

19^e Edition des Journées scientifiques
du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton
(RF)²B

SIAME, Anglet, France
12 et 13 juillet 2018

PROBLEMATIQUES BETON EN LIEN AVEC DES CONDITIONS PARTICULIERES D'EXPOSITION ET DE REALISATION : EXEMPLES ISSUS DE L'INGENIERIE DES MATERIAUX EDF

M. Lion

EDF, Direction Industrielle, Département TEGG, Aix-en-Provence, France

RÉSUMÉ : Les ouvrages de production d'électricité peuvent être exposés à différents types de sollicitations (mécaniques, chimiques,...), que ce soit en situation opérationnelle ou accidentelle. Leur construction et leur maintenance peuvent aussi faire rencontrer des contraintes de réalisation impactant les aspects béton (formulation et mise en œuvre).

L'objet de cette communication est d'aborder ce type de problématique à travers trois exemples : le bétonnage de pièce massive en environnement subtropical (coulage de radier de bâtiment réacteur), le développement de bétons très spécifiques (bétons sacrificiels du récupérateur de corium de l'EPR Flamanville 3) et le bétonnage dans un contexte dosimétrique et sensible (renforcement des radiers de la centrale de Fessenheim).

1. INTRODUCTION

On peut considérer que la durabilité des bétons fait appel à trois notions : leur composition (qui doit être adaptée à leur exposition), la qualité du béton mis en place dans l'ouvrage (incluant la fabrication, le transport et la mise en œuvre) et enfin l'absence de développement de pathologie interne une fois mis en place (réaction alcali-granulat, réaction sulfatique interne,...). Certains ouvrages de production d'électricité peuvent subir des conditions particulières d'exposition, parmi lesquelles on peut citer : l'abrasion (évacuateurs de crue,...), les ambiances marines (ouvrages en bord de mer, éoliennes off-shore,...), les agressivités chimiques, les cycles gel-dégel (barrages,...), les températures élevées (situation opérationnelle ou accidentelle), les chocs, la fatigue (mats d'éoliennes,...). Concernant les conditions particulières de réalisation, les exemples suivants peuvent être mentionnés : les bétonnages de masse (tables de groupe, radiers, barrages), les bétonnages sous eau (scelllements en mer,...), les difficultés d'accès (ferraillage dense, géométries particulières, dénivelés importants,...), des ressources locales limitées (ciments, granulats,...), des sites isolés (éloignement des fournisseurs), l'environnement (temps chaud ou temps froid, contexte dosimétrique). Des conditions jugées particulièrement sévères peuvent alors découler d'une exposition donnée ayant un niveau de sévérité très élevé ou d'une contrainte de réalisation ayant un niveau de complexité très élevé. Le cumul de contraintes d'exposition et de réalisation, même moins sévères individuellement, peut également aboutir à des conditions particulières (exemple : bétonnage d'une pièce massive d'un ouvrage hydraulique exposée à des eaux agressives et des cycles gel/dégel sur un site isolé).

2. BETONNAGE DE RADIER DE BATIMENT REACTEUR EN ENVIRONNEMENT SUBTROPICAL

Un bétonnage en grand volume présente certains avantages (gain de temps, réalisation d'une structure monolithique minimisant les reprises de bétonnage). Mais cela comporte aussi certains risques qui doivent être appréhendés afin d'assurer la durabilité des ouvrages : fissuration thermique, réaction sulfatique interne, rupture de la chaîne logistique, problématiques de mise en œuvre des bétons (DPU, temps de revibrabilité). Le radier du bâtiment réacteur de l'EPR (European Pressurized Reactor) a un diamètre de 55,60 m et une épaisseur de l'ordre de 4 m, pour un volume de 9100 m³.

