

**ÉTANDEX**



# Bétons sujets à la RSI : apport des Systèmes d'Étanchéité Liquide PU Projetés à Chaud

---

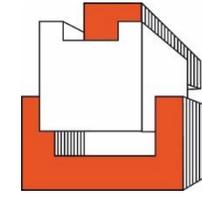
**Benjamin ROBRIQUET**

Responsable Etudes & Commercial Secteur Infrastructure/Transport

Tel. +33 (0)1 69 33 62 00 | Mob. +33 (0)7 62 57 61 24

Mail. [benjamin.robriquet@etandex.fr](mailto:benjamin.robriquet@etandex.fr) | w. [www.etandex.fr](http://www.etandex.fr)

2 Avenue du Pacifique, 91940 Les Ulis



ÉTANDEX



# Généralités sur la RSI

---

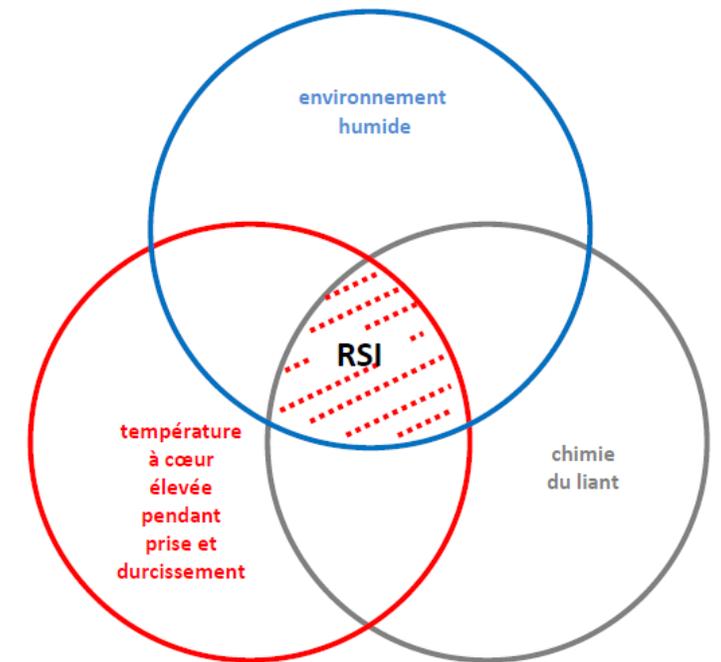
# RSI : qu'est ce que c'est ?

RSI : Réaction Sulfatique Interne

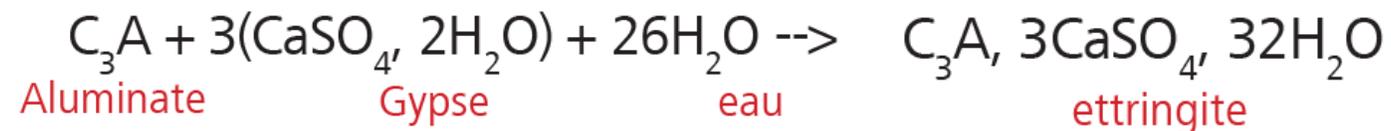
→ Formation différée d'ettringite dans un matériau cimentaire durci

Principales causes :

- Elévation de la température d'un béton de jeune âge ( $T > 65^{\circ}\text{C}$ )
- Constituants de l'ettringite (aluminat, sulfate, calcium, eau)
- Les alcalins
- Conditions de mise en œuvre (environnement humide, température)



Zone de risque pour la RSI



# Les ouvrages concernés

---

- Pièces préfabriquées en béton avec traitement par étuvage
  - Process d'augmentation de la température pour gain de productivité (Exemple : Traverses en béton)
- Pièces massives avec béton coulé en place
  - Piles/chevêtre de pont/Culées



# Historique de la RSI

---

1987 – 1<sup>er</sup> cas identifié en préfabrication

- Traverse de chemin de fer en Finlande (Tepponon et Eriksson)

1996 – 1<sup>er</sup> cas des bétons coulés en place

- Fondation de pylônes de lignes électriques aux USA (Hime)

1997 – 1<sup>er</sup> cas en France

- Chevêtre sur pile – Pont d'Ondes

2007 – Environ 30 ouvrages en France (source LCPC)

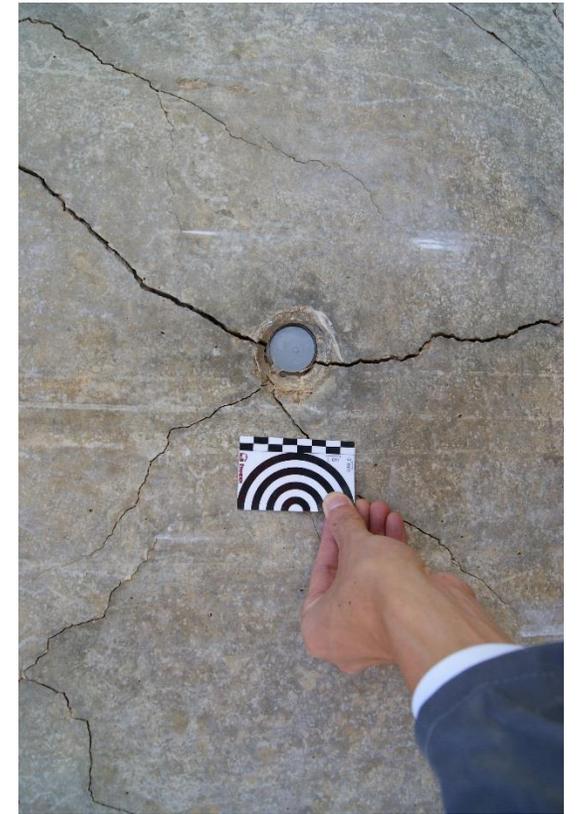
2012 – Environ 120 ouvrages en France (source Ifsttar)

Fondations, piles, chevêtres, poutres préfabriquées

Manifestation des désordres au bout de 5 à 20 ans

# Conséquences

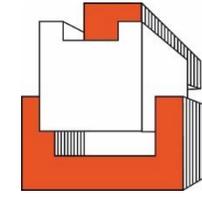
- Ettringite de formation différée
  - Phénomène de gonflement évolutif
  - Phénomène irréversible de fissures



# Recommandations préalables pour éviter la RSI

---

- Structures coulées en place :
  - Eviter des rythmes de construction soutenus au détriment de la durabilité des structures
  - Optimisation multicritères du choix du ciment et de la formulation du béton (éviter CEM I 52,5 R dans une pièce massive)
  - Eviter le coulage de pièces massives lors des fortes chaleurs si aucune disposition pour limiter l'échauffement
- Structures constituées de produits préfabriqués :
  - Eviter des Tmax élevées avec des durées de palier longues



**ÉTANDEX**



# Le Diagnostic

---

# Diagnostic de l'ouvrage

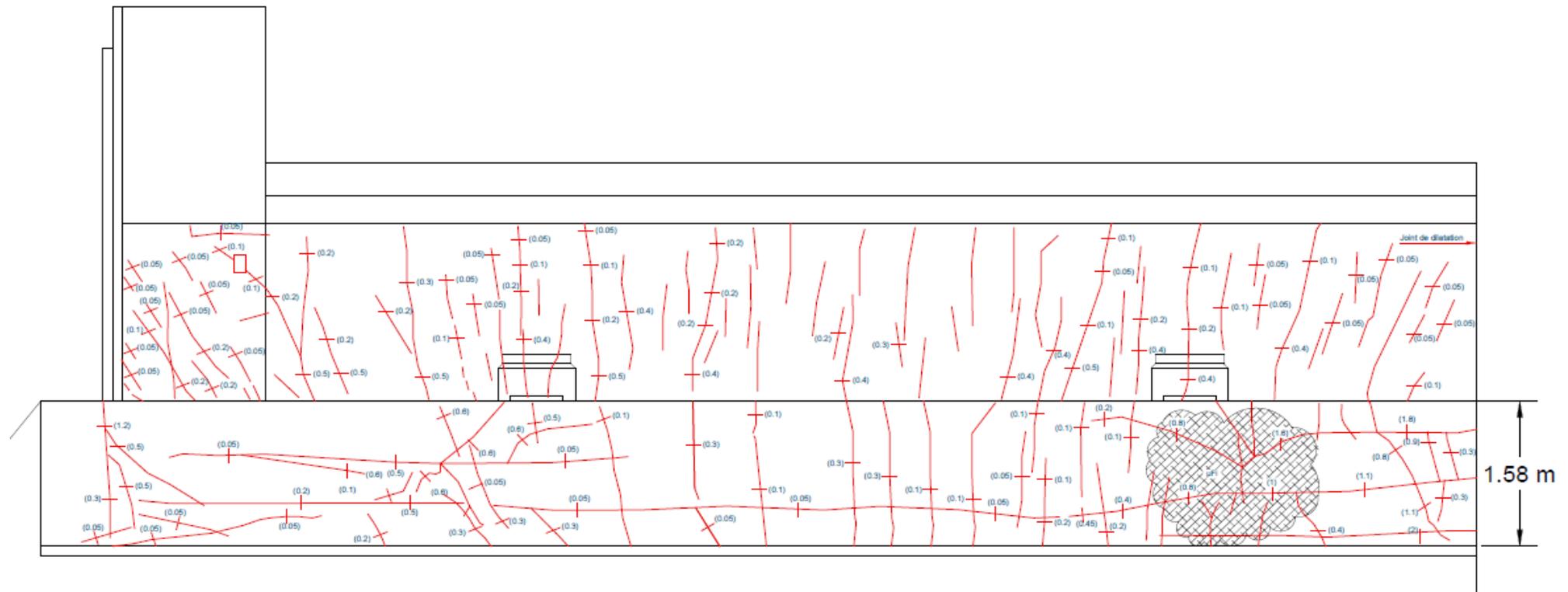
---

- Fiches suivi de l'ouvrage (relevé des fissures)
- Instrumentation (distancemètre, extensomètre, température, hygrométrie...)
- Prélèvement et essais en laboratoire
- Etude du potentiel de gonflement
- Modélisation prédictive



# Diagnostic de l'ouvrage

- Fiches suivi de l'ouvrage (relevé des fissures)



# Diagnostic de l'ouvrage

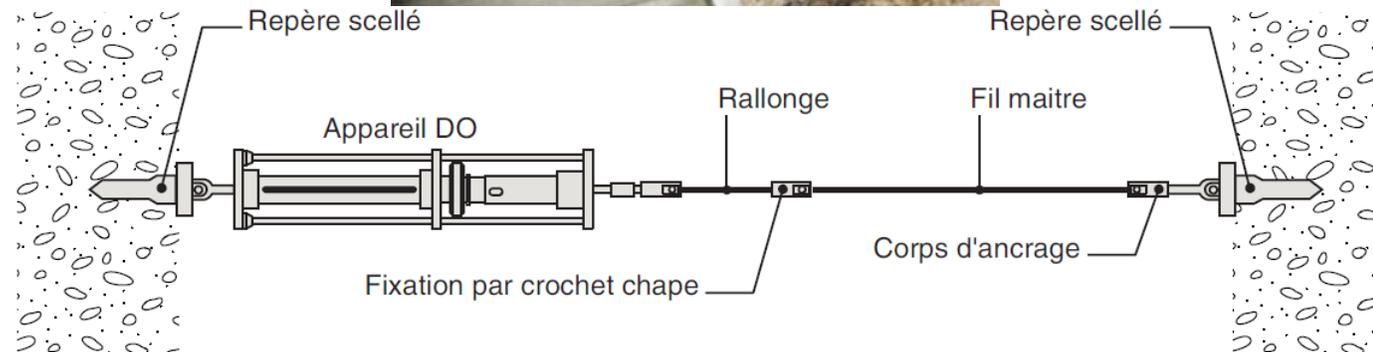
- Indice de fissuration suivant ME47 LCPC  
→ Somme des fissures ( $>0,05\text{mm}$ ) et de leurs ouvertures interceptées par les 4 axes rapportée à 1m



Échelle de caractérisation de la fissuration d'un parement par l'Indice de Fissuration	
Valeur IF .....	Importance de la fissuration
0 à 0,5	négligeable
0,5 à 1	faible
1 à 2	modérée
2 à 5	forte
5 à 10	très forte
> 10	considérable

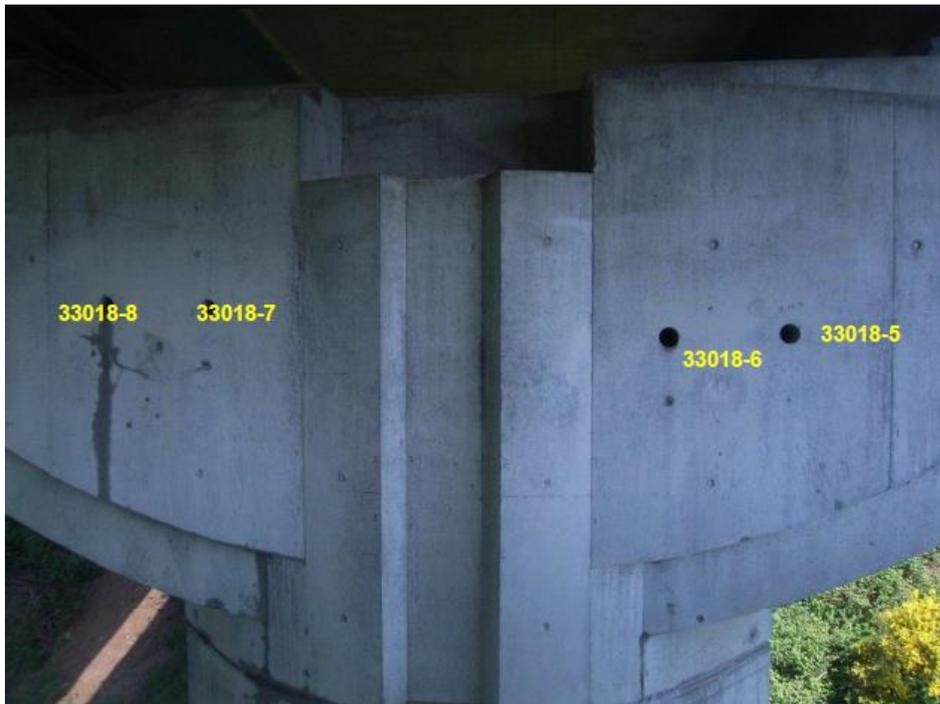
# Diagnostic de l'ouvrage

- Instrumentation (distancemètre, extensomètre, température, hygrométrie...)



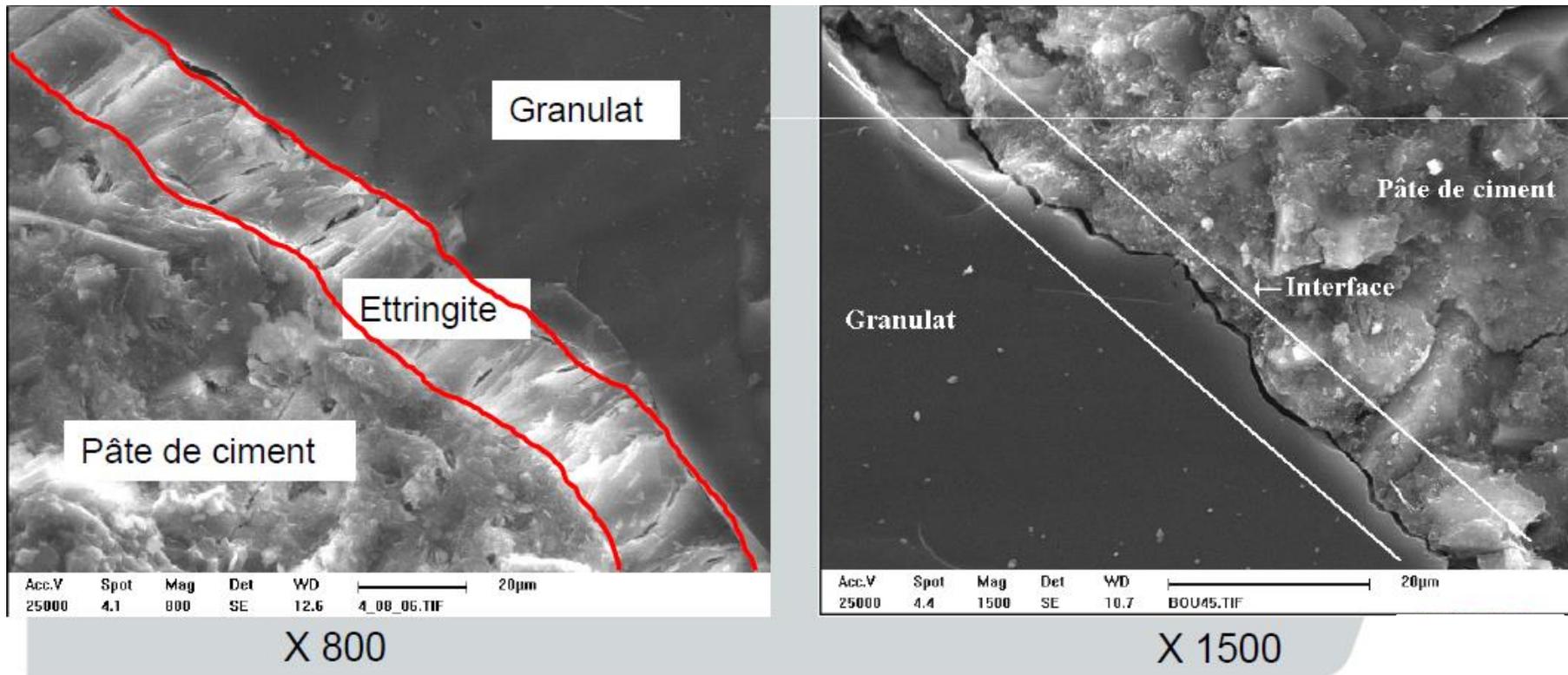
# Diagnostic de l'ouvrage

- Prélèvement et essais en laboratoire



# Diagnostic de l'ouvrage

- Prélèvement et essais en laboratoire (microscope à balayage)



# Diagnostic de l'ouvrage

- Essai d'expansion résiduelle longitudinale (ME 67 LCPC)
  - Immersion de l'éprouvette et mesure de son expansion
  - Tous les 15 jours, puis tous les mois (pendant 1 an)

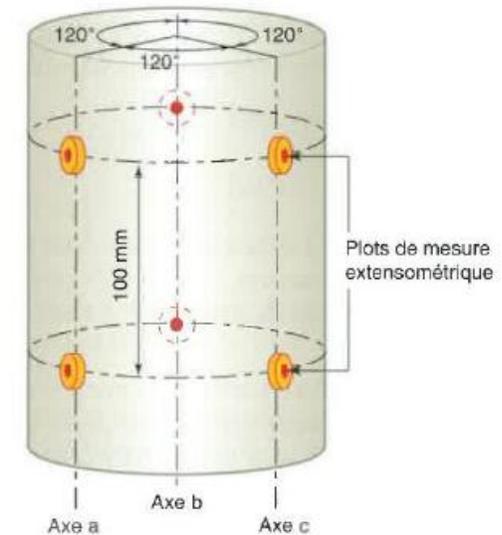
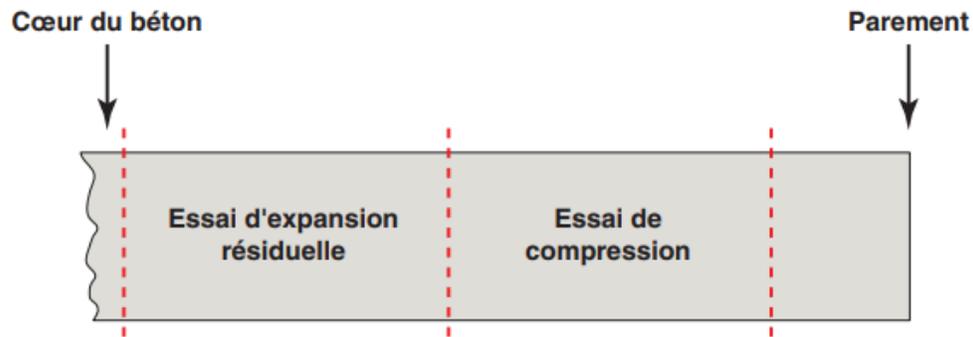


Fig. 40 : Principe d'instrumentation de chaque éprouvette

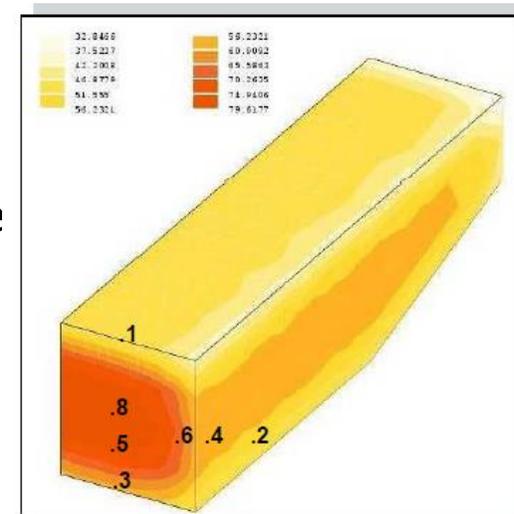
# Diagnostic de l'ouvrage

- Modélisation prédictive et calcul de l'histoire thermique du béton

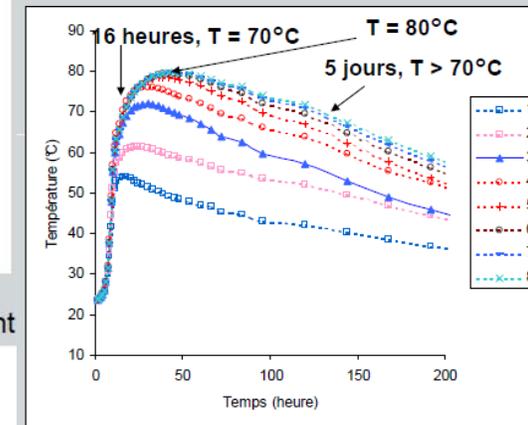
→ Calcul par éléments finis (logiciel CESAR LCPC)

Informations nécessaires :

- données météorologiques pendant la période de coulage
- géométrie de la pièce
- type de coffrage / durée
- phasage de réalisation
- propriétés du béton (courbe de dégagement de chaleur)

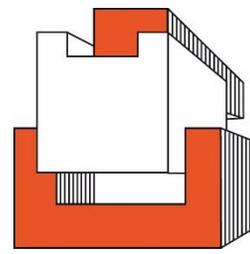


Gradient thermique lorsque l'échauffement est le plus important



Evolution des températures





ÉTANDEX



# Analyse de risques et choix du traitement

---

# Analyse du risque

Fonctions :

- Du risque de développement du gonflement → Aléa
- De la vulnérabilité de la structure vis-à-vis du gonflement

Aléa	Potentiel faible Environnement sec	Potentiel faible Environnement humide	Potentiel fort Environnement sec	Potentiel fort Environnement humide
Vulnérabilité				
V1	C0	C0	C0	C0
V2	C0	C1	C1	C2
V3	C1	C2	C2	C3
V4	C1	C2	C3	C4

Tableau 10. Niveaux de criticité

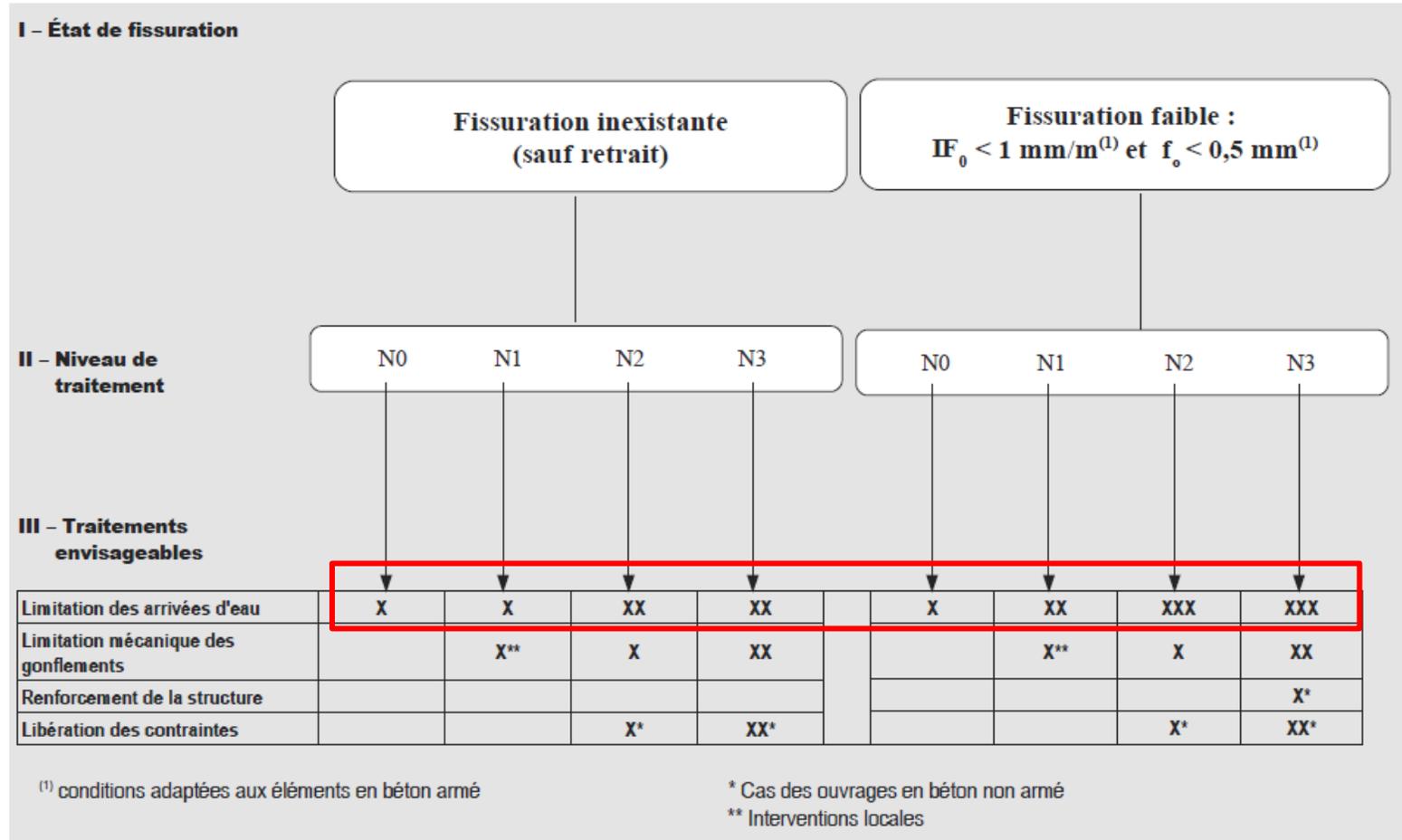
Criticité = Aléa x Vulnérabilité

Niveau de traitement	C0	C1	C2	C3	C4
E0	N0	N0	N1	N1	N2
E1	N0	N1	N1	N2	N3
E2	N1	N1	N2	N2	N3
E3	N1	N2	N2	N3	N3

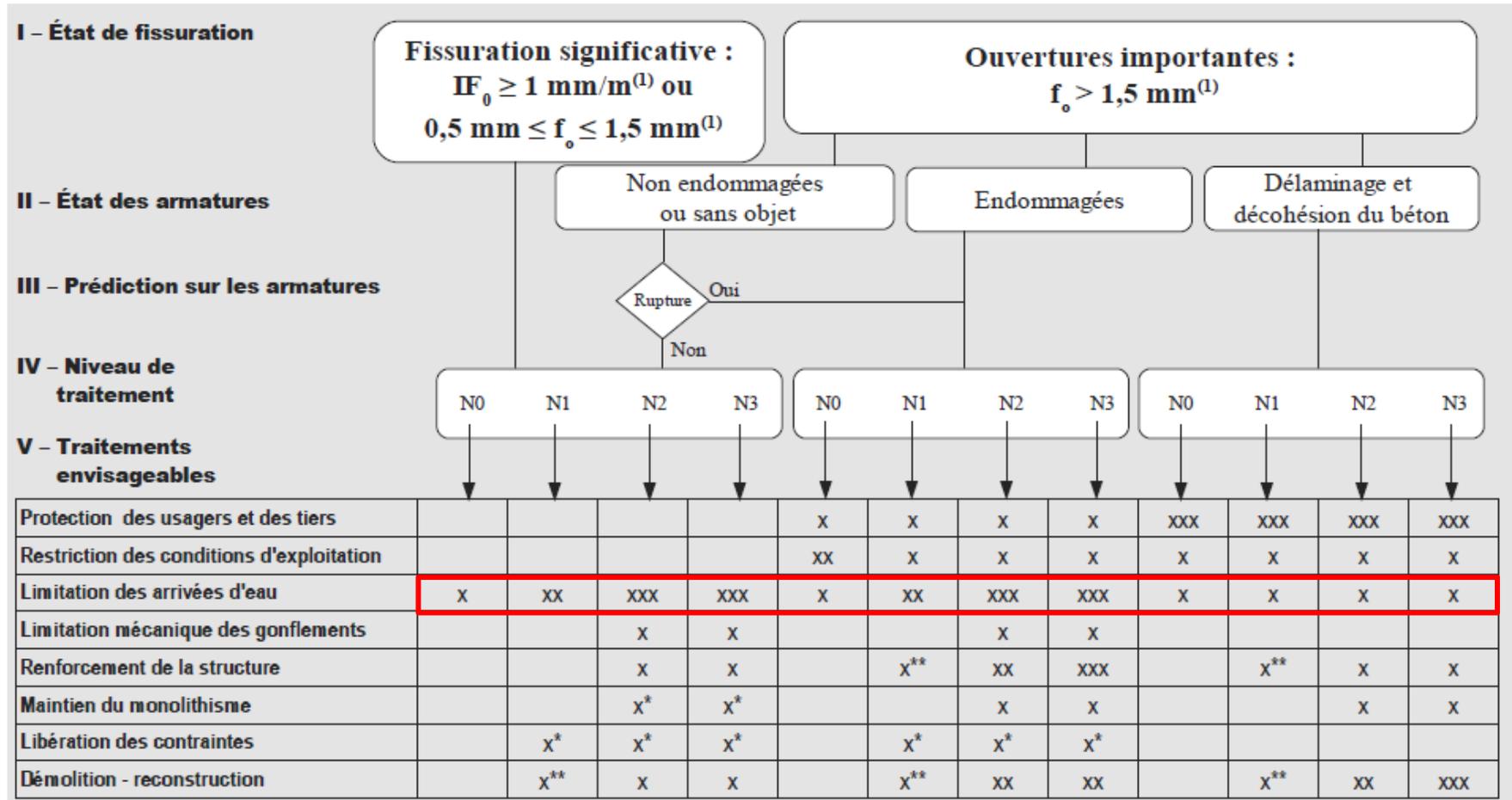
Tableau 11. Niveaux de traitement

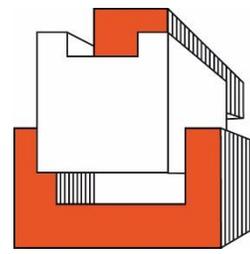
Niveau de traitement (N) = Criticité (C) x Enjeu (E)

# Choix du traitement (faibles fissurations)



# Choix du traitement





ÉTANDEX



# Etude et solution SEL PU projeté à chaud

---

# Etude sur prélèvements

Rapport d'étude du LERM de mesure sur 52 semaines d'éprouvettes contaminées revêtues et placées dans une enceinte humide HR  $\approx$  100%

3 Procédés testés :

- LHM
- Revêtement d'imperméabilisation époxy polyuréthane
- SEL polyuréthane projeté à chaud



# Etude sur prélèvements

---

Rapport d'étude du LERM de mesure sur 52 semaines d'éprouvettes contaminées revêtues et placées dans une enceinte humide HR  $\approx$  100%

3 Procédés testés :

- LHM
- Revêtement d'imperméabilisation époxy polyuréthane
- SEL polyuréthane projