par la même entreprise.

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

Nous avons ainsi équipé d'une centaine d'appareils de mesure chaque tête de série, c'est-à-dire :

- Tricastin 1 pour les 900 MW,
- Paluel 1 pour les 1300 MW P4,
- Catenom 1 pour les 1300 MW P'4,
- Chooz 1 pour les N4.

Instrumentation standard

Nous avons essentiellement installé des témoins sonores (voir chapitre « Mesure de la déformation des structures des caissons ») et des thermocouples.

Les appareils instrumentaient uniquement la partie courante des enceintes. Pour les tranches standard, certaines zones particulières étaient également équipées, spécialement autour des gros orifices.

Instrumentations particulières

Nous désirions aussi étudier les effets particuliers de chaque site sur la structure des enceintes.

Dans ce but, un certain nombre d'appareils de mesures supplémentaires instrumentaient les enceintes.

Des dynamomètres (voir chapitre « Mesure de la déformation des structures des caissons ») étaient installés sur la première tranche réalisée au sein de chaque site.

Des « pendules » étaient également disposés le long des parements. Ces fils à plomb matérialisaient la verticale, et permettaient de mesurer une déformation par rapport à un

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

point donné de l'enceinte. L'effet Coriolis, dû à la rotation de la terre et sensible sur les longs fils à plomb, était rendu négligeable en maintenant les poids dans de l'huile.

Des mesures topographiques étaient également réalisées.

AVIS / COMMENTAIRE

La déformation du béton à contrainte presque constante (si nous excluons la relaxation de l'acier) fournit une valeur du module de déformation du béton. Le résultat obtenu est en général plus faible que celui prévu au départ.

Cela s'avère très sensible au moment des épreuves (voir chapitre suivant).

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR**DOCUMENTS DE REFERENCE**

[1] Confinement - enceintes
J.L. COSTAZ, Technique de l'Ingénieur, B 3290, 04/1997

QUESTIONS/REponses (REUNION DE FINALISATION)

COSTAZ :

L'instrumentation des enceintes était issue directement de celle des caissons. Nous n'avons pas beaucoup innové, et gardé les mêmes appareils de mesures.

Nous avons toutefois étudié d'autres appareils. Par exemple, la fibre optique est assez prometteuse mais, pour l'instant, les nombreuses tentatives n'ont pas été couronnées de succès.

Des fibres optiques sont installées à la station Chatelet du métro de Paris. Diverses personnes ont effectué des essais, mais nous n'avons jamais constaté aucun résultat apparent.

LACROIX :

Les fibres optiques sont-elles placées dans le béton ou dans les câbles ?

CHAUVEL :

Elles sont situées à l'extérieur.

COSTAZ :

Elles sont, soit dans le béton, soit collées sur le béton après réalisation.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

Le principe fonctionne bien en laboratoire, mais reste assez fragile.

POUBLANC :

Il ne convient pas pour des matériaux fissurés.

COSTAZ :

La fibre optique peut être protégée à l'intérieur d'une gaine solide. Dans ce cas, nous n'observons plus aucun phénomène.

Peu de recherches sont effectuées en France sur ces technologies futuristes, sauf pour le domaine des télécommunications.

LACROIX :

L'instrumentation des enceintes va-t-elle s'arrêter au premier janvier de l'année 2000 ?

ANDRICQ :

Un programme est développé par EDF depuis deux ans, à propos du « bug de l'an 2000 ». Nous sommes sensibilisés au problème.

POUBLANC :

Pour les mesures, ce n'est pas trop grave. Par contre, le pilotage des tranches est beaucoup plus important.

COSTAZ :

Nous allons pouvoir profiter du retour d'expérience de la centrale de Dahia-Bay. Les fuseaux horaires lui donnent une avance de six heures.

Cette marge n'est pas importante, mais est intéressante pour nous, s'ils rencontrent des difficultés.

ANDRICQ :

Un test a eu lieu à Civaux, il y a peu de temps.

POUBLANC :

A Chooz également.

CHAUVEL et ANDRICQ :

Le passage à l'an 2000 a été simulé, ainsi que d'autres dates réputées ennuyeuses car utilisées par les programmeurs dans d'autres buts, par exemple le 9 septembre 1999 (9/9/99).

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

PICAUT :

Il me semble utile de citer les quelques câbles non injectés qui servent de contrôle.

COSTAZ :

Quatre câbles verticaux et théoriquement rectilignes sont installés sur les enceintes, pour la première tranche de chaque site.

Au début, nous avons installé un seul vérin par câble. Puis sur les 900 MW, nous avons réalisé des ensembles constitués de trois vérins TESTUT, sous la forme d'un trépied en tête de câble. Il s'agissait de cylindres en acier très dur, équipés de jauges, et placés entre le culot de précontrainte et l'ouvrage. La déformation de l'acier, à module constant et sans fluage, fournissait la valeur de la contrainte.

A l'époque du graphite-gaz, cette technique fonctionnait bien. La personne qui s'en occupait était passionnée par son travail. Après son départ, cela s'est dégradé. Les dynamomètres installés sur les premières enceintes ont pris l'humidité, et les mesures électriques ne fonctionnaient plus.

Il s'agissait au départ de 19T15, pas trop gros et faciles à changer en cas de besoin.

Nous sommes ensuite passés aux 37T15. Le trépied était énorme et très cher. Nous sommes alors revenus au dynamomètre unique.

Il s'agit d'une technologie à série très limitée, donc chère et de qualité inégale.

COSTAZ :

Il est essentiel que l'appareil de mesure fonctionne, car l'Autorité de Sécurité s'intéresse de près à toute mesure hors norme.

Il ne faut pas se décourager, même si les mesures ne sont pas parfaites, et surtout si nous sommes en permanence contrôlés.

PICAUT :

Il est dit dans la fiche que « la déformation fournit la valeur du module de déformation du béton ». Je trouve que cela donne une notion trop restrictive de l'auscultation. Par ailleurs, peut-on parler de « la » valeur du module.

COSTAZ :

Oui, à un moment donné, sur un ouvrage donné.

C'est à peu près la seule valeur claire qui est obtenue.

TOURET :

Cette valeur nous donne une sorte d'indicateur.

COSTAZ :

L'auscultation reste intéressante, car elle permet la détection des comportements anormaux.

Génie Civil et enceintes de confinement -- Recueil d'expérience de M. COSTAZ

TOURET :

Sur ce point, une campagne d'information doit être engagée. En effet, les membres du Groupe Permanent s'étonnent, car le module du béton mesuré est différent de celui que nous utilisons dans les calculs. Mais ce dernier est un module de recalage qui n'est pas le module du béton.

A Flamanville, les échantillons prélevés ont fourni un module du béton excellent, qui continue à augmenter avec le temps. Or les mesures montrent que le module apparent diminue.

COSTAZ :

Le module apparent mesure le fluage. Ce n'est pas le cas d'une mesure sur une éprouvette.

PICAUT :

Cela permet de mesurer la déformation à plus long terme du béton.

COSTAZ :

La valeur du module nous fournit la déformation, car nous connaissons à peu près la contrainte.

TOURET :

As-tu des regrets concernant l'instrumentation des enceintes ? Par exemple, d'autres instruments auraient-ils été utiles ?

COSTAZ :

Les enceintes sont peu instrumentées.

Les témoins sonores ne sont nombreux que sur la première tranche d'une série, comme par exemple à Tricastin et à Chooz qui en comprennent une centaine. Par ailleurs, nous en installons une vingtaine dans les points courants.

Cela nous permet d'obtenir le module du béton.

FAURY :

Il s'agit bien du module du béton armé ?

COSTAZ :

Oui, il s'agit du module du béton fortement précontraint, en principe très peu fissuré.

Théoriquement, si nous parvenions à maintenir les mêmes conditions hygrométriques, nous devrions obtenir le même résultat, en réalisant une mesure sur une éprouvette au bout du même temps.

L'instrumentation donne une assez bonne idée de la qualité du béton:

par exemple certains bétons sont relativement mous, par exemple à Belleville et à Civaux 1.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

Le béton de Catenom est beaucoup plus dur, et flue très peu.

COSTAZ :

La durée de vie des enceintes est liée à la comparaison du comportement de l'ouvrage avec les résultats du calcul. Ce dernier prévoit la déformation différée :

- 1 - grâce au module instantané du béton,
- 2 - grâce au fluage, qui diffère selon les règlements (IP65, BPEL, Eurocode 2),
- 3 - et également en fonction d'un bon nombre de paramètres.

Cette déformation différée influe sur la valeur de la précontrainte car, le béton se contractant, la précontrainte diminue. Mais la relaxation étant très faible, la précontrainte évolue peu dans le temps. Tout repose donc essentiellement sur le fluage.

Nous avons observé sur certaines tranches, en particulier à Flamanville, des fluages de béton nettement plus élevés que ceux qui étaient prévus. Au bout d'une trentaine d'années, la précontrainte réelle finit par atteindre la précontrainte théorique de calcul. Théoriquement, nous ne sommes alors plus conformes à la note de calcul.

Nous pouvons refaire la note de calcul, en reconsidérant les marges qui avaient été choisies. Cette méthode n'est pas très technique, et l'Autorité de Sûreté s'oppose toujours à ce que nous touchions aux marges.

LACROIX :

Il ne s'agit pas d'une marge, mais d'une précision.

COSTAZ :

En tout cas, certaines tranches dépassent les règlements.

Nous rencontrons moins de difficultés sur les 900 MW, car nous utilisons les règlements IP65 qui spécifient la limite à trois fois la déformation instantanée. Ce seuil n'est jamais dépassé, sauf à Dampierre.

Les 1300 MW se comportent moins bien. En effet, la formule du BPEL place la limite à environ 2,5 fois la déformation instantanée. Nous disposons donc de moins de marge. De plus, les deux faces de l'enceinte étant placées à l'air libre, le béton présente plus de retrait, donc un fluage plus important.

Il faut reconnaître que certains bétons classiques, contenant peu d'adjuvants, ne sont pas parfaitement compacts.

TOURET :

Le béton de Belleville est peu compact. Cela est-il dû à sa mise en œuvre, à sa composition, ... ?

COSTAZ :

Le problème vient de la composition du béton.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

POUBLANC :

Oui. La raison invoquée est un fuseau granulaire des sables non conforme à celui qui était imposé.

COSTAZ :

Il s'agissait de sables de Loire.

Quelques heures après le coulage du béton, au moment du début de la prise, s'est produit un tassement dû au béton peu compact ou à la présence d'air. Pourtant le béton avait été correctement vibré. Les étriers proches de la surface ont cassé le béton, créant des fissures de quelques millimètres.

FAURY :

J'ai rencontré ce phénomène au Nigéria. Nous avons coulé des radiers pour des cuves destinées à contenir du gaz liquide, avec des retardateurs de prise et des ciments au laitier. Ces derniers donnent habituellement un ressuage important, qui a été accentué par l'utilisation des retardateurs de prise.

Le béton tassait, et de l'eau apparaissait au-dessus.

Le client était inquiet et a demandé la réalisation de carottages. Nous nous sommes alors aperçus que les aciers crénelés n'étaient enrobés qu'à moitié. Autour des aciers de 40 mm et de leur crénelage de 4 mm s'étaient créés de véritables drains. Ce phénomène reste généralement invisible.

COSTAZ :

Ce phénomène constitue peut-être une des raisons du mauvais taux de fuites de Belleville. Nous avons constaté que les aciers transversaux étaient mal enrobés. Je n'arrive pas à comprendre qu'il ait fallu attendre la fin de Belleville 1 pour trouver une solution palliative.

Au début, nous pensions à un phénomène de retrait dû à une dessiccation trop importante. Nous avons alors réalisé des reprises qui n'ont jamais apporté d'amélioration.

POUBLANC :

Le béton a également été revibré.

FAURY :

Il est possible de revibrer un radier, mais la revibration d'un voile de béton de 2m40 de hauteur, est délicate.

COSTAZ :

Le béton de Belleville 2 est un peu meilleur.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ**FAURY :**

Je voudrais également citer une pratique courante de mise en œuvre du béton, qui peut expliquer certaines fuites.

En coulant une enceinte, nous réalisons très souvent un mortier de reprise. Préalablement au béton, sont coulés quelques dizaines de centimètres de mortier qui permettent d'huiler la conduite de la pompe. De plus, le conducteur de travaux pense souvent que le béton va ainsi mieux accrocher. Ensuite seulement, nous bétonnons avec le béton normal.

EEX12 - Epreuves sur les enceintes de confinement

INTRODUCTION / CONTEXTE

Les enceintes de confinement sont conçues pour supporter une pression interne, même si en pratique ce n'est pas le cas, car cette pression ne surviendrait qu'en cas d'accident sévère.

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

Afin d'être certains que les enceintes soient en mesure de supporter la pression correspondant à l'accident de référence (APRP ou Accident par Perte du Réfrigérant Primaire : voir document [1]), nous réalisons tous les dix ans une épreuve qui consiste à ausculter les réactions de la structure de l'enceinte sous l'influence d'une pression d'air.

Cette technique constitue une spécificité française, due à un compromis entre EDF et l'Autorité de Sûreté. En effet, cette dernière préconisait la réalisation d'épreuves tous les trois ans à pression réduite, c'est-à-dire à la moitié de la pression de calcul. C'était la méthode américaine d'auscultation des enceintes en fonctionnement.

Raisons de la spécificité EDF

La réalisation des épreuves à la pression d'accident nous semble un point important. En effet, les problèmes que nous étudions risquent de survenir aux alentours de cette pression, et en aucun cas à la pression moitié.

Par ailleurs, nous trouvons ces épreuves trop fréquentes.

L'arrêt d'une tranche est gênant pour l'exploitant, car le temps nécessaire à la réalisation de l'épreuve est de l'ordre de la semaine, et varie d'ailleurs peu avec la valeur de la pression finale recherchée.

Nous avons finalement prévu de réaliser les épreuves sur les enceintes de confinement, en même temps que les visites complètes du circuit primaire, qui sont réalisées tous les 10 ans.

Cette conjonction des deux épreuves est intéressante pour l'exploitant.

Cas particuliers

En cas de difficulté particulière sur une enceinte, l'Autorité de Sûreté nous demande des épreuves plus fréquentes.

Par exemple pour la centrale de Flamanville, une épreuve supplémentaire a été réalisée au bout de 5 ans.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ**AVIS / COMMENTAIRE**

Si le béton présentait un comportement purement élastique, nous pourrions prédire le comportement à la pression de calcul, d'après celui observé à la pression moitié.

En cas de désordre grave, le comportement du béton ne sera plus linéaire autour de la pression de calcul.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR**DOCUMENTS DE REFERENCE**

[1] Fiche MTE n° 003 : « Pression d'enceinte après accident »

QUESTIONS/REPOSES (REUNION DE FINALISATION)

LACROIX :

La pression d'épreuve est un paramètre essentiel.

COSTAZ :

A l'étranger, surtout aux Etats-Unis, une épreuve de réception est réalisée à la pression de calcul, puis

les épreuves suivantes sont réalisées à la pression moitié. Elles fournissent donc des informations sur l'étanchéité, mais pas sur la résistance.

En France, l'Exploitant mettait en avant la surveillance approfondie des circuits primaires réalisée tous les dix ans, et préconisait la même chose pour les enceintes.

L'Autorité de Sûreté a fini par accepter le compromis, à condition de faire les épreuves à la pression de calcul.

POUBLANC :

A la pression moitié, nous ne pouvons pas observer grand chose.

COSTAZ :

Avec les marges prises concernant la pression, je pense que même un accident de rupture franche sur un gros tuyau ne permettrait pas de dépasser la pression moitié.

Il est toutefois important d'observer les phénomènes produits à la pression théorique de calcul, ainsi que de savoir si cette dernière peut être supportée.

En cas de doute, l'Autorité de Sûreté demande une épreuve supplémentaire. Etant donné le coût d'une épreuve pour l'Exploitant, nous essayons fermement de nous y opposer.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

POUBLANC :

Le contexte médiatique a fortement évolué depuis cinq ans environ.

TOURET :

J'ai regardé dans le RCC-G les critères utilisés en épreuve. L'enceinte est calculée aux états limites de service, en considérant la fissuration comme préjudiciable. Or, les règlements qui s'appliquent aux réservoirs et aux silos définissent trois catégories d'ouvrages. Il semblerait que les enceintes de confinement soient situées dans la deuxième catégorie, et non pas dans la troisième pour laquelle aucune fissuration n'est admise.

COSTAZ :

L'enceinte est calculée en classe 3 du BPEL car, au point singulier, nous ne pouvons faire autrement.

Nous pourrions effectivement considérer qu'en partie courante, l'enceinte est en classe 2 ou en classe 1, alors qu'en partie singulière elle appartient à la classe 3. Mais cela ne fait pas très sérieux.

Nous avons donc choisi la classe 3 pour toute l'enceinte.

TOURET :

Nous ne prenons donc pas en compte la fissuration très préjudiciable. Nous restons en fissuration préjudiciable.

Nous nous apercevons que le dimensionnement réalisé est à peu près cohérent avec les textes. La classe 2 tolère des fissures comprises entre 0,1 et 0,2 mm, qui correspondent à ce que nous observons en réalisant les épreuves sur les enceintes.

COSTAZ :

La fissuration n'est pas présente sur toute l'épaisseur. Il existe toujours une portion du béton qui se trouve comprimée.

Toutefois, ce n'est peut-être pas tout à fait vrai autour des sas. Le fluage et les déviations des câbles induisent un champ de contraintes très complexe, peut-être un peu différent de celui prévu. Il peut alors se produire localement une traction plus importante, ou même une traction sur toute l'épaisseur du béton.

Si nous voulions être certain que l'enceinte soit partout comprimée, il faudrait une fois et demi à deux fois plus de précontrainte. Mais compte tenu des limitations de fissurations et de l'épaisseur du béton, cela suffit pour assurer l'étanchéité à l'air.

TOURET :

En zone courante, nous disposons d'une marge importante, mais d'aucune marges dans les zones singulières.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

PICAUT :

La marge est inexistante vis-à-vis de la fissuration, mais pas vis-à-vis de la rupture.

COSTAZ :

L'étanchéité à l'air est un problème très délicat sur un ouvrage de cette taille.

EEX13 - Mesures de fuites sur les enceintes de confinement

INTRODUCTION / CONTEXTE

Les centrales de Fessenheim et de Bugey ont été achetées clé en main à un constructeur qui réalisait également l'épreuve initiale.

Véritas, pour Fessenheim, et le CEBTP, pour Bugey, ont donc mis au point les premiers une méthode de mesures de fuites, c'est-à-dire de la variation de la pression interne de l'enceinte de confinement en fonction du temps.

EDF a ensuite bénéficié de cette expérience.

La DER a mis au point une méthode constituant une synthèse améliorée des méthodes précédentes.

La DTG réalise et exploite les mesures.

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

Pour une mesure de fuites, l'enceinte de confinement est mise en air, sec si possible, à une pression voisine de celle de l'accident de référence. Cette pression n'est pas tout à fait la même pour les 900 MW et les 1300 MW. Elle correspond à environ 4 bars relatifs (au dessus de la pression atmosphérique), c'est-à-dire à une pression absolue de 5 bars.

Nous mesurons ensuite la variation de la pression en fonction du temps, pendant théoriquement 24 heures. Nous savons maintenant qu'une valeur asymptotique est atteinte au bout de sept heures. Nous arrêtons alors l'épreuve, sauf si la courbe représentant la masse perdue cumulée en fonction du temps n'est pas stabilisée.

Difficultés de la mesure

Au début de l'essai, les paramètres (température, pression, hygrométrie) ne sont pas stabilisés. La courbe obtenue est fluctuante, et peut même indiquer momentanément une masse perdue négative.

De plus, la fuite entraîne une légère diminution de pression. En conséquence pour un même volume perdu, la masse théorique baisse un peu. Cet effet est peu sensible, car la fuite est très faible.

Influence de la température

La pression interne varie avec les fuites de l'enceinte, mais aussi en fonction de la température.

Certaines variations thermiques sont dues au fluide lui-même. L'air, comprimé à l'aide d'un compresseur, chauffe pour se détendre ensuite à l'intérieur de l'enceinte.

Par ailleurs, l'enceinte n'a pas exactement la même température que l'air injecté.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

Le manque d'homogénéité des températures est donc une source importante de difficultés.

Nous avons longtemps hésité à utiliser un système de brassage d'air par ventilation, mais ses inconvénients ont entraîné son abandon. En effet, la ventilation d'un gros volume (40 m de diamètre, pour 60 m de haut) n'est pas aisée, d'autant que l'intérieur de l'enceinte est encombré. De plus si l'air est trop brassé, sa température va s'élever.

De nombreux thermocouples sont donc répartis dans les différents étages de l'enceinte, afin de permettre le calcul d'une température moyenne.

Autres paramètres

La variation de pression est également mesurée de façon très précise. Deux capteurs suffisent car, contrairement à la température, la pression est homogène à l'intérieur de l'enceinte.

L'hygrométrie intervient aussi car nous mesurons un débit massique, alors que la densité de la vapeur d'eau est différente de celle de l'air.

Le taux d'hygrométrie est d'ailleurs très variable. Par exemple afin d'éviter un taux de fuites trop élevé, le fond de certaines enceintes est rempli d'eau.

Comme pour la température, plusieurs capteurs sont installés.

Résultats

Nous obtenons la variation de la masse d'air en fonction du temps, c'est-à-dire la fuite.

Au bout de deux heures, l'homogénéisation des divers paramètres permet d'obtenir le début d'une droite. Au bout de quatre heures, la droite est nette, mais nous attendons au moins sept heures pour être certains du résultat.

Enceintes simples étanches des 900 MW

Le taux de fuites ne doit pas dépasser 0,3% de la masse interne du mélange air-vapeur par 24 heures, en cas d'accident. Ce taux correspond à 0,15% en air à l'épreuve.

La valeur, de l'ordre de 10 m³ à l'heure, est obtenue avec une précision de 2 ou 3 m³ à l'heure.

Enceintes doubles à fuites contrôlées des 1300 MW

Le taux de fuites ne doit pas dépasser 1,5% de la masse interne du mélange air-vapeur par 24 heures, en cas d'accident. Rapporté à l'épreuve, ce taux correspond à 1%.

Les fuites étant plus importantes sur ce type d'enceintes, la précision relative est encore meilleure.

Elle est utilisée dans le monde entier. Elle est acceptée par l'Autorité de Sûreté.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

AVIS / COMMENTAIRE

La méthode fonctionne bien, et la procédure de mesures de fuites est bien rodée.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR

Il serait intéressant de raccourcir le temps d'épreuve, mais je ne pense pas que nous puissions aller beaucoup plus loin que ce qui a déjà été obtenu.

DOCUMENTS DE REFERENCE

- [1] Fiche MTE n° 041 : « Conception des enceintes doubles »
- [2] Fiche MTE n° 086 : « Conception des enceintes (enceintes simples) »

QUESTIONS/REPOSES (REUNION DE FINALISATION)

COSTAZ :

Le nombre d'épreuves étant important, un service en a été chargé au sein de la DTG. Cela a posé un problème déontologique, car l'Autorité de Sécurité admettait mal qu'un organisme puisse être à la fois juge et partie. Elle a ensuite accepté de faire confiance à la DTG qui, depuis, réalise les mesures de fin de construction, puis d'exploitation.

Les précisions obtenues sont excellentes, de l'ordre d'un ou deux mètres cubes par heure, sur un volume d'environ 60 000 mètres cubes.

La méthode est informatisée. La masse d'air sec s'inscrit sur une table traçante, et la pente de la droite donne le taux de fuites.

La mesure ne dure que sept heures, mais en tenant compte du gonflage, l'épreuve dure un semaine environ. Nous pouvons évaluer l'arrêt nécessaire de la tranche à 3 MF par jour. L'épreuve est donc assez coûteuse.

TOURET :

Qui a fixé les taux limites de fuites ?

COSTAZ :

Pour les enceintes des 900 MW, nous avons copié la valeur retenue par les américains.

Aucune des tranches 900 MW n'a atteint la valeur de 0,15% en air lors d'une épreuve. Les plus mauvais résultats sont de l'ordre de 0,07%, c'est-à-dire seulement la moitié. Certaines tranches fuyaient même beaucoup moins.

Pour les enceintes des 1300 MW, nous avons procédé de toute autre manière. Nous avons supposé que tout ce qui sortait de l'enceinte constituait directement des fuites radiologiques.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

A partir de maquettes réalisées à Saint-Rémy et d'études bibliographiques, nous avons trouvé que 1% en air pendant 24 heures devait être réalisable, avec un peu de soin, mais sans trop de difficultés. Nous avons ensuite pris une marge, d'où la valeur de 1,5% en mélange air-vapeur.

Il est évident que pour des fuites à travers un trou dans la peau ou à travers une épaisseur de béton, le coefficient utilisé n'est pas le même.

Pour les 900 MW, le coefficient doit réduire l'épreuve en air.

Dans le cas du 1300 MW, c'est plutôt l'inverse, car il y a moins de fuites en vapeur qu'en air.

Les taux de fuites ont été précisés pour Palluel 1, en accord avec l'Autorité de Sûreté de l'époque qui admettait la discussion, et avec l'optique d'observer comment cela se passerait. Nous voulions également fournir une contrainte à l'entreprise réalisatrice.

C'est ensuite devenu un dogme.

Avec le recul, il aurait été préférable de prendre une valeur limite de 2%. En effet, le taux de fuites de 1% a été dépassé à Belleville.

TOURET :

Tu dis que « une fois la peau traversée, c'est comme si nous étions à l'air libre ».

En fait, les fuites observées se produisent par les traversées.

COSTAZ :

Oui. Il y a 250 traversées sur une enceinte 900 MW, et 350 pour les enceintes 1300 MW.

PICAUT :

De quels moyens dispose l'entreprise pour prendre ses responsabilités vis-à-vis des fuites ?

FAURY :

Aucun.

COSTAZ :

C'était peut-être un peu léonin de confier une responsabilité à l'entreprise, concernant l'étanchéité à l'air.

PICAUX :

Il n'existe pas de norme.

FAURY :

Non.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

COSTAZ : Nous faisons au mieux.

FAURY :

Nous pensions que des fuites se produiraient aux reprises. Nous soufflions dans un tortillard métallique, afin de matérialiser les éventuelles fuites.

La méthode a été employée à Catenom, qui fuyait peu.

LACROIX :

Il s'agit du fuko.

COSTAZ :

EDF, par l'intermédiaire du CEBTP, avait pris un brevet pour cette méthode. Il n'a jamais été défendu par la suite, et a été énormément copié.

COSTAZ :

Généralement, les enceintes sont plutôt bonnes au début, puis se dégradent avec le temps.

LACROIX :

Y a-t'il eu des cas de bonification ?

CHAUVEL :

Oui. Nous sommes alors parfois dubitatifs sur la précision de la mesure.

TOURET :

D'une manière générale, les dégradations ont lieu autour du sas.

POUBLANC :

La dégradation se produit aux singularités de construction, comme les reprises et les fissurations de retrait présentes généralement sur les grands plots.

LACROIX :

A Catenom, des dégradations se produisaient autour des traversées.

COSTAZ :

Nous avons ajouté de la résine. En laboratoire, cela fonctionne bien.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

FAURY :

Cela n'a pas été fait à Catenom, mais à Belleville.

COSTAZ :

A Belleville, cela n'a pas été efficace.

POUBLANC et CHAUVEL :

Des campagnes d'injections systématiques sont actuellement en cours dans tous les canaux non bouchés.

COSTAZ :

En l'absence d'injection, le fuko présente l'inconvénient de créer un drain. Par contre, il donne une possibilité de contrôle.

Nous l'avons abandonné.

EEX14 - Fuites non transitantes sur les doubles enceintes des 1300 MW

INTRODUCTION / CONTEXTE

Pour les enceintes simples des 900 MW, les fuites transitent essentiellement par les vannes, mais nous admettons qu'une partie des fuites peut se retrouver à l'extérieur en passant à travers une mauvaise soudure de la peau.

Sur les 1300 MW à double enceinte sans revêtement métallique, du fait de la légère dépression (15 à 30 mbars) par rapport à l'atmosphère externe, la plupart des fuites sont collectées dans l'espace entre les deux enceintes.

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

La double enceinte des 1300 MW constitue un bâtiment à fuites contrôlées, et non pas une enceinte étanche. Il est donc important de connaître la partie qui court-circuite l'espace entre enceintes, c'est-à-dire les fuites directes, dites non transitantes. Celles-ci se produisent :

- à travers les sas,
- à l'intérieur des tuyauteries, même si celles-ci sont en général remplies d'eau et fermées par des vannes.

Fuites par le radier

Le radier constitue une autre possibilité de fuites.

Nous avons envisagé un système de drainage qui aurait permis de reconstituer au niveau du radier un concept d'enceinte double. Mais à cause du risque de fusion du cœur, le système de drainage est maintenant obturé.

En cas d'accident sur une centrale à eau légère, une certaine quantité de vapeur se condense sous la forme d'un à deux mètres d'eau sur le fond de l'enceinte.

L'étanchéité à l'eau étant beaucoup moins délicate que celle au gaz, nous avons finalement admis un radier répondant au concept d'enceinte simple.

Mesure des fuites non transitantes

Une fuite sur l'enceinte interne en pression est maintenant facilement repérée. Mais, il est plus délicat de localiser les fuites non transitantes.

La méthode des Etudes et Recherches consiste à mesurer ce qui entre dans l'espace entre enceintes, à un moment où la pression entre les deux enceintes se trouve à l'équilibre avec la pression atmosphérique.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

Théoriquement, ce qui entre est alors égal à ce qui sort de l'enceinte externe. Nous bénéficions ainsi de deux mesures :

- les sorties, comme pour les enceintes 900 MW, sont obtenues par la mesure de la variation de pression interne,
- les entrées, sont obtenues en faisant monter la pression moyenne pour l'amener à la valeur de la pression atmosphérique.

Les volumes mesurés sont faibles, ce qui n'autorise pas une très bonne précision.

De plus, le calcul réalisant la différence entre deux volumes, l'incertitude est doublée.

AVIS / COMMENTAIRE

Limiter de façon dogmatique à 1% le taux de fuites sur l'enceinte interne des 1300 MW n'a pas vraiment d'intérêt.

Par exemple à Belleville, de taux de fuites était de 2%. En conséquence, nous avons extrait deux fois plus, et il n'y a pas eu de difficulté.

Par ailleurs, un taux de fuites de 1% pour un bâtiment contrôlé n'a pas la même valeur que 0,3% pour une enceinte unique.

Les fuites non transitantes sont les mêmes pour les enceintes des 900 MW et des 1300 MW. Ce sont les seules fuites à conséquence radiologique.

Nous avons essayé de limiter ces fuites, pensant ainsi pouvoir modifier la limite des 1% de fuites requis pour l'enceinte interne. Nous n'y sommes pas parvenus.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR

Il faut chercher à améliorer le taux de fuites, mais cela n'est pas facile.

DOCUMENTS DE REFERENCE

[1] Fiche MTE n° 015 : « Traversées enceintes 1300 »

[2] Fiche MTE n° 052 : « Traversées enceintes (enceintes simples) »

QUESTIONS/REPNSES (REUNION DE FINALISATION)

TOURET :

La somme des deux incertitudes est à peu près égale à ce que nous mesurons.

Nous allons un jour nous retrouver avec une tranche arrêtée à cause d'un dépassement de critère dû uniquement à l'imprécision.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

COSTAZ :

De plus en plus, et surtout dans le domaine nucléaire, les ingénieurs font des approximations très pessimistes. En conséquence, les marges obtenues s'accumulent et deviennent très importantes.

Pour des raisons de sécurité, nous continuerons probablement toujours dans cette direction.

Or, il est à peu près démontré que les incertitudes répondent à une loi de Gauss centrée. Nous pouvons donc utiliser la moyenne, et non pas la moyenne additionnée des incertitudes. Ce raisonnement probabiliste est physiquement vrai, mais l'Autorité de Sûreté ne veut pas en entendre parler. Ils restent déterministes, et ajoutent l'incertitude à la mesure.

De plus, la plupart des fuites non transientes se produisent vers des bâtiments voisins qui présentent une ventilation dont nous ne tenons pas compte. Au début, nous ne tenions même pas compte de la condensation de la vapeur à la température ordinaire et à la pression atmosphérique.

Des marges colossales existent partout.

ANDRICQ :

Peux-tu préciser ton point de vue ?

COSTAZ :

Il faut reprendre toute la chaîne, en repartant des valeurs moyennes et non pas des valeurs pessimistes. Ceci s'applique également à la pression de calcul qui présente des marges colossales.

Nous avons essayé de faire des calculs avec les valeurs moyennes, en introduisant le cumul des imprécisions à la fin seulement.

TOURET :

Le meilleur exemple est EPR, qui a été dimensionné à six bars et demi.

Les calculs d'optimisation, qui servent à évaluer les marges, montrent que cinq bars seraient suffisants. Mais personne ne veut remettre en cause la valeur donnée au départ. Or cette valeur est très contraignante, et risque par exemple d'entraîner la réalisation d'un mauvais béton.

Les nouveaux calculs que nous avons réalisés ne doivent pas être montrés, sous peine de nous voir reprocher de n'être pas certains de notre enceinte.

EEX15 - Mesures de fuites en continu sur les enceintes de confinement

INTRODUCTION / CONTEXTE

Le système SEXTEN permet de contrôler l'étanchéité d'une enceinte, presque en continu.

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

Pour cela, nous essayons de mesurer la fuite de l'enceinte interne à de très faibles pressions.

Un circuit d'air comprimé alimente les vannes et les autres systèmes pneumatiques contenus dans l'enceinte. Les légères fuites du circuit augmentent la pression dans l'enceinte, de l'ordre de 50 millibars en un mois.

Nous dégonflons donc régulièrement l'enceinte, généralement d'une valeur de 60 millibars, de façon à faire repasser la pression au-dessous de la pression atmosphérique.

Des cycles de gonflage et de dégonflage s'enchaînent donc régulièrement.

Nous bénéficions de la légère surpression dans l'enceinte, pour mesurer les fuites à l'aide de la méthode décrite au chapitre « Mesures de fuites sur les enceintes de confinement ».

La méthode est assez complexe. En effet, nous devons tenir compte des entrées et sorties de personnel par le sas, même si celles-ci sont de plus en plus rares.

En étant attentif et précis, il est possible de calculer la fuite.

La précision est très moyenne, mais le fonctionnement présente l'avantage d'être automatique.

AVIS / COMMENTAIRE

La méthode est intéressante pour savoir si une vanne est restée ouverte, ou pour repérer un incident créant une fuite non négligeable.

L'Autorité de Sûreté et l'exploitant y tiennent beaucoup.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR

DOCUMENTS DE REFERENCE

EDF SEPTEN	Note E-N-SI-GD/01-00063	Indice A	Page 85/133
---------------	----------------------------	-------------	----------------

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

QUESTIONS/REPONSES (REUNION DE FINALISATION)

COSTAZ :

La méthode a été inventée en France. Les américains s'y sont ensuite intéressés, et nous ont consultés.

EEX16 - Mesures de fuites sur les organes d'isolement**INTRODUCTION / CONTEXTE**

Tous les ans, aux arrêts de tranches annuels, nous mesurons les fuites au niveau des organes d'isolement, c'est-à-dire pour les deux vannes situées sur les tuyauteries qui traversent l'enceinte.

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

La mesure de fuites est réalisée en fermant les deux vannes, puis en gonflant l'espace entre vannes.

La méthode est simple mais, lors du test, une des deux vannes n'est pas sollicitée dans son sens normal de fonctionnement. En effet, la vanne intérieure à l'enceinte est prévue pour s'opposer à la pression venant de cette enceinte.

Cas particulier des sas

Les sas ne posent pas de difficulté particulière, car il s'agit de systèmes à double porte.

Le risque de fuite est faible sur les deux portes en même temps.

L'essai sur les sas est réalisé de la même façon que pour les vannes.

Cas des tampons matériels

Les tampons matériels présentent de vrais risques pour l'étanchéité au gaz. En effet, ils constituent une enceinte simple, l'étanchéité étant réalisée sur une bride avec des joints.

Depuis N4, les tampons matériels n'aboutissent plus directement dans l'atmosphère, mais dans un local ventilé.

Pour l'Autorité de Sécurité, une double ventilation du local serait nécessaire.

Mais pour EDF, le risque pratique est négligeable, car il ne se produirait que par cumul au même moment de l'accident de référence (APRP) et d'une panne de ventilation du bâtiment voisin. Or, ces deux incidents sont totalement indépendants.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ**AVIS / COMMENTAIRE**

Pendant la mesure de fuites sur les organes d'isolement, le fonctionnement d'une des deux vannes à l'inverse de son fonctionnement normal rend la méthode imparfaite. Mais nous ne savons pas faire autrement.

Toutes les mesures sur les enceintes restent très théoriques, car nous testons l'enceinte dans une configuration qu'elle n'a pas en réalité. Mais les méthodes de tests proviennent des Etats-Unis et n'ont jamais été contestées.

Nous nous posons beaucoup de problèmes superfétatoires, car le juste milieu est délicat à trouver entre une trop grande exigence et un manque certain d'exigence.

Nous assistons donc toujours à un accroissement des contraintes de sûreté, même si l'expérience montre que l'inverse est envisageable. En conséquence, le nucléaire coûte de plus en plus cher. De cette façon, un jour, il disparaîtra.

Le rôle de l'autorité de Sûreté ne consiste pourtant pas à ajouter constamment des contraintes. D'ailleurs hors des réunions officielles, ils sont souvent d'accord avec notre point de vue.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR

Concernant le risque d'étanchéité des tampons matériels sur N4, la coïncidence des 2 incidents est très peu probable mais pas totalement irréaliste. Plutôt que de doubler la ventilation du local d'arrivée, le problème doit être pris à l'envers. Que se passerait-il si la ventilation ne fonctionnait pas ?

Il faut alors tenir compte de l'effet réaliste de confinement apporté par le bâtiment voisin de l'enceinte, même si ce dernier ne constitue pas une véritable enceinte de confinement.

Après 50 ans d'expérience concernant le nucléaire, nous devrions pouvoir tenir compte des acquis issus des études et de l'exploitation.

Toutefois, l'Autorité de Sûreté hésite à prendre certaines décisions, peut-être à cause de la crainte d'éventuelles réactions de l'opinion publique.

DOCUMENTS DE REFERENCE

[1] Fiche MTE n° 015 : « Traversées enceintes 1300 »

[2] Fiche MTE n° 052 : « Traversées enceintes (enceintes simples) »

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

QUESTIONS/REPOSES (REUNION DE FINALISATION)

COSTAZ :

Les déformations subies par les enceintes tordent la fermeture métallique des tampons matériels. L'étanchéité entre la bride fixe située sur le béton et la bride mobile du couvercle n'est alors plus plane, mais forme un paralléloïde hyperbolique en forme de selle de cheval.

Le joint est très souple mais, au bout d'un moment, il n'assure plus sa fonction. La bride est alors meulée à la main jusqu'à ce que nous retrouvions l'étanchéité.

Le tampon est trop gros. Afin d'éviter la torsion, il faudrait revenir à un orifice plus petit, ou situé au centre du dôme comme en Inde.

TOURET :

Je constate une inhomogénéité entre les 900 MW et les 1300 MW. Sur les 900 MW, nous admettons que les fuites non transitantes passent par les traversées, alors que c'est plus flou pour les 1300 MW. Pourquoi ne disons nous pas la même chose pour les enceintes des 1300 MW ?

COSTAZ :

Il y a le radier en plus.

TOURET :

Il est systématiquement noyé. Nous nous sommes donnés des contraintes excessives.

COSTAZ :

Pour les enceintes des 900 MW, nous disposons du parapluie américain. Par contre, les enceintes des 1300 MW sont plus complexes.

Les tampons matériels des enceintes 900 MW font seulement 6 m 50 de diamètre. Cela pose moins de problème qu'avec les 8 m de diamètre des tampons des 1300 MW.

Le tampon est prévu pour permettre le passage de la cuve.

ANDRICQ :

Le GV de remplacement doit également pouvoir passer.

POUBLANC :

Les GV ne sont pas si gros.

TOURET :

Le MSDG doit également transiter par le tampon.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

COSTAZ :

La cuve est l'objet le plus encombrant, mais nous ne la ressortons plus.

TOURET :

Pour EPR, le tampon est encore plus large.

Par ailleurs, le système indien, avec des trous dans le dôme, ne doit pas être idéal.

COSTAZ :

Il présente quatre orifices dans l'enceinte interne, et quatre orifices dans l'enceinte externe, de façon à pouvoir faire passer verticalement quatre GV à l'aide d'une grue.

LACROIX :

Il y a plus de trous dans la peau.

COSTAZ :

Si nous n'avions pas été aidés par la technique américaine, les enceintes des 900 MW auraient connu

autant de difficultés que celles des 1300 MW.

D'ailleurs, les résultats à l'étanchéité obtenus sur les 900 MW sont bons, car nous faisons tout ce qu'il faut pour que l'épreuve soit réussie. En particulier, nous revoyons certaines vannes au papier de verre avant l'épreuve.

Une seule fois, nous avons fait un essai de vannes en fin de cycle à Fessenheim, sans les retoucher préalablement. Les résultats ont été catastrophiques et n'ont pas été publiés. C'était pire qu'avec les 1300 MW. Nous obtenions un taux de fuites de 3 %.

Par contre, le nucléaire prévoit ici aussi des cas extrêmement pessimistes. En effet, même si les tuyaux sont en général remplis d'eau, nous supposons qu'ils sont vidés. Or, un opercule métallique ne présente pas facilement une bonne étanchéité à l'air. Nous faisons en sorte qu'ils ne fuient pas le jour de l'épreuve.

EEX17 - Rôle du SEPTEN vis-a-vis du déroulement des épreuves

INTRODUCTION / CONTEXTE

Lors de la mise en service des premières enceintes doubles, le SEPTEN a suivi physiquement toutes les épreuves.

Puis faute de temps, nous sommes par la suite allés de moins en moins souvent sur site.

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

La procédure est actuellement bien rodée, surtout pour les épreuves périodiques.

Sauf en cas d'incident, l'exploitant et la DTG (Division Technique Générale) possèdent les compétences nécessaires pour réaliser les épreuves. Ils nous fournissent ensuite les résultats. Notre rôle se limite alors à l'examen approfondi des cas particuliers.

La Région d'Équipement de Marseille est également chargée de l'aide à l'exploitant, particulièrement pour ce qui concerne les réparations et les étanchéités de revêtements.

Mais, les rôles respectifs de chaque entité ne sont pas très clairement établis.

Particularité du SEPTEN

Le SEPTEN se saisit lui-même des problèmes qu'il estime être importants.

En dehors des demandes émanant d'autres entités d'EDF et concernant des points précis, nous disposons de temps pour réfléchir en profondeur, nous saisir de problèmes et les résoudre.

Relations avec les Régions d'Équipement

Nous connaissons bien les personnes travaillant à la Région d'Équipement de Marseille. Nous parvenons à nous répartir le travail sans difficulté.

Mais lorsque deux Régions d'Équipement sont associées au SEPTEN, la répartition est plus délicate. Heureusement, ce cas est de plus en plus rare.

Il avait été envisagé de regrouper l'Équipement dans un lieu unique. Cette idée n'a jamais été poursuivie, à cause des mobilités géographiques qui en résulteraient.

Les Régions sont donc conservées, avec une répartition du travail bien précisée.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ**AVIS / COMMENTAIRE**

Le SEPTEN a accès à tout, et est en relation avec toutes les entités d'EDF. Il possède donc une bonne estimation de tout ce qui se passe.

C'est essentiel, mais il n'est pas certain que cela durera.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR

Le SEPTEN doit garder son rôle de tour de contrôle.

DOCUMENTS DE REFERENCE**QUESTIONS/REPONSES (REUNION DE FINALISATION)**

COSTAZ :

Un représentant du SEPTEN était toujours présent lors des épreuves.

TOURET :

Aujourd'hui, c'est toujours le cas. Mais à la fin 1997, nous avons demandé que cela soit formalisé. Actuellement, deux personnes (SEPTEN et UNIPE) remplissent cette mission.

Elles permettent une meilleure homogénéité des épreuves, vis-à-vis des équipes qui sont différentes sur chaque site. Ces personnes permettent également le transit de l'expérience entre les différentes équipes.

Une personne de l'ORI (Office Régional d'Intervention) se déplace également de site en site.

Par contre, je déplore que pendant l'épreuve toutes les décisions soient prises par le chef de centrale. Son seul objectif étant de minimiser le nombre de jours d'arrêt de la tranche, les autres participants ont du mal à se faire entendre. La négociation concernant d'éventuels jours d'arrêt supplémentaires est souvent longue et difficile.

Une instance supérieure serait souhaitable.

EEX18 - Avantages et inconvénients des enceintes a peau des 900 mw

INTRODUCTION / CONTEXTE

Les enceintes à peau des 900 MW sont plus simples que les enceintes doubles des 1300 MW, pour lesquelles certaines fuites sont mal localisées.

En effet pour les enceintes des 900 MW, les risques de fuites sont pratiquement localisés aux organes d'isolement. Nous pouvons donc penser que la peau est parfaitement étanche.

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

A Fessenheim, nous avons observé de faibles fuites dans la peau d'étanchéité du radier.

Les systèmes de contrôle installés étaient constitués de petits canaux de section triangulaire soudés de part et d'autre des soudures de la peau. Les éventuelles fuites étaient ainsi collectées, et mesurées à la sortie des canaux.

Nous sommes parvenus à colmater la fuite, en remplissant les canaux avec de la résine. Toute mesure est devenue impossible, mais les fuites sont supprimées.

Accident théorique sur l'enceinte à peau d'un 900 MW

En cas d'accident, la peau se retrouve dans des conditions très différentes de celles de l'épreuve. Elle a tendance à se dilater, du fait d'une température de l'ordre de 140°C. Or elle est coincée par le béton qui reste plus froid.

Les contraintes, en principe de compression, sont alors très fortes et dépassent la limite d'élasticité du métal. La peau entre donc en plasticité.

Si la peau est géométriquement parfaite, elle se comprime en s'appuyant sur le béton. Lors du retour à froid, elle est tendue, mais ce n'est pas ennuyeux.

En pratique, la peau présente de nombreux défauts de forme. Nous pouvons alors rencontrer localement des flexions et des cloquages. L'état de contraintes de la peau est donc parfaitement inconnu, avec certainement des tractions, sans doute au delà de la limite d'élasticité.

La ductilité de la peau métallique rend le pire improbable, mais ne l'exclut pas.

Par exemple, une soudure, même étanche à l'épreuve, peut casser. En effet, la surveillance des soudures par radiographie est uniquement statistique, et porte sur 2% du total, plus les soudures situées à l'endroit des noeuds.

D'autres contrôles sont également effectués sur les soudures, à l'aide de différentes méthodes : vide, ultrasons, ressuage, magnétoscopie. Ils ne permettent qu'un examen de surface de la soudure.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ**Etudes probabilistes**

Au moment du passage au système 1300 MW, j'ai écrit une note pour demander une étude probabiliste qui tiendrait compte de tous les risques de fuites qui ne peuvent être vérifiés le jour de l'épreuve, car la contrainte appliquée n'est pas la même que lors de l'accident de référence (APRP).

Ce principe a été repris avec l'étude probabiliste de sûreté que nous avons réalisée récemment. Cette étude a permis de montrer que l'enceinte était très bonne, mais que sa tenue ultime était de l'ordre de huit à neuf bars, au lieu des treize bars indiqués par le calcul théorique.

Comparaison avec les enceintes des 1300 MW

Pour les enceintes des 1300 MW, l'épreuve à froid représente presque parfaitement un accident.

En effet en cas d'accident, dix centimètres de béton seulement vont s'échauffer et se comprimer.

La compression entraînant une diminution de la fissuration, le béton bénéficiera d'une « peau thermique ».

A l'inverse des enceintes à peau des 900 MW, l'épreuve à froid est donc plutôt pessimiste pour les enceintes des 1300 MW.

L'Autorité de Sûreté est d'accord avec cette façon de voir.

Efforts thermiques

Le ferrailage de l'enceinte est classique. Un acier de 20 mm de diamètre est disposé tous les 20 cm. Nous avons démontré que ce ferrailage pouvait reprendre le moment thermique.

Pour les enceintes des 900 MW, la précontrainte équilibre tout juste la pression correspondant à l'accident de référence, plus la pression de la peau. Les effets thermiques dans le béton, c'est-à-dire l'échauffement qui comprime l'intérieur de l'enceinte et tend l'extérieur, ne sont pas pris en compte par la précontrainte.

Le ferrailage passif, constitué par les aciers à béton armé, reprend théoriquement ces effets.

Cela ne pose pas de problème pour les 900 MW, car la présence d'une peau ductile n'oblige pas le béton à rester comprimé.

Mais, pour les 1300 MW, le problème est réel. L'étude a donc été beaucoup plus poussée, dès le départ. Le ferrailage passif est ainsi prévu pour reprendre les efforts thermiques.

Par ailleurs en cas d'accident, il n'y a pas de limitation des contraintes dans la peau d'étanchéité, mais uniquement des limitations concernant les déformations. D'après la réglementation américaine, les déformations doivent pouvoir atteindre deux à cinq fois la déformation élastique.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

Comme nous ne pouvons pas calculer la contrainte, nous essayons de limiter les déformations, et d'être capables d'accepter les déformations constatées.

Le calcul des contraintes thermiques n'est pas simple dans le béton, même à l'aide des calculs aux éléments finis.

Enceinte du prototype EPR

Nous n'avons pas prévu de peau sur l'enceinte du prototype européen EPR (European Pressurised Reactor), car l'Autorité de Sécurité allemande nous aurait certainement causé des difficultés.

Les électriciens allemands ayant gardé un très mauvais souvenir des enceintes à peau, nous n'avons pas eu de mal à les convaincre.

AVIS / COMMENTAIRE

En cas d'accident, nous devons admettre la possibilité de fuites locales de la peau. Malgré cela, il est très probable que la pression de quatre bars soit supportée de façon satisfaisante, même à chaud. En effet, un mètre de béton pallierait l'étanchéité défailante de la peau.

Mais nous ne pouvons pas le prouver, car les épreuves ne sont pas réalisées avec une peau qui fuit.

Le seul accident de ce type est survenu à Three Miles Island aux Etats-Unis. Tout s'est bien passé, mais la pression n'est montée qu'aux alentours de deux bars.

Les allemands avaient préconisé une radiographie portant sur la totalité des soudures. En raison du coût de la procédure, ils n'ont pas retenu cette solution pour le projet européen EPR.

Les canaux de contrôle des soudures de la peau du radier ont été conservés au cours de la dizaine de tranches du contrat CP1. Ils ont été supprimés sur tous les CP2, car ils apportaient plus de problèmes qu'ils n'en résolvaient.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR

Le système 900 MW est excellent pour obtenir de bons résultats d'épreuves. Il peut s'avérer moins bon pour résister à un accident.

Le 1300 MW est un système plus complexe, mais son concept est plus physique. La progressivité d'une éventuelle fuite constitue un avantage important, permettant de traiter correctement l'accident.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ**DOCUMENTS DE REFERENCE**

[1] Fiche MTE n° 003 : « Pression d'enceinte après accident »

[2] Fiche MTE n° 041 : « Conception des enceintes doubles »

[3] Fiche MTE n° 086 : « Conception des enceintes (enceintes simples) »

[4] The prestressed nuclear containment - Cost saving on the french project

J.C. BERTEL, M. POUSSE, E. FAURE, G. ITHURRALDE
EDF - SEPTEN, Freyssinet international, Groupement pour la Précontrainte Nucléaire, 1986

QUESTIONS/REPNSES (REUNION DE FINALISATION)

COSTAZ :

Pour résumer, les enceintes à peau présentent un gros avantage et de nombreux petits inconvénients.

Il est un peu risqué de faire reposer toute l'étanchéité, à quatre ou cinq bars de pression, sur un voile de béton, même si celui-ci est bien fait et précontraint.

Pour l'instant nous ne pouvons pas conclure quant à son efficacité en cas d'accident, car il n'y a heureusement jamais eu d'accident.

Le seul problème important a concerné Three Miles Island, où la pression a seulement atteint deux bars en déflagration rapide d'hydrogène.

POUBLANC :

Les canaux de contrôle installés au niveau du radier ont également été bouchés sur le CP1, avec du coulis au ciment.

Cela a permis de boucher les fuites aux soudures, mais également de résoudre le problème de corrosion de la peau.

COSTAZ :

Sur les fonds d'enceintes, la peau est recouverte d'un mètre de béton. Il est donc impossible d'observer ce qui s'y passe.

Nous ne pouvons pas coller le béton à la peau, car les températures seront différentes à l'intérieur et à l'extérieur. Le joint n'étant pas étanche, la peau se retrouve parfois très corrodée. Dans ce cas, nous bouchons tout.

POUBLANC :

Avec du coulis de ciment.

LACROIX :

Le ciment est alcalin.

EEX19 - Difficultés apportées par le sas sur les enceintes des 1300 mw

INTRODUCTION / CONTEXTE

Le diamètre du sas des enceintes du système 1300 MW est important, 8 mètres.

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

L'étanchéité du sas était réalisée à l'aide d'une bride et de deux joints souples en caoutchouc.

Idées initiales concernant l'étanchéité du sas

La première idée consistait à réaliser un drain entre les deux joints, en reliant l'inter-joints à l'espace entre enceintes, afin de répondre au concept d'enceinte double.

Cette idée n'a pas été retenue pour conserver l'efficacité des deux joints. En effet en cas d'accident, une fuite sur le joint interne pouvait être dangereuse, en permettant un passage direct de la pression vers l'espace entre enceintes.

Une autre solution prévoyait une pressurisation permanente de l'espace entre joints, supérieure à la pression correspondant à l'accident de référence, rendant ainsi impossible les fuites vers l'extérieur.

De plus, nous aurions eu la possibilité de mesurer l'étanchéité des joints.

Cette solution n'a pas non plus été mise en place.

Respect du critère des contraintes

Autour du sas, le critère de non-traction dans le béton est difficile à respecter.

Les perturbations sont dues à la présence de l'orifice, mais également aux contraintes parasites causées par les déviations de câbles nécessaires autour du sas.

Nous avons constaté que les perturbations sont moindres si presque tous les câbles s'arrêtent sur la circonférence de l'orifice. Mais il faut alors reprendre les efforts de traction, à l'aide d'une précontrainte circulaire, ou par des câbles locaux placés autour du sas (méthode retenue en Inde).

Le P4 présentait autour du sas une précontrainte locale additionnelle. Celle-ci a ensuite été enlevée sur le P'4, à cause de la complexité de mise en oeuvre et d'un intérêt finalement limité.

En effet, l'intérieur de la zone de précontrainte circulaire était amélioré, mais une décompression apparaissait un peu plus loin.

EDF SEPTEN	Note E-N-SI-GD/01-00063	Indice A	Page 97/133
---------------	----------------------------	-------------	----------------

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

Quelle que soit la méthode employée, le champ de contraintes est perturbé autour du sas, et les calculs de contraintes y sont délicats.

Les calculs par éléments finis permettent de connaître le comportement d'un matériau élastique, mais le béton présente des possibilités de fluage différentiel.

Pendant cinq ans, nous avons réalisé des calculs autour du sas. Les conclusions restent pourtant essentiellement issues de l'expérience.

AVIS / COMMENTAIRE

Solutions envisagées

Revêtement

Un revêtement local, sur quelques mètres, peut constituer une bonne solution, s'il est correctement réalisé avec des matériaux susceptibles de résister au temps.

C'est la solution retenue sur l'EPR, à l'aide d'un liner partiel en matériaux composites (résine avec fibres de verre).

Peau intérieure (collerette)

Une autre solution consisterait à recréer une peau à l'intérieur du béton, c'est-à-dire à remplacer les petites collerettes de 20 cm situées autour du sas par une collerette de 1 à 2 m.

Cette solution présenterait l'inconvénient de couper le béton et serait également délicate à mettre en oeuvre. En effet, le ferrailage doit pouvoir traverser la collerette.

Système collé

La solution réaliste consiste à réaliser une étanchéité locale par l'intérieur, à l'aide d'un système collé. En effet, une peau d'étanchéité métallique locale n'est pas efficace, car l'air passe très facilement dans le béton par les extrémités de la peau.

Un système collé peut être utilisé, s'il est bien réalisé et s'il est capable de tenir l'accident de référence.

Jusqu'à aujourd'hui, nous avons rencontré des difficultés. Mais les progrès actuels concernant les composites à base d'époxy devraient permettre la mise en place d'une très bonne solution.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR

La présence de tractions locales constitue une des difficultés de l'enceinte sans peau. Un ferrailage passif important est prévu pour résister à ces tractions, mais nous n'avons pas envisagé la présence de tractions sur toute l'épaisseur du béton. Nous pensions qu'il y aurait toujours une zone comprimée, à l'intérieur ou à l'extérieur suivant les cas. La peau permet de nous affranchir des soucis concernant d'éventuelles tractions.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

DOCUMENTS DE REFERENCE

[1] Fiche MTE n° 015 : « Traversées enceintes 1300 »

[2] Fiche MTE n° 078 : « Reprise des fuites aux traversées des enceintes »

QUESTIONS/REPOSES (REUNION DE FINALISATION)

TOURET :

EPN nous demande une étude concernant une autre variante de peau d'étanchéité, locale et métallique. En effet, ils n'ont pas confiance dans les composites.

COSTAZ :

Une peau métallique totale fonctionne correctement. Mais lorsqu'elle est partielle, j'en doute.

Il faudrait la coller. Or, coller des matériaux composites est simple, mais coller du métal sur du béton est assez délicat.

FAURY :

Une peau très mince n'est-elle pas plaquée naturellement ?

COSTAZ :

Il faudrait une tôle de moins d'un millimètre. Dans ce cas, le risque de corrosion est élevé.

EEX20 - Principe de la simple enceinte drainée

INTRODUCTION / CONTEXTE

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

Le principe de la simple enceinte drainée prévoit de respecter la méthode de la double enceinte, tout en n'en réalisant qu'une seule.

Pour cela, un drain situé derrière la peau métallique récupère les éventuelles fuites.

AVIS / COMMENTAIRE

L'idée n'a pas été retenue car, à l'époque, le système 1300 MW était nouveau et occupait tous les esprits.

La simple enceinte drainée constituait peut-être une bonne solution. Elle répondait au souci de sûreté, à l'aide du concept d'enceinte double avec possibilité de reprise de fuites.

Cette solution n'a été expérimentée nulle part dans le monde.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR

DOCUMENTS DE REFERENCE

[1] Etude d'Avant-Projet de Coyne et Bellier

[2] Dossier sur l'enceinte « en arêtes de poisson »

QUESTIONS/REponses (REUNION DE FINALISATION)

PICAUT :

Le principe de la simple enceinte drainée est une bonne idée. Il faudrait réaliser une maquette.

TOURET :

Je me souviens plutôt de l'enceinte en arêtes de poisson. Il s'agissait d'une enceinte simple présentant des collecteurs en béton poreux avec des prolongements, d'où son nom.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

Il existe un dossier à ce sujet, aux archives du SEPTEN ([2]).

COSTAZ :

Cette enceinte possédait de nombreux orifices dont nous pouvions nous servir pour passer les câbles.

EEX21 - Principe d'une peau d'étanchéité au milieu du béton

INTRODUCTION / CONTEXTE

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

Les suédois ont réalisé une ou plusieurs tranches qui possédaient une enceinte simple, présentant une peau à l'intérieur de la paroi en béton.

La peau métallique de six millimètres d'épaisseur était située à mi-distance des deux bords.

Avec ce principe, la peau est mieux protégée de la corrosion.

Mais cette protection peut ne pas s'avérer suffisante (voir paragraphe « Difficultés rencontrées »).

Difficultés rencontrées

L'enceinte a présenté des fuites, en particulier autour des traversées.

En effet, la paroi métallique située au milieu du béton compliquait la réalisation de l'enceinte. De ce fait, les suédois avaient pensé que les bétonnages ne seraient pas parfaits autour des traversées importantes. Ils avaient donc prévu d'installer un tuyau qui permettait d'injecter de la résine autour de ces traversées, à l'emplacement de la peau.

Au début, le système n'a pas fui. Ils ont donc laissé le tuyau dans l'enceinte, sans l'utiliser.

De l'air humide a fini par transiter par l'intérieur du tuyau.

Sur une ou deux traversées, la peau a finalement été percée par corrosion.

AVIS / COMMENTAIRE

L'impossibilité de cloquage de la peau est un point intéressant du concept de peau d'étanchéité au milieu du béton.

Nous n'avons pas utilisé ce concept, car il nous semblait complexe.

Il est d'ailleurs sécurisant de conserver la possibilité d'observer l'état de la peau.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

DOCUMENTS DE REFERENCE

QUESTIONS/REPNSES (REUNION DE FINALISATION)

LACROIX :

Le principe de la peau d'étanchéité au milieu du béton est l'inverse de celui de la simple enceinte drainée.

COSTAZ :

Oui. Au lieu d'installer un drain, il s'agissait d'un système étanche.

La peau était située au milieu du béton, afin de la protéger de la corrosion. Elle s'est tout de même corrodée.

LACROIX :

Le principe reste correct. S'ils avaient injecté la résine tout de suite, ils n'auraient pas subi de corrosion de la peau.

COSTAZ :

La réalisation d'une telle enceinte est complexe, et l'Autorité de Sûreté n'aime pas ce concept qui ne permet pas le contrôle de l'état de la peau.

Pour ma part, j'apprécie que la peau soit noyée dans le béton. Le principe ne prend pas plus de place, et la peau est mieux protégée que lorsqu'elle est collée sur le parement interne.

EEX22 - Mesures de fuites sur la maquette maeva

INTRODUCTION / CONTEXTE

La perméabilité intrinsèque à un matériau, ou perméabilité géométrique, se définit en mètres carrés. Pour une enceinte, les spécifications requièrent 10^{-17} m^2 .

La perméabilité moyenne que nous obtenons à partir du taux de fuites est du même ordre, entre 10^{-17} et 10^{-18} m^2 .

Essais sur béton poreux

Nous avons effectué des essais sur des bétons très poreux, car ceux-ci sont plus faciles à réaliser qu'une fissure.

Deux bétons ont été utilisés, avec des perméabilités géométriques de 10^{-18} m^2 et 10^{-15} m^2 . En effet, nous estimions la valeur de la perméabilité locale d'une fissure moyenne à 10^{-15} m^2 .

Les mesures locales de fuites ont montré que la vapeur se condensait et que le béton ne fuyait pas.

Mais l'Autorité de Sûreté soutenait qu'un béton poreux n'avait rien de comparable à une fissure.

Essais en présence d'une fissure

Nous avons donc essayé de créer une fissure artificielle, mais nous n'y sommes pas parvenus.

L'essai a été réalisé à l'aide d'une éprouvette de béton fendue par essai brésilien.

La fissure était calibrée à cent microns.

Dans l'appareil de mesure de perméabilité, la vapeur a chauffé l'échantillon et refermé la fissure.

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

Nous avons eu de nombreuses discussions avec l'Autorité de Sûreté, concernant l'estimation des risques de fuites en présence de vapeur lors d'un accident.

L'épreuve est en effet réalisée à l'air sec.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

Les études du CEBTP montraient que la vapeur d'eau présente dans l'enceinte avait tendance à se condenser dans le béton froid. Tant que la fissure était fine, le phénomène constituait une bonne étanchéité.

Nous pensions avoir raison, mais sans parvenir à le démontrer à l'Autorité de Sûreté.

Idee de réaliser la maquette MAEVA

La commission mixte « Sûreté eau légère », qui traitait la R & D commune à EDF et au CEA, avait déjà exprimé le souhait d'une maquette au dixième, comme en faisaient les américains et les japonais.

Mais la paroi de la maquette aurait eu dix centimètres d'épaisseur, ce qui est loin du mètre nécessaire à la représentativité de la mesure de perméabilité du béton.

L'idée a donc été abandonnée.

Elle m'est revenue plus tard, mais en utilisant une épaisseur de béton à l'échelle un. C'est en effet le seul moyen d'approcher les problèmes de fuites que nous n'avions pas réussi à résoudre sur de petites éprouvettes.

Afin de ne pas construire une maquette de quarante mètres de diamètre, nous avons réalisé un anneau à l'échelle un tiers, sur une hauteur de cinq mètres.

Décision de construction de la maquette

L'ouvrage devait être construit à CIVAUX, dès la fin des travaux de génie civil concernant la centrale, afin de bénéficier de l'expérience et des compétences des personnes encore présentes sur place.

Mais le coût très élevé de la maquette, ainsi que diverses difficultés, ont retardé la décision de 2 ans.

Certaines personnes n'ont pu revenir sur le site. En conséquence, la réalisation ne fut pas d'excellente qualité et semble poser beaucoup de problèmes.

Financement

La maquette devait coûter 40 MF à l'Équipement.

Nous avons cherché à impliquer l'Exploitant dans notre projet, mais il était délicat de proposer la réalisation d'une maquette pour un programme qui arrivait en phase finale. Pour cette raison, la maquette a été officiellement reliée au projet EPR.

Par contre, l'Exploitant n'était pas intéressé au projet EPR. Nous l'avons persuadé que la maquette pourrait également servir aux enceintes actuelles.

L'Exploitant a finalement participé à hauteur de 13 MF.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZRésultats obtenus à l'aide de la maquette

Je ne participe plus au projet, mais j'ai l'impression qu'il s'avère beaucoup plus délicat que nous ne l'imaginions au départ.

Il s'agit en effet presque d'un ouvrage réel, qui est de surcroît très instrumenté.

Nous sommes de plus gênés par des fuites parasites mal évaluées, au niveau des joints placés entre les parois verticales et horizontales de la maquette.

Les difficultés technologiques ont été à peu près résolues, mais très difficilement.

Par contre, les résultats obtenus ne nous sont pas aussi favorables que nous ne les souhaitons.

En particulier, une fissure horizontale, due à une mauvaise reprise, occasionne une fuite importante.

La maquette sert à la fois à :

- mesurer le coefficient de transposition,
- valider en vraie grandeur le coefficient d'étanchéité.

Nous confirmons les mesures du facteur de transposition.

AVIS / COMMENTAIRE

L'exploitation de la maquette reste délicate.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTURDOCUMENTS DE REFERENCEQUESTIONS/REPONSES (REUNION DE FINALISATION)

TOURET :

Le projet MAEVA est lourd pour la Division Génie Civil du SEPTEN.

Il s'agissait au départ d'une R & D tournée vers EPR. C'est maintenant devenu l'ultime recours pour sauver les tranches en perdition. En conséquence, la hiérarchie d'EDF se tient en permanence au courant des résultats. Il est très difficile de faire de la R & D dans un contexte temps réel.

Nous avons fait un certain nombre d'essais en air-vapeur.

1 - Essais aux conditions de dimensionnement.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

2 - Essais au-delà des conditions de dimensionnement, de façon à observer la tenue à des pressions de l'ordre de 10 bars.

Ces essais sont encadrés par des essais en air, qui permettent de recalibrer la maquette.

Pour l'instant, la deuxième série d'essais est repoussée à plus tard. Les essais sont actuellement orientés pour rentabiliser le plus possible ce qui a déjà été réalisé.

Nous allons très prochainement faire le troisième essai en air-vapeur, au cours duquel nous allons essayer de suivre un transitoire proche du transitoire de calcul. Auparavant, compte tenu des possibilités de la chaudière et des mesures DTG (il faut des paliers très longs, de 24 heures), la maquette a été endommagée. En effet, deux fois de suite elle a subi une température de 160°C pendant 72 heures. Le béton est donc cuit.

COSTAZ :

Le problème vient surtout de la résine.

TOURET :

Nous effectuons deux types de mesures.

1 - Les mesures de type « épreuve enceinte », c'est-à-dire de taux de fuites global dans des caissons situés à l'extérieur de la maquette.

2 - Les mesures locales pratiquées par le CEMETE, avec des boîtes placées en face des fissures identifiées.

Nous exploitons surtout le deuxième type de mesures. En effet, nous ne pouvons pas réellement exploiter les mesures globales. Leur interprétation est délicate, à cause des problèmes dus à la réalisation de la maquette.

Par exemple, une grande fissure apparaît dans un des caissons, à l'endroit d'une reprise de bétonnage ratée. Si nous voulons comparer à une épreuve en air, nous arriverions à un taux de fuites voisin de 10%. Dans l'autre caisson qui est un peu meilleur, nous atteignons 2%.

Or, il s'agit du même béton que pour Civaux 2, sur lequel le taux de fuites est de 0,1%.

Nous sommes donc confrontés à un problème de qualité de réalisation.

Nous démontrons tout de même que les revêtements composites jouent leur rôle, même s'ils sont dégradés. En effet, lorsqu'il y a un revêtement, le taux de fuites est inférieur à celui autorisé en accident grave.

Dans l'avenir, nous allons essayer de rajouter des buses d'injection d'eau, de façon à faire chuter plus rapidement les pressions et les températures. La DER étudie cette possibilité, pour laquelle le prédimensionnement est en cours.

Les fissures du béton ont été identifiées et sont matérialisées par des couleurs différentes qui permettent d'observer leur évolution au cours des essais.

Certaines nouvelles fissures apparaissent. Nous constatons également la présence de fissurations en forme d'étoile, qui indiquent des poussées internes. Par endroits, le béton a éclaté, et présente des formes coniques assez profondes.

L'exploitation va être très délicate. Actuellement, l'Autorité de Sûreté est très pessimiste sur l'exploitation que nous pourrions en faire. Ils nous ont dit récemment ne pas accorder beaucoup de crédit à ce que nous allons leur dire à propos de MAEVA. Leur nouveau chef est plus habitué à la cuve des réacteurs et aux tuyauteries, c'est-à-dire à la métallurgie. Il a

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

du mal à comprendre que le béton et le génie civil en général sont très différents. Par exemple, il est très surpris par une fissure de 0,1 à 0,2 mm.

A la fin du mois de juin, se tiendra une revue de projet. Un bilan sera fait, et nous essayerons de définir un programme de travail pour l'année prochaine.

Lors des réunions concernant MAEVA, nous sommes en face de dix directeurs issus de la Production. Nous ne pouvons qu'obtempérer sur leurs décisions.

PICAUT :

Que pouvons nous dire concernant les ratios obtenus ?

TOURET :

Les prévisions les plus optimistes donnent un taux situé entre 1,5 et 2%.

PICAUT :

Est-il variable avec la pression ?

TOURET :

La valeur est intégrée sur 24 heures, à pression constante.

Nous envisageons de réaliser un essai sur 24 heures, avec une pression variable.

COSTAZ :

Une maquette de démonstration démontre rarement ce pourquoi elle est prévue. Par contre, elle permet souvent de découvrir d'autres phénomènes. En effet, c'est de la R & D.

TOURET :

Oui, mais généralement, une maquette est construite dans le but de démontrer un point précis.

EEX23 - Mauvaise résistance a la temperature des resines d'injection

INTRODUCTION / CONTEXTE

La maquette MAEVA (voir chapitre précédent) se dégrade au fur et à mesure des essais en température.

Au niveau d'une mauvaise reprise de bétonnage, la paroi de la maquette est endommagée par un éclatement du béton.

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

La résine injectée dans la fissure, afin de la colmater, est soumise lors des essais à une température élevée (160°C) pendant un temps assez important (70 heures). Elle a gonflé et s'est liquéfiée. Au premier essai, la résine sortait par l'extérieur de la paroi.

Les hypothèses initiales avaient envisagé la possibilité d'atteindre une température de 140 °C sur le parement, le milieu du béton restant de toute façon plus froid.

Nous savions qu'à ces températures la résine ramollissait un peu, mais cela ne nous inquiétait pas.

Explication du phénomène

Les essais en température montent à 160°C, température pour laquelle la résine a montré qu'elle coulait et se dilatait.

La pression d'eau interstitielle est probablement aussi susceptible de pousser la résine, à cause de la vaporisation d'une partie de l'eau libre contenue dans le béton.

Les bétons à hautes performances (BHP) étant très imperméables, les pores sont très fermés, ce qui augmente encore la pression de vapeur d'eau.

Qualification des résines

Nous avons déjà constaté un problème analogue sur CIVAUX 2.

Le Groupe Permanent nous a alors demandé de lancer un programme de qualification des résines en température, notamment pour étudier leur résistance aux accidents graves.

Nous avons toujours rejeté la question, car le phénomène observé pouvait avoir d'autres causes comme, par exemple, une résine dégradée sur le parement.

De plus, la résine étant injectée en profondeur, nous considérons qu'au milieu du béton la température ne dépassait pas 60°C.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ**AVIS / COMMENTAIRE**

La maquette MAEVA a mis en évidence un problème initialement non prévu, du fait du maintien pendant 70 heures d'une température élevée (160°C).

Les spécifications étaient imprécises. Nous ne savons pas si les transitoires de température prévus représentaient la température de la peau, de l'atmosphère, ...

Toutefois un doute persiste, car des essais de résine avaient été réalisés à 250°C sur certains ouvrages, sans que nous puissions mettre en évidence un quelconque coulage. D'ailleurs d'une manière générale, les époxy ne coulent pas.

TEGG a produit de nombreuses résines différentes. La résine employée pour la maquette n'est peut-être pas la même que celle essayée à 250°C.

La résine employée pour la maquette n'était pas un époxy pur. Peut-être a-t-elle été rendue, d'une manière ou d'une autre, sensible à la température. En effet, les qualités des résines dépendent de phénomènes chimiques complexes. Par exemple, le mélange peut être mal réalisé, ou fait à une température incorrecte, ...

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR

Les phénomènes de gonflage et de liquéfaction de la résine nous semblent assez inquiétants.

Avant toute chose, il est souhaitable de vérifier la composition exacte de la résine utilisée pour la maquette, afin de la comparer à la résine déjà utilisée sur les enceintes.

Il serait également intéressant de retrouver les spécifications APRP concernant les résines, et les essais initiaux qui ont été réalisés.

DOCUMENTS DE REFERENCE**QUESTIONS/REponses (REUNION DE FINALISATION)****POUBLANC :**

Les résines époxy ne devraient pas couler. Un problème dans la polymérisation est vraisemblablement la cause du phénomène observé.

ELEMENTS D'EXPERIENCE

RELATIFS A LA RECHERCHE ET A LA MAINTENANCE EN GENIE CIVIL

EEX24 - Rôle respectif pour le génie civil de la direction des études et recherches et de techniques d'exécution géologique et géotechnique (TEGG)

INTRODUCTION / CONTEXTE

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

Au moment de l'arrêt des réalisations de centrales au graphite-gaz, dans les années 1970, la DER (Direction des Etudes et Recherches) a abandonné sa Division dédiée au génie civil, soit une dizaine de personnes.

Le SEPTEN a alors continué sans leur aide.

Aux alentours des années 1985 - 1990, lorsqu'il s'est agi de redéfinir le partage des responsabilités de chaque Direction, la DER s'est plaint de ne plus participer aux recherches en génie civil.

Rôle actuel de la DER

La DER prend maintenant toute sa place dans des domaines bien précis, en particulier pour tout ce qui concerne les calculs (éléments finis, ...). Ces calculs ne sont d'ailleurs pas spécifiques au génie civil, et peuvent servir à toutes les entités d'EDF.

Par ailleurs, la DER participe plus aux R & D que TEGG (Techniques d'Exécution Géologiques et Géotechniques), qui a généralement de la peine à innover.

La DER a également mis au point toutes les procédures concernant les fuites.

Rôle actuel de TEGG

TEGG est plutôt axé sur l'exécution. Or actuellement, il n'y a presque plus de réalisations. Leur laboratoire est donc moins utilisé qu'auparavant.

A notre contact, TEGG s'est en partie transformé en laboratoire de développement concernant certains sujets, par exemple :

- l'étude des chocs à l'aide d'une catapulte ; cette idée peu coûteuse était issue de Renault,
- l'étude de matériaux amortisseurs,
- les études concernant les bétons spéciaux.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

Mais contrairement au SEPTEN, tout travail de TEGG doit être justifié par une demande explicite.

AVIS / COMMENTAIRE

A l'époque du graphite-gaz, nous avons travaillé volontiers avec la Division génie civil de la DER, car les personnes étaient très compétentes dans certains domaines très pointus.

La DER aurait souhaité être associée à la réalisation de la maquette MAEVA (voir chapitre « Mesures de fuites sur la maquette MAEVA »).

Cela faisait partie de leur domaine, mais nous avons envisagé une maquette de démonstration rustique. Une maquette réalisée en association avec les Etudes et Recherches aurait été plus technologique, et aurait demandé des délais plus longs.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR

Actuellement, divers domaines de compétences sont en train de se mettre en place à la DER.

Ils proposent, par exemple, des programmes de recherche sur les enceintes, l'aval du cycle,
...

DOCUMENTS DE REFERENCE**QUESTIONS/REPONSES (REUNION DE FINALISATION)**

COSTAZ :

Depuis que la DER participe de nouveau au génie civil, elle ne le fait que partiellement, sous l'angle des calculs. Cela n'est pas une bonne chose.

TOURET :

En 1993, personne ne s'intéressait au génie civil. Lorsque nous demandions un essai, ou un renseignement concernant un code de calculs, personne ne pouvait s'en occuper.

POUBLANC :

TEGG n'innove que si cela lui est demandé, et s'il est payé pour le faire. Il s'agit d'un service opérationnel.

EEX25 - Généralités sur la maintenance en génie civil

INTRODUCTION / CONTEXTE

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

La Direction de la Production Thermique de l'Exploitant est chargée de la maintenance. Mais elle possède peu de compétences en génie civil, et doit s'appuyer sur l'Équipement.

Une Note Commune (voir document [1]) précise les rôles de chacun en matière de maintenance.

Guides de gamme de maintenance préventive

Des Guides de gamme de maintenance préventive existent pour l'ensemble du génie civil (voir documents [2]).

Pendant un certain temps, le SEPTEN s'est occupé de la réalisation de ces guides. Nous avons écrit un livre épais au sujet des menuiseries métalliques, et testé les améliorations des portes coupe-feu à l'aide de matériaux composites.

Actuellement, TEGG est chargé de ces rédactions. Ils ont produit une très grande quantité de documents sur la maintenance dans le domaine du génie civil.

Règles de Suivi en Exploitation pour le Génie civil (RSEG)

Au moment où j'ai quitté le SEPTEN, nous participions à l'écriture d'un RSEG concernant la maintenance.

L'Autorité de Sûreté appréciait le RCC-G (Règles de Conception et de Construction en Génie civil), et nous a demandé de réaliser la même chose pour la maintenance.

Nous avons essayé de ne pas faire un document trop minutieux et exhaustif car, une fois qu'une règle est écrite dans un document officiel, elles induisent des contraintes énormes.

Or en génie civil, il n'est pas nécessaire d'aller en permanence rechercher la présence d'un éventuel phénomène à l'intérieur du béton.

Le projet d'un RSEG pour la maintenance a été lancé, puis s'est rapidement arrêté, en raison de sa très grande complexité.

Pratique de la maintenance

L'enceinte est un bâtiment un peu particulier, qui nécessite très peu de maintenance. Par exemple, les épreuves font partie de l'exploitation.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

Pour les autres bâtiments, la maintenance concerne surtout le second œuvre, car il y a généralement peu de maintenance pour le gros œuvre. Gravelines fait toutefois exception, en raison d'une qualité de réalisation insuffisante. Les aciers rouillent en surface.

La position actuelle d'EDF prend en compte 2 types de maintenances.

Maintenance courante

La maintenance courante a toujours été réalisée par l'exploitant, sans qu'elle soit formellement explicitée.

Les bâtiments nucléaires ont été conçus pour une durée de vie de 40 ans. Ils résisteront certainement un siècle, car ils sont prévus pour une charge qu'ils ne subissent pas.

Problèmes génériques

Quelques problèmes génériques sont bien connus. Ils concernent les cheminées DVN, les tuyaux Bonna, les puisards, ... Sur ces sujets, la Direction de l'Équipement intervient.

Quelques problèmes restent très spécifiques :

- Le traitement des fissures n'est pas simple. En effet, une maintenance irréfléchie risque de remettre en cause les dimensionnements initiaux.
- Les voiles des piscines peuvent également être sujets à quelques questions (voir chapitre suivant).
- Certains aciers peuvent rouiller. Il convient de les traiter en temps utile.
- Les risques dus aux séismes et à des chutes d'avion font l'objet d'études particulières.
- L'étanchéité à la nappe phréatique constitue un problème important, car les bâtiments sont enfoncés dans le sol. Les éventuelles fuites se voient aisément.
- L'étanchéité vers l'extérieur est suivie régulièrement à l'aide de relevés dans la nappe, à proximité des enceintes.
- Les portes coupe-feu métalliques finissaient par se tordre et perdre leur efficacité. Elles ont été renforcées. Actuellement, elles sont en matériaux composites.

Point général sur les bâtiments

Plusieurs idées avaient été émises concernant le projet de faire un point régulier sur tous les bâtiments nucléaires importants.

L'exploitant aurait pu s'en occuper, en suivant préalablement une formation appropriée. Mais le projet pouvait également être confié à une autre entité d'EDF, ou même à une entreprise extérieure.

Au moment où j'ai quitté le SEPTEN, le projet a été interrompu. Les visites initiales sont effectuées.

EDF SEPTEN	Note E-N-SI-GD/01-00063	Indice A	Page 115/133
---------------	----------------------------	-------------	-----------------

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

TEGG est tout à fait indiqué pour réaliser ce suivi. Cela nécessitera du temps.

AVIS / COMMENTAIRE

Je ne sens pas vraiment ce qu'on entend par maintenance en génie civil, à part la maintenance de base qu'il faut faire comme pour tout bâtiment.

Les difficultés rencontrées dans le gros-œuvre sont surtout dues à des malfaçons.

De plus, les éventuelles dégradations évoluent lentement. Nous avons donc le temps de les localiser, à condition de visiter périodiquement tous les recoins des bâtiments.

Le principe du RSEG me semblait une bonne chose.

Mais la maintenance d'une machine et d'un bâtiment n'ont pas grand chose en commun. Vouloir appliquer l'une à l'autre n'a pas de sens.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR

Il faut se garder de trop institutionnaliser la maintenance concernant le génie civil, sinon son coût deviendra très important du fait des études qui deviendront nécessaires.

Il faut être pragmatique et se concentrer sur les quelques difficultés qui sont apparues au cours de la mise en service et de l'exploitation, et qui d'ailleurs n'étaient pas prévues au début. Cette méthode est plus efficace que celle consistant à mettre en place une maintenance théorique censée prévoir tout ce qui peut arriver.

Une bonne solution pourrait être la suivante. Des génie-civilistes, si possible appartenant à EDF, ou au moins issus d'une société sérieuse et reconnue, doivent accepter de visiter, deux fois par an par exemple, un certain nombre de bâtiments afin de détecter de visu d'éventuels problèmes. Il y a en effet suffisamment d'ingénieurs en génie civil à EDF : de l'ordre de 300 au SEPTEN, à TEGG, ...

Cette méthode présenterait l'avantage d'être simple et peu coûteuse.

Il faut porter une attention particulière aux parties internes des bâtiments, qui sont très peu visitées.

DOCUMENTS DE REFERENCE

[1] Note Commune précisant les rôles de l'Exploitant et de l'Équipement en matière de maintenance

[2] Guides de gamme de maintenance préventive concernant le génie civil

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

QUESTIONS/REPONSES (REUNION DE FINALISATION)

ANDRICQ :

L'Exploitant s'est rendu compte qu'un ouvrage de génie civil vieillit. En conséquence, il commence à s'intéresser à la maintenance concernant le génie civil.

CHAUVEL :

Il y est contraint.

COSTAZ :

Nous avons tendance à penser que le béton était éternel.

CHAUVEL :

Le RSE-G a surtout été suspendu faute de crédits.

POUBLANC :

Nous pourrions établir un RSE-G plus réaliste, moins systématique.

COSTAZ :

Le RCC-G n'est qu'une synthèse des documents établis avant lui.

Pour le RSE-G, il faut procéder de la même façon, c'est-à-dire ne rédiger le document que lorsque nous sommes à peu près d'accord.

POUBLANC :

En effet, nous ne devons pas nous contraindre inutilement.

COSTAZ :

C'est essentiel, surtout avec l'Autorité de Sûreté qui s'accroche longtemps à tout élément écrit.

CHAUVEL et POUBLANC :

Les visites des sites sont en cours.

POUBLANC :

Les bilans résultant des premières visites montrent que, mis à part le problème de l'enceinte, les corps d'états secondaires sont les plus préoccupants.

Par ailleurs, l'étanchéité des bâtiments nucléaires vis-à-vis de la nappe phréatique est maintenant un axe très médiatique, qui va devenir crucial dans les années à venir.

EEX26 - Fuites sur les piscines de stockage de combustible irradié

INTRODUCTION / CONTEXTE

Les piscines contenant du combustible irradié sont revêtues d'une peau en acier inoxydable, réalisée à l'aide de plaques de 3 à 4 millimètres d'épaisseur, et soudées tous les 2 mètres. L'ensemble est installé après mise en place du béton.

Avant N4, les piscines étaient drainées grâce à de petits canaux situés derrière les soudures et reliés vers une sortie visible.

Depuis N4, les piscines contenant du combustible irradié bénéficient de la technologie avancée de La Hague :

- la radiographie des soudures est possible, grâce à des canaux plus grands qui permettent le passage d'une source de gammagraphie ou d'un film,
- les drains ne sont pas tous reliés, ce qui rend les fuites plus faciles à repérer.

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

Sur une première piscine à Gravelines, nous avons constaté une fuite.

Il fallut trois ans pour localiser la soudure en cause, probablement à l'aide d'un palpeur à ultrasons. Il est en effet délicat de vider une piscine, et la fuite se trouvait dans un endroit inaccessible.

Pendant cette période, de l'eau borée, donc acide (pH 5), a transité à travers le béton, entraînant certainement des dissolutions.

Nous avons alors réalisé une maquette qui nous a permis de simuler des fuites d'eau borée dans un béton. Les dissolutions ne semblent pas très importantes.

A Fessenheim, la fuite était nettement visible sur un parement du mur extérieur de la piscine.

Explication du phénomène

Les effets thermiques causés par le rayonnement issu du combustible entraînent un vieillissement précoce de la peau inox de la piscine. La peau ne pouvant se dilater, elle va cloquer, d'autant plus facilement qu'elle est ancrée dans le béton par des goujons placés tous les 2 mètres seulement. A titre de comparaison, la peau des enceintes est ancrée tous les 10 à 20 centimètres.

Le phénomène n'est pas inquiétant, tant que ne se produisent pas de nombreux cycles de cloquage suivi d'un décroquage, conséquence par exemple de fluctuations importantes de températures dans la piscine.

Génie Civil et enceintes de confinement -- Recueil d'expérience de M. COSTAZ

Les contraintes de flexion induites au niveau des soudures sont alors importantes. Elles seront admises pendant un certain temps, puis nous atteindrons la rupture.

Le phénomène est atténué par la pression de l'eau contenue dans la piscine qui plaque normalement le voile métallique contre le parement. Par contre dans la partie supérieure de la piscine, la pression est plus faible et la température moins élevée. Le résultat est donc assez incalculable.

AVIS / COMMENTAIRE

Le rayonnement fait également vieillir l'acier prématurément.

Après la fuite sur la piscine de Gravelines, nous sommes allés observer les solutions employées par la COGEMA à La Hague. La technologie utilisée (voir paragraphe « Introduction : contexte ») est sérieuse. Le SEPTEN et TEGG ont insisté pour l'imposer à l'EDF, même si sa mise en oeuvre est coûteuse à court terme. Elle présente l'intérêt d'être plus facilement réparable.

Dans les deux cas cités, la maintenance était délicate. Mais il ne faut pas, pour autant, s'inquiéter pour toutes les piscines.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR

Un constructeur cherche toujours à inventer des améliorations. Nous ne devons les mettre en pratique que si l'expérience montre que l'ancienne technologie est mauvaise.

DOCUMENTS DE REFERENCE**QUESTIONS/REPOSES (REUNION DE FINALISATION)**

POUBLANC :

TEGG a travaillé pendant trois ans sur la fuite de Gravelines, en particulier sur la vitesse de dégradation d'un béton au contact de l'acide borique.

POUBLANC :

Tu as insisté sur les raisons essentielles qui engendrent une maintenance accrue. Il s'agit principalement des malfaçons, mais il faut également citer certains systèmes particuliers, comme les lames d'étanchéité « Bonna ». En effet, indépendamment de leur réalisation, d'importants problèmes de corrosion se produiront à terme pour les sites en bord de mer.

Si de nouvelles tranches sont implantées en bord de mer, nous devons repenser le principe des « Bonna » tôles au sein des circuits de sûreté.

EEX27 - Dossiers de systèmes élémentaires pour le génie civil**INTRODUCTION / CONTEXTE**

Nous avons été sollicités pour faire des DSE (Dossiers de Systèmes Elémentaires). Il s'agit de gros livres prévus par systèmes.

Un système est constitué par un ensemble de matériels mécaniques et électriques, chargés de réaliser une fonction élémentaire. Ce peut être par exemple :

- ausculter une enceinte,
- amener de l'eau,
- ventiler,
- ...

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

Les DSE sont bien conçus. Ils présentent un plan intangible précisant les 9 chapitres qui doivent être pris en compte.

Ils sont très utiles pour tout système qui présente un fonctionnement, comme les pompes, ou les générateurs de vapeur.

Un DSE est prévu pour chaque bâtiment. Pour l'exploitant, c'est le seul moyen de les classer, afin de les retrouver rapidement en cas de besoin.

Nous avons commencé par un DSE concernant les massifs de groupe.

Au cours de la rédaction du document, nous n'avons pu remplir que très peu de chapitres. Par contre, des sous-chapitres concernant spécifiquement le génie civil n'étaient pas prévus. Le génie civil se calque mal sur la mécanique.

Finalement, le DSE concernant le génie civil a été abandonné.

Un DSE existe toutefois pour le système EAU (Enceintes AUscultation).

AVIS / COMMENTAIRE

Dans le nucléaire, le génie civil est mis au même rang que tout le reste. Or, il s'agit d'un domaine assez différent.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR

L'idée du DSE était excellente. L'exploitant a l'habitude de les utiliser.

Mais, il fallait nous laisser une certaine liberté dans l'établissement d'un plan propre au génie civil.

Il était, paraît-il, impossible de déroger au plan type. En conséquence, le document n'a pas été produit.

DOCUMENTS DE REFERENCE

QUESTIONS/REPOSES (REUNION DE FINALISATION)

Pas de remarque particulière des participants à la réunion de finalisation.

12/10/01

EEX28 – Ecaillage du béton hautes performances a Civaux 2INTRODUCTION / CONTEXTEOBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

Localement, au sommet de l'enceinte de Civaux 2, nous avons observé un écaillage sur quelques mètres carrés et une profondeur maximale de 14 centimètres.

Etant donné qu'il n'est pas aisé d'aller inspecter le haut de l'enceinte, le phénomène a été découvert par hasard. Assez longtemps après l'application de la précontrainte, un électricien a remarqué la chute d'un morceau de béton.

Etude des causes du phénomène observé

Nous avons tout d'abord relié le phénomène à la présence de gaines épaisses.

En effet, afin de réaliser un essai pour l'avenir, nous avons utilisé localement des câbles 55T15, pour lesquels les gaines font 16 centimètres de diamètre. L'enrobage de ces gaines représentait donc une quantité de béton importante, mal armée.

De plus dans la même zone, les étriers étaient principalement des étriers d'accrochage des consoles courtes. Ils remplaçaient les étriers ordinaires de partie courante de l'enceinte.

Le ferrailage de peau était donc mal ancré.

Sur une coupe verticale, l'écaillage de béton est partie en biseau sur un à deux mètres, jusqu'à la face libre du béton.

La profondeur maximale, 14 cm, apparaît à l'emplacement de l'un des câbles.

Nous avons donc vraiment l'impression d'une poussée au vide.

Plusieurs phénomènes ont participé conjointement à la cassure à cet endroit précis.

- 1 - Le BHP (Béton Hautes Performances) présentait une résistance à la traction peu supérieure à celle des anciens bétons.
- 2 - Le champ des contraintes est perturbé en face de la console du haut de l'enceinte.
- 3 - Autres, ...

Les avis sont encore partagés, y compris au SEPTEN.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ**AVIS / COMMENTAIRE**

Je pense que le phénomène est dû à la conjonction des problèmes cités au paragraphe précédent, et de petits défauts, qui ont fini par casser le béton sous l'effet de la traction.

Le béton était peut-être localement un peu moins bon. Je pense qu'il s'agit d'une poussée au vide du béton mal accroché au béton précontraint.

L'impression de poussée au vide a fait dire à certaines personnes qu'il s'agit d'un problème d'implantation de câble, ce dernier ayant poussé dans le mauvais sens.

Il faudrait vraiment une très grosse erreur pour qu'un câble 55T15 pousse dans le mauvais sens. Bien que cela ne soit pas totalement exclu, je n'y crois pas trop.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR**DOCUMENTS DE REFERENCE****QUESTIONS/REPNSES (REUNION DE FINALISATION)**

PICAUT :

Des phénomènes analogues sont assez connus sur les dômes.

Il s'agit, là aussi, de traction dans le sens radial.

LACROIX :

C'était à Cahéga.

COSTAZ :

A Bugey aussi.

PICAUT :

Et également aux Etats-Unis.

COSTAZ :

~~On n'a pas constaté de manifestations de ce phénomène sur un cylindre.~~
Nous n'avons pas encore constaté de manifestations de ce phénomène sur un cylindre.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

LACROIX :

Je crois beaucoup à la conjonction de deux des phénomènes cités dans la fiche.

1 - L'inflexion des isostatiques due à la console.

En effet, certaines poussent et tendent à évacuer le béton vers l'extérieur.

2 - La fragilité du BHP, surtout en décompression biaxiale.

Les courbes de résistance à la traction montrent une chute en fonction de la contrainte de compression. Nous ne nous sommes pas assez méfiés du fait qu'une compression biaxiale diminue la résistance à la rupture à la traction dans la troisième direction, par effet de Poisson et par décohesion.

Des imperfections mécaniques expliquent peut-être la localisation de la rupture.

COSTAZ :

En effet localement, la console double l'épaisseur, ce qui n'est pas rien.

PICAUT :

Certains épiphénomènes peuvent aussi être invoqués, comme des échauffements dus à l'ensoleillement.

LACROIX :

L'enceinte était abritée. J'avais également demandé son exposition géographique. Aucun de ces critères ne semblait significatif.

COSTAZ :

Je considère que cela aurait très bien pu ne pas casser.

Le phénomène n'est pas très grave, car il est resté superficiel. L'épreuve a ensuite montré que l'enceinte ne fuyait pas.

LACROIX :

Une réparation a-t-elle eu lieu ?

CHAUVEL :

Il y a actuellement une proposition de réparation.

COSTAZ :

Le béton étant comprimé, il faudrait réaliser la réparation en pression, sinon elle n'aura qu'un intérêt esthétique.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

POUBLANC :

Des auscultations non destructives ont montré des risques de lamellisation au-delà de la zone concernée.

LACROIX :

Cela sonne creux ?

POUBLANC :

C'est ce que j'ai compris.

COSTAZ :

Avec le fluage, il n'est pas exclu que le phénomène s'étende dans le temps.

TOURET :

Pour le futur, il est important que nous ayons changé le système de précontrainte. En effet, on nous demande maintenant de prouver que le problème a bien été pris en compte pour EPR.

COSTAZ :

L'enrobage de 16 centimètres autour des gaines de 16 était trop important. Nous devons tirer les 32 centimètres raccrochés au câble.

Des étriers plus solides auraient pu être utilisés, mais je pense qu'il aurait été préférable de :

- 1 - Rapprocher la gaine du bord.
- 2 - Faire attention aux étriers, surtout dans cette zone.
- 3 - Raccrocher en béton armé, en ne comptant pas trop sur le béton.

Il est également vrai que les gros câbles font apparaître des problèmes locaux.

Alors que tous les autres câbles étaient du type 37T15, il s'agissait ici de trois câbles 55T15. De plus, pour une question de commodité, ils ont été mis en tension trop tard.

LACROIX :

En effet, les vérins manquaient.

COSTAZ :

En conséquence, la précontrainte initiale n'était pas assez importante, alors qu'ensuite elle était trop forte.

L'ordre de mise en précontrainte n'était pas bon. Mais, il était pratiquement impossible de faire autrement.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

Dans le but de faire une démonstration pour l'avenir, nous avons presque démontré l'inverse. Pour les personnes extérieures au projet, les 55T15 paraissent moins bons que les câbles antérieurs.

Une technologie poussée, nécessite de la prudence.

EEX29 - Phénomènes thermiques dans le béton

INTRODUCTION / CONTEXTE

Les contraintes d'origine thermique naissent dans les zones soumises à des dilatations empêchées ou contrariées.

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

Dans un matériau homogène, les contraintes d'origine thermique sont globalement de la forme :

$$E * \alpha * \Delta T.$$

Pour le béton, si la variation de température (ΔT) est en général bien connue, le coefficient de dilatation (α) varie avec la température. Cette variation est surtout importante aux environs de 100 °C, à cause de la dessiccation du béton qui engendre un retrait important.

Par ailleurs, nous savons que le module d'Young (E) évolue dans le temps comme la résistance du matériau considéré, mais qu'il dépend aussi de la durée d'application de la charge (fluage).

Le module d'Young varie également en fonction de la température.

Il est évidemment impossible d'intégrer tous ces phénomènes physiques dans les calculs aux éléments finis. Ceux-ci ne prennent donc en compte que des valeurs moyennes des différents paramètres.

Nous concevons dès lors la très forte imprécision qui se dégage de ces calculs (voir chapitre « Limite des calculs aux éléments finis »).

Dans le domaine nucléaire, où il est malheureusement d'usage de toujours considérer des valeurs très pessimistes, les contraintes thermiques sont toujours nettement majorées.

De plus, le béton est susceptible de se fissurer sous l'action de contraintes de traction, thermiques et/ou mécaniques. Or, la fissuration libère partiellement la déformation, ce qui réduit d'autant les contraintes thermiques.

Enfin, ces contraintes sont considérées comme secondaires au sens du code ASME, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas dues à des actions extérieures comme c'est le cas pour les contraintes mécaniques.

AVIS / COMMENTAIRE

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

Dans le RCC-G, l'ensemble de ces considérations a conduit à utiliser des coefficients de pondération minorateurs, de 0,5 à 0,8.

Ceux-ci sont probablement encore insuffisants.

A contrario, il ne faut pas non plus négliger les contraintes thermiques qui soumettent la structure à des cycles journaliers dus aux différences de température entre le jour et la nuit.

Nous pouvons penser que la fissuration constatée sur certains réfrigérants atmosphériques est principalement due à ces cycles.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR**DOCUMENTS DE REFERENCE****QUESTIONS/REPONSES (REUNION DE FINALISATION)**

Pas de remarque particulière des participants à la réunion de finalisation.

EEX30 - Limite des calculs aux éléments finis

INTRODUCTION / CONTEXTE

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

Contraintes thermiques

Il est très difficile de représenter correctement les contraintes thermiques dans le béton, à l'aide des éléments finis (voir chapitre « Phénomènes thermiques dans le béton »).

Contraintes mécaniques

Pour du béton précontraint idéalisé, c'est-à-dire sans fissures, les éléments finis fournissent des résultats assez satisfaisants.

C'est en particulier le cas pour l'enceinte de confinement, malgré la légère fissuration constatée dans l'ensemble de l'ouvrage.

Il convient d'être plus circonspect pour les zones singulières, où la fissuration est plus importante, et les phénomènes de fluage et de retrait plus sensibles.

En particulier, autour de l'orifice de huit mètres de diamètre qui permet l'accès du matériel, les très nombreux calculs aux éléments finis réalisés dans le domaine non linéaire n'ont pas toujours permis d'approcher la réalité d'assez près.

Pour une structure en béton armé, par essence fissurée, les éléments finis ne peuvent fournir qu'une approche globale des déformations. Ils ne permettent généralement pas d'obtenir des renseignements suffisamment fiables pour définir les armatures passives.

C'est pourtant bien ce que nous faisons dans le domaine nucléaire, car seuls les calculs aux éléments finis sont bien considérés par l'Autorité de Sûreté.

Les calculs manuels, pourtant très utiles, sont souvent considérés comme insuffisants.

AVIS / COMMENTAIRE

Il faut reconnaître que les calculs aux éléments finis sont devenus indispensables, pour gérer le nombre impressionnant de combinaisons de cas de charge qui sont imposés par les règlements aux états limites.

Ces calculs sont donc utilisés également pour les coques de réfrigérants atmosphériques, pour lesquelles l'Autorité de Sûreté n'intervient pourtant pas.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

Dans le cas de Pont-sur-Sambre, qui est aujourd'hui démoli, de très nombreux calculs aux éléments finis, y compris dans le domaine non linéaire, ont tous conclu à la non-stabilité de la coque.

Or, celle-ci serait encore probablement debout, s'il n'avait pas été décidé de la faire disparaître du paysage.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR

DOCUMENTS DE REFERENCE

QUESTIONS/REPONSES (REUNION DE FINALISATION)

Pas de remarque particulière des participants à la réunion de finalisation.

EEX31 - Intérêt de travailler sur les analyses de betons anciens**INTRODUCTION / CONTEXTE**

Le béton est souvent allergique aux calculs scientifiques modernes (voir chapitres « Phénomènes thermiques dans le béton » et « Limite des calculs aux éléments finis »).

Cela est dû à la très grande complexité du matériau, qui est :

- évolutif dans le temps,
- fragile et, donc, toujours fissuré au sein d'un ouvrage,
- non linéaire (fluage, retrait, température).

L'examen du comportement réel des ouvrages, surtout anciens, présente donc un intérêt majeur.

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

L'auscultation systématique des principaux ouvrages de génie civil permet déjà à EDF de disposer de très nombreux renseignements.

Par ailleurs, la participation d'EDF à des projets nationaux tels que KRONOS (examen des causes principales de vieillissement des ouvrages), ou à des études particulières en liaison avec des laboratoires (poutres de l'INSA de Toulouse), permet également de progresser dans la connaissance du comportement réel des ouvrages.

AVIS / COMMENTAIRE

Encore faut-il exploiter suffisamment les renseignements obtenus, et ne pas seulement assurer une surveillance correcte de l'ouvrage en service.

RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR**DOCUMENTS DE REFERENCE****QUESTIONS/REPONSES (REUNION DE FINALISATION)**

réunion de Pas de remarque particulière des participants à la réunion de finalisation.

EEX32 - Bétons à Hautes Performances

INTRODUCTION / CONTEXTE

Deux projets nationaux ont été consacrés aux nouveaux Bétons à Hautes Performances (BHP) :

- Voies Nouvelles du Béton (B6b),
- BHP 2000 (B6b à B110).

OBSERVATION / CONSTATATION / FAIT TECHNIQUE

Le dernier projet, BHP 2000, se terminera en 2001. Les conclusions définitives ne pourront être tirées qu'à ce moment-là.

Néanmoins, certains points sont d'ores et déjà mis en lumière.

Durabilité

Il est maintenant admis par tous que la réduction du rapport eau / ciment, génératrice de hautes résistances, est également favorable à la durabilité, en raison de la plus grande compacité du béton, et de sa meilleure étanchéité.

Tenue au feu

La tenue au feu des BHP fait encore l'objet de controverses.

En effet, la plus grande étanchéité des BHP peut générer de fortes pressions internes de vapeur d'eau, susceptibles de dépasser la résistance à la traction.

Des essais sont en cours sur des colonnettes armées.

D'autres essais sont prévus sur des bétons additionnés de fibres de polypropylène. Ces fibres fondent à des températures assez basses, ce qui permet à la vapeur d'eau de s'échapper.

Point de vue des fournisseurs de Béton Prêt à l'Emploi

Si nous exceptons les très gros chantiers, comme ceux des centrales nucléaires, la quasi-totalité des bétons sont maintenant fabriqués dans des centrales de Bétons Prêts à l'Emploi (BPE), appartenant le plus souvent aux cimentiers ou aux fournisseurs de granulats.

Le discours des Directions Générales est toujours favorable au développement du BHP, mais les réactions des centrales de BPE sont très divergentes.

Il en résulte des différences de prix injustifiées, allant de 1,1 à 2 fois le prix du béton ordinaire.

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

Les principales raisons sont les suivantes :

- gêne dans la chaîne des bétons ordinaires, à cause d'un temps de malaxage plus long, et de la nécessité d'un silo supplémentaire pour la fumée de silice,
- fourniture de petits volumes, d'où un prix relatif important pour les essais d'étude et de convenance.

Ces raisons ont tendance à s'estomper lorsque la fourniture du BHP augmente.

Association du Béton à Hautes Performances avec des Armatures à Hautes Performances

Des essais de comportement en flexion et à l'effort tranchant ont montré la parfaite adéquation des BHP avec des armatures de 800 μ Pa.

Mais, il est difficile de se procurer de telles armatures.

Bétons à Très Hautes Performances et Bétons à Ultra Hautes Performances

Les Bétons à Très Hautes Performances (BTHP) possèdent une résistance caractéristique pouvant atteindre 110 μ Pa, alors que les Bétons à Ultra Hautes Performances (BUHP) atteignent et même dépassent 200 μ Pa.

Une différence importante existe entre ces deux types de bétons.

Bétons à Très Hautes Performances

Les BTHP sont étudiés au sein du projet national BHP 2000. Ils ne font qu'améliorer les caractéristiques des BHP, grâce à une réduction du rapport eau / ciment qui peut atteindre la valeur de 0,25, et à l'utilisation de très bonnes qualités de granulats et de ciments.

Bétons à Ultra Hautes Performances

Les BUHP font l'objet de brevets d'entreprises :

- BPR (Béton de Poudres Réactives) pour Bouygues,
- BSI (Béton Spécial Industriel) pour Quillery.

Ils utilisent des granulats artificiels et des fibres métalliques.

Les BUHP ont été utilisés dans la réparation des réfrigérants de Cattenom, et pour certains réfrigérants de Civaux.

AVIS / COMMENTAIRE

POUR LA RECOMMANDATION / CONCLUSION / SUGGESTION POUR LE FUTUR

Génie Civil et enceintes de confinement – Recueil d'expérience de M. COSTAZ

DOCUMENTS DE REFERENCE

QUESTIONS/REPOSES (REUNION DE FINALISATION)

Pas de remarque particulière des participants à la réunion de finalisation.