L'exemple considéré est le coulage en une phase du radier dans un environnement subtropical, ce qui a nécessité de maîtriser en particulier le comportement thermique. Le béton qui compose le radier est un C40/50. Un des enjeux principaux a concerné la prévention des risques de fissuration thermique et de réaction sulfatique interne. L'enjeu primordial a alors consisté à optimiser la formule de béton et les procédés de fabrication-transport-mise en œuvre de manière à limiter et maîtriser les dégagements de chaleur. L'optimisation de la formule béton a compris l'étude de différentes compositions de liant intégrant du ciment Portland ordinaire, des cendres volantes et des laitiers de haut-fourneau. Des essais ont été réalisés dans cette optique au sein du laboratoire béton du département TEGG. La figure 1 illustre des résultats de chaleur d'hydratation et de résistance mécanique obtenus avec différentes proportions de cendre volante et de laitier de haut-fourneau (essais sur mortiers).

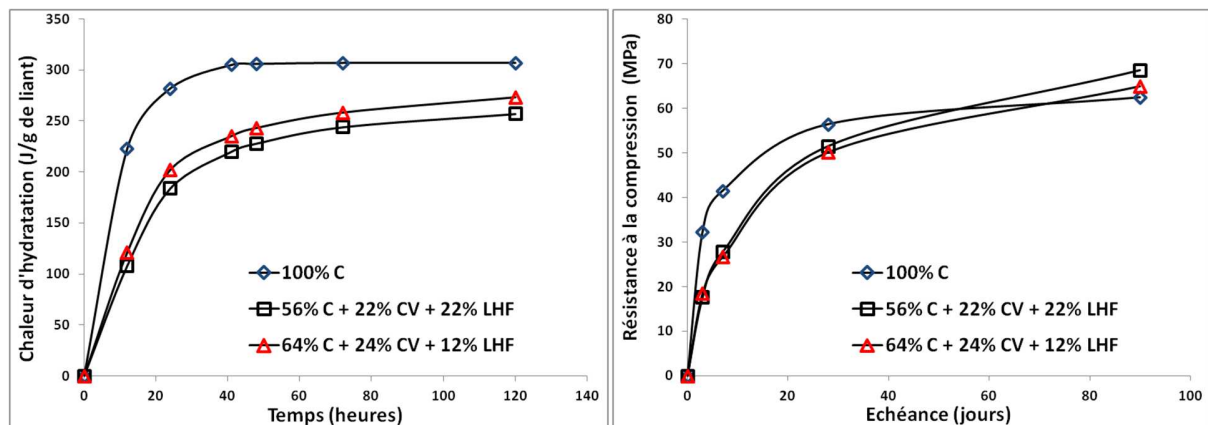


Figure 1. Chaleur d'hydratation (à gauche) et résistances à la compression (à droite) sur mortiers avec différentes compositions de liant (C : ciment, CV : cendre volante, LHF : laitier de haut-fourneau).

On voit que la substitution d'une partie du ciment par des cendres volantes et des laitiers de haut-fourneau, dans les proportions étudiées, permettent de réduire la chaleur d'hydratation (réduction de 70-80 J/g à 41 h et de 40-50 J/g à 120 h par rapport au ciment seul), tout en maintenant des résistances satisfaisantes à 28 j (perte de l'ordre de l'ordre de 5 MPa – récupérée à échéance plus tardive). L'ensemble des essais de laboratoire ont permis d'orienter le choix de formules de béton retenues pour la réalisation de maquettes représentatives (figure 2). Au total, 5 maquettes ont été réalisées sur site avec des formules de béton comportant certaines différences (composition et teneur en liant...).

Les résultats issus de ces maquettes ont permis en outre à EDF de réaliser des simulations thermiques dans le but d'affiner les pistes d'optimisation des formules béton (optimisation de la teneur en liant couplée à une optimisation du squelette granulaire,...). La figure 3 montre l'exemple d'une courbe de chaleur d'hydratation approximée par recalage sur les mesures relevées, en vue de l'alimentation des outils de modélisation en données d'entrée.

Au final, la formule retenue comprend un liant composé à 61 % de ciment Portland Ordinaire, 26 % de cendre volante et 13 % de laitier de haut-fourneau, dosé à 390 kg/m³. Ce choix implique des considérations liées à d'autres aspects que la thermique des bétons, en particulier le besoin d'assurer

l'obtention des résistances minimales requises ainsi que la pompabilité des bétons. Des essais performance RSI (ME LPC 66) sur béton ont été réalisés pour pallier un dépassement de la température maximale au-delà de 65°C. L'ensemble des essais réalisés à 70 et 75°C se sont révélés concluants (déformations < 0,04 % à 12 mois).



Figure 2. Photographies de maquettes représentatives réalisées sur site.

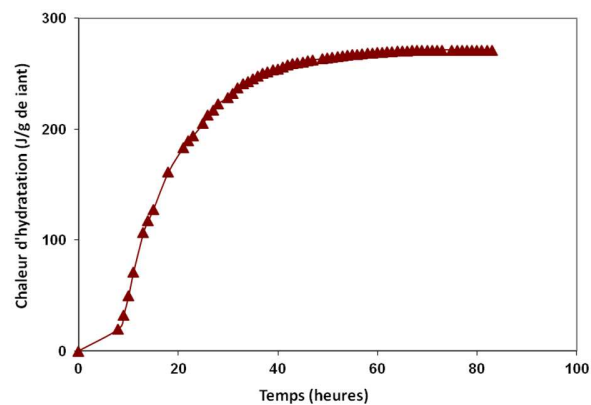


Figure 3. Exemple de courbe de chaleur d'hydratation approximée à partir d'une maquette.

Pour garantir le bétonnage en continu des 9100 m³ du radier de bâtiment réacteur dans des conditions thermiques maîtrisées, l'Entreprise a prévu, comme l'illustrent également les figures 4 et 5, les dispositions suivantes :

- 4 centrales à béton sur le site ayant une capacité nominale de 4 x 90 m³/h (360 m³/h)
- 2 installations de production d'eau réfrigérée (4°C) de 35 t/h pour le gâchage des bétons
- 2 usines à glace de 2 x 100 t/j pour le gâchage des bétons (70 kg de glace par m³ de béton)
- 1 stockage de glace de 159 t
- Stockage des granulats à l'abri des intempéries et des rayons du soleil (ombrières)
- Utilisation de 28 bétonnières portées (toupies) de 6,75 m³ de béton isolées du soleil
- 24 camions en service (2 rotations par heure) et 4 camions en réserve
- Un réseau de conduits de béton refroidis et protégés du soleil
- 12 mats de bétonnage dont 10 équipés avec des bras articulés télescopiques
- 10 pompes à béton (capacité nominale de chacune: 25 m³/h)
- 2 pompes mobiles additionnelles équipées d'un bras articulé (une en service et une en réserve)
- Cheminées de bétonnage pré-installées sur une maille de 2 m x 2 m
- 1 accès temporaire au 1^{er} niveau des nappes de ferrailage
- 2 accès temporaires au 2^{ème} niveau des nappes de ferrailage
- Système de mesure de la température: 98 sondes installées (système provisoire) et 18 thermocouples (système définitif d'auscultation)



Figure 4. Systèmes de refroidissement et d'isolation pour le transport des bétons.



Figure 5. Ombrières pour granulats.

Pour éviter la fissuration thermique, l'entreprise a pris des dispositions pour effectuer une cure humide et thermique optimisée du béton (figure 6), parmi lesquelles on peut citer :

- Surface du béton constamment maintenue humide
- Cure sous une structure légère protégeant de la pluie et du soleil
- Contrôle de la température pendant la cure (utilisation de lampes à tungstène-iode et le béton est recouvert de couvertures textiles et plastiques)
- Différence de température entre le cœur et la peau (10 cm de la surface) inférieure à 25 °C



Figure 6. Structure destinée à la cure humide et thermique.

Au final, le bilan du bétonnage est le suivant :

- Durée du bétonnage: 3,5 jours (86 h)
- 8 mats ont été utilisés simultanément
- Cadence de bétonnage : 105 m³/h
- Température moyenne ambiante pendant le bétonnage : 26,3 °C (69 mesures)
- Température moyenne du béton frais à la sortie de la centrale : 16,6 °C (183 mesures)
- Température moyenne du béton frais mis en œuvre : 20,6 °C (154 mesures)
- Température maximale atteinte 3 à 6 jours après la fin du bétonnage
- Température maximale à cœur du béton : 68,4 °C (moyenne sans les 2 mini et les 2 maxi)
- Élévation de température : 47,8 °C (maquette: 48,2 °C)
- Cure pendant 1 mois complet
- Arrêt de la cure lorsque la température à cœur est passée sous 50 °C
- Diminution maximale de la température de peau du béton de 3,9 °C par jour
- Relevé à l'issue de la cure : 1 seule fissure non nocive de 0,125 mm

3. MISE AU POINT DES BETONS SACRIFICIELS POUR LE RECUPERATEUR DE CORIUM DE L'EPR FLAMANVILLE 3

Le dispositif est destiné à la récupération du corium dans le cas hypothétique où se produirait une fusion du cœur (Journeau, 2008). Il s'agit d'un dispositif de sureté spécifique à l'EPR conçu par AREVA.

Le concept de récupérateur de corium fait intervenir deux bétons sacrificiels (Figure 7) : un béton sacrificiel ferro-siliceux au niveau du puits de cuve et un béton sacrificiel siliceux au niveau de l'aire d'étalement (170 m²). Les principales fonctions du béton sacrificiel ferro-siliceux, en cas d'interaction avec le corium (mélange de cœur et de cuve fondus) sont les suivantes :

- Exercer une rétention temporaire du corium afin d'homogénéiser le mélange corium-béton et permettre son écoulement au sein de l'aire d'étalement en une seule coulée
- Oxyder les composants hautement réactifs du corium, notamment l'uranium et le zirconium provenant des éléments combustibles et de leurs gaines
- Réduire la température du corium
- Limiter l'augmentation de la pression dans l'enceinte par la maîtrise des gaz issus (H₂ et CO₂),
- Optimiser les caractéristiques du mélange corium-béton pour favoriser son écoulement au niveau de l'aire d'étalement

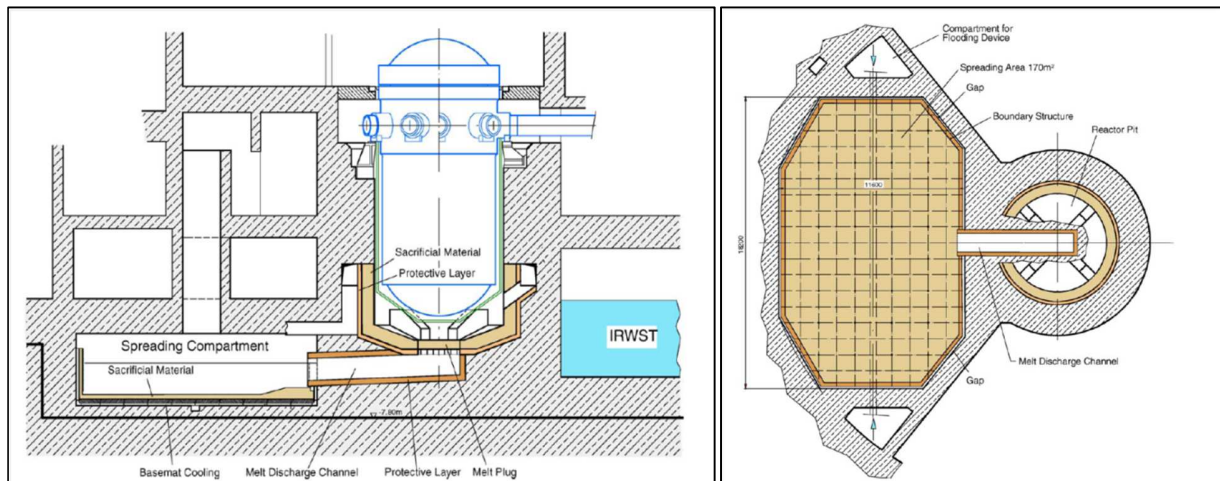


Figure 7. Schémas du récupérateur de corium EPR (Fischer, 2004).

L'ensemble de ces considérations a amené les concepteurs à aboutir à la définition d'un béton sacrificiel ferro-siliceux ayant une composition chimique ciblée (Nie, 2005) comme l'illustre le tableau 1. C'est sur

cette base que des prescriptions ont ensuite été retranscrites pour chacun des constituants en termes de composition chimique et de dosage, de manière à appréhender le développement industriel de ces bétons.

Component	wt%
Fe ₂ O ₃	35.3
SiO ₂	42.9
Al ₂ O ₃	3.8
CaO	11.1
MgO	0.2
CO ₂	1.7
H ₂ O	5

Tableau 1. Exemple de composition chimique du béton ferro-siliceux obtenue en étude de conception (Nie, 2005).

Le principe de formulation des bétons sacrificiels retenu par EDF, en charge de leur développement industriel pour le projet EPR Flamanville 3, s'est principalement appuyé sur les données d'entrée indiquées dans le tableau 2. Le tableau comprend des données d'entrée relatives aux aspects « accident grave » (prescriptions sur la chimie des constituants par exemple) ainsi que celles liées aux aspects « génie civil » (classes de résistance et d'exposition, prévention RAG/RSI, épreuves d'étude,...).

Béton sacrificiel ferro-siliceux	Béton sacrificiel siliceux
Données d'entrée « Accident Grave »	
Composition massique du squelette solide imposée (répartition ciment, fraction hématite et siliceuse)	Composition massique du squelette solide imposée (répartition ciment, fraction siliceuse)
Fraction hématite riche en Fe ₂ O ₃ Fraction siliceuse riche en SiO ₂	Fraction siliceuse riche en SiO ₂
Courbe granulométrique cible 0/8 mm pour chaque fraction (hématite et siliceuse)	Courbe granulométrique cible 0/8 mm pour la fraction siliceuse
Plage de masse volumique acceptable Choix d'utiliser un entraineur d'air	Plage de masse volumique acceptable
Limitation de H ₂ O dans le béton vis-à-vis des risques liés à la libération de gaz	
Données d'entrée « Génie Civil »	
C40/50 XS1	
Pompabilité, DPU 90 minutes	
Épreuves de validité (constituants, bétons, nominales et dérivées, prévention RAG,...)	
Mesures de prévention vis-à-vis du risque RSI et d'éclatement thermique : essais performance RSI à 80°C, adjonction de fibres en polypropylène, essais de tenue à la température	Adjonction de fibres en polypropylène, essais de tenue à la température

Tableau 2. Principales données d'entrée pour la formulation des bétons sacrificiels.

Les études de formulation ont nécessité la réalisation de nombreuses gâchées (environ 100 gâchées béton) et de nombreux essais. La figure 8 illustre certains constituants, bétons et essais. Certains résultats de résistance à la compression et de porosité accessible à l'eau, issus des gâchées d'études définitives, sont fournis dans le tableau 3. La figure 9 présente des résultats de consistance à T0 obtenus pour les formules nominales et dérivées du béton siliceux. Ces résultats illustrent ce qui est particulièrement recherché au niveau de la consistance - en plus de son maintien dans le temps - à savoir une fluctuation limitée et maîtrisée même en cas de variation de dosages pénalisante. Pour le béton sacrificiel ferro-siliceux, qui intègre un entraineur d'air, la robustesse à l'état frais a de plus été vérifiée en testant ce béton à différentes températures (5, 20 et 30°C) comme le montre la figure 9.



Figure 8. Photographies de constituants et bétons sacrificiels.

CARACTERISTIQUES DES BETONS SACRIFICIELS	Formules dérivées (+/- 2 %)		Formule nominale
	DS (Dérivées Solides)	DL (Dérivées Liquides)	
CARACTERISTIQUES DU BETON FERRO-SILICEUX			
Résistance à la compression à 28 jours	84,5 MPa	79,0 MPa	76,5 MPa
Porosité à l'eau (après 28j)	9,2 %	11,2 %	10,7 %
CARACTERISTIQUES DU BETON SILICEUX			
Résistance à la compression à 28 jours	82,5 MPa	77,5 MPa	79,0 MPa
Porosité à l'eau (après 28j)	7,8 %	9,7 %	8,7 %

Tableau 3. Résistances à la compression et porosités à l'eau mesurées en épreuve d'étude.

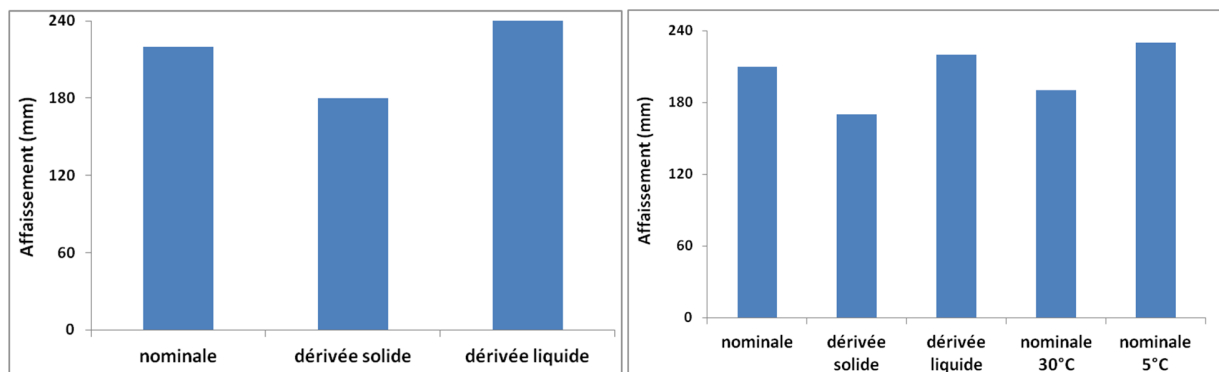


Figure 9. Affaissement à T0 des bétons sacrificiels (béton siliceux à gauche, béton ferro-siliceux à droite).

La durabilité des bétons sacrificiels revêt un caractère d'autant plus important qu'il s'agit de structures dont l'accessibilité est délicate (impactant les opérations de maintenance) une fois la mise en service industrielle de la centrale établie (contexte dosimétrique), en particulier pour la partie puits de cuve.

Dans ce contexte, le choix d'intégrer de la fumée de la silice dans la composition des bétons sacrificiels va dans le sens de l'obtention de bétons durables. Les propriétés obtenues pour ces bétons (résistances à la compression de l'ordre de 80 MPa, porosités accessibles à l'eau de l'ordre de 10% et moins) sont en effet représentatives de bétons à haute performance bénéficiant d'un potentiel de durabilité élevé (AFGC, 2004).

Au-delà ces considérations, on peut mentionner 4 items qui ont de plus été spécifiquement appréhendés :

- Prévention vis-à-vis de la réaction alcali-granulat : usage d'un ciment très peu alcalin ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ actifs de l'ordre de 0,2-0,3 %), qualification NR (Non Réactif) du squelette granulaire à l'essai crible autoclave sur mortier, présence de fumée de silice (capacités inhibitrices)
- Prévention vis-à-vis de la réaction sulfatique interne : usage d'un ciment peu exothermique pauvre en C_3A , réalisation d'essais performance concluants à 80°C avec plusieurs configurations de cycles thermiques (au jeune âge, à l'état durci, au jeune âge et à l'état durci), présence de fumée de silice (capacités inhibitrices)
- Prévention vis-à-vis du risque d'éclatement thermique : présence de 2 kg/m³ de fibres en polypropylène, réalisation d'essais de tenue à l'éclatement thermique en laboratoire (essais à 550°C et 1000°C sur éprouvettes initialement saturées en eau). Ces essais ont été initiateurs de la démarche de développement d'une méthode interne d'évaluation de la propension des bétons à éclater sous température élevée décrite dans la communication dédiée (Lion, 2017)
- Limitation H_2O vis-à-vis des risques liés à la libération de gaz (surpressions induites,...) : limitation autant que possible de la quantité d'eau introduite dans la composition des bétons, développement en collaboration avec EDF R&D (Sanahuja et al., 2017) d'une méthode destinée à modéliser le séchage d'ouvrage en béton soumis à différentes ambiances environnementales

Au final, l'ensemble des études menées en laboratoire sur les bétons sacrificiels ont permis d'orienter les phases de qualification qui ont suivi (épreuves de faisabilité et de convenance sur site), à travers la définition des configurations d'essais, des contrôles et des critères associés. Ces phases ont alors permis de préparer les opérations effectives de bétonnage des bétons sacrificiels qui se sont déroulées avec succès à leur issue.

4. RENFORCEMENT DU RADIER DE LA CENTRALE DE FESSENHEIM

En 2011, l'Autorité de Sûreté Nucléaire a établi une prescription dédiée à la centrale de Fessenheim selon laquelle le Bâtiment Réacteur doit être renforcé afin d'augmenter très fortement sa résistance au corium en cas d'Accident Grave avec percement de la cuve. Cette prescription est relative au fait que le radier de la centrale de Fessenheim est moins épais que celui des autres centrales du parc EDF. Le principe de renforcement retenu par EDF consiste à créer une zone de collecte de grande surface dans un matériau présentant des caractéristiques de résistance au corium les plus performantes (figure 10). La modification proposée consiste à épaissir le radier dans le local « puits de cuve » et permettre en cas d'accident grave avec percement de la cuve, via un tunnel ménagé à cet effet, un étalement du corium sur le radier du réacteur dans une zone de collecte (incluant un local adjacent) et ainsi significativement plus importante que le puits de cuve seul (la zone complémentaire est également épaissie).

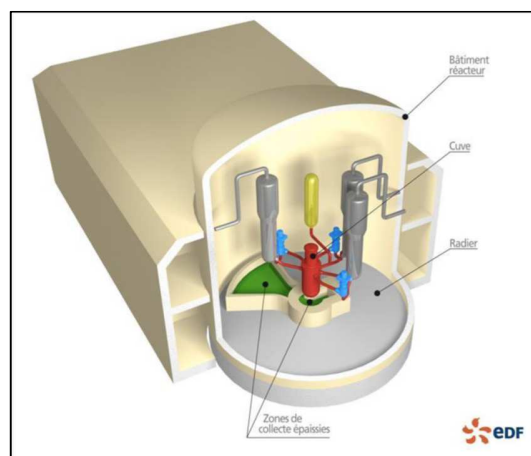


Figure 10. Schéma de la modification visant à renforcer le radier de la centrale de Fessenheim.

Comme dans le cas des bétons sacrificiels, la formulation du béton utilisé pour l'épaississement du radier doit appréhender certains aspects particuliers : une composition chimique précise (proportions en CaO en SiO₂ dans ce cas) dans le but de reproduire celle des bétons environnants et ainsi assurer une homogénéité du comportement en cas d'accident grave, la prévention des risques RAG/RSI et d'éclatement thermique (essais de tenue en température, adjonction de fibres en polypropylène) et la réalisation d'épreuves d'étude approfondies.

La grande spécificité de l'opération de bétonnage réside cependant dans les conditions particulières de réalisation, en particulier pour l'épaississement en local puits de cuve. En effet, le contexte dosimétrique nécessite une optimisation de la dosimétrie globale de l'intervention qui passe par une réduction au minimum des durées d'intervention dans cette zone et une parfaite maîtrise de la gestuelle des opérateurs en puits de cuve. De plus, la présence de matériel ne devant pas subir d'endommagement (tubes RIC et voies de protection des sondes) rend la sensibilité de l'opération accrue.

L'ensemble de ces considérations a nécessité la formulation de béton auto-plaçant avec des propriétés rhéologiques ciblées. Les principales caractéristiques du béton à l'état frais sont synthétisées dans le tableau ci-après.

Étalement	700 - 730 mm à T0 670 - 720 mm à T90
V-funnel	4 – 5 s à T0 6 – 8 s à T90
L-box (2 barres)	0,95 - 1,00 à T0 0,85 – 1,00 à T90
T500	~ 2 s à T0 ~ 2 – 3 s à T90

Tableau 4. Caractéristiques principales du béton auto-plaçant à l'état frais.

De nombreuses maquettes et plots d'essais ont été réalisés (figures 11 et 12) en amont du coulage sur site dans le but de vérifier la pompabilité du béton, vérifier le bon remplissage entre les voies de protection des sondes, améliorer le process de fabrication (usage de premix sur une centrale mobile, dispositifs de chauffage et de refroidissement de l'eau, dosage pondéral des adjuvants), améliorer les méthodes de bétonnage (nombre et déplacement des points de chute) et effectuer des répétitions à blanc pour les opérateurs. L'ensemble de ces actions ont permis d'assurer la réussite de l'opération de renforcement du radier de la centrale de Fessenheim.



Figure 11. Maquettes de remplissage des voies de protection des sondes.

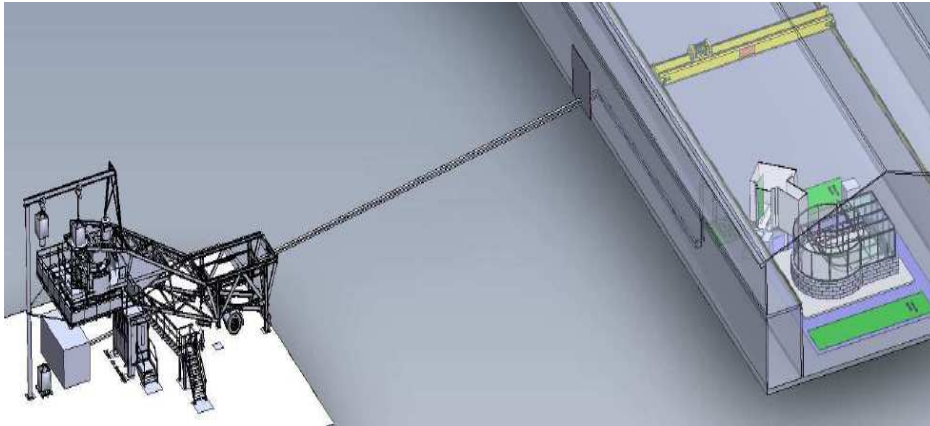


Figure 12. Maquette de bétonnage en puits de cuve.

5. CONCLUSIONS

Cette communication a retracé quelques exemples de problématiques béton en lien avec des conditions particulières d'exposition ou de réalisation. Ces exemples issus de l'ingénierie des matériaux du groupe EDF ont focalisé sur des aspects « travaux » à travers le développement de formules de béton et de méthodes de réalisation spécifiques. Ils montrent toute l'importance de l'anticipation et de la préparation, nécessaires à la réussite de projets complexes. Ces exemples montrent en outre que ces problématiques peuvent être source d'innovations (développement d'essais, d'outils de modélisation, de méthodes de réalisation...).

Remerciements

Les études présentées ont pu être menées à bien grâce au laboratoire béton de TEGG, en particulier Guillaume Zammout, Filipe Teixeira, Pierre Lacheney et Mathieu Chesnel. Des remerciements sont également adressés aux interlocuteurs des entités directement en charge des projets concernés : Eric Leduc, Jean-Sébastien Vaast, Philippe Convert, Serge Hugonnard-Bruyère et Frédéric Roy (bétonnage de radier de bâtiment réacteur), Pascal Bélécard, Raphael Dehandschoewercker et Gauthier Dimnet (bétons sacrificiels EPR Flamanville 3), Magali Claudel, Bertrand Perracino et François Lecornez (renforcement du radier de la centrale de Fessenheim).

6. REFERENCES

- Nie M., Temporary Melt Retention in the Reactor Pit of the European Pressurized Water Reactor (EPR), Mémoire de l'université de Stuttgart, 2005.
- Fisher M., The severe accident mitigation concept and the design measures for core melt retention of the European Pressurized Reactor (EPR), *Nuclear and Engineering Design*, 230: 169-180, 2004.
- Journeau C., Contribution des essais en matériaux prototypes sur la plate-forme Plinius à l'étude des accidents graves de réacteurs nucléaires, Mémoire HDR, Université d'Orléans, 2008.
- AFGC, Conception des bétons pour une donnée de vie données des ouvrages Maitrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction - Etat de l'art et Guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité, *Guide technique AFGC*, 2004.
- Lion M., Exposure of high performance concretes at high temperature : residual mechanical properties and thermal spalling, *Congrès Français de Mécanique*, 2017.
- Sanahuja J. et Lion M., Modélisation à partir d'essais sur éprouvettes de la teneur en eau résiduelle d'une structure béton exposée à plusieurs ambiances environnementales, *Congrès Français de Mécanique*, 2017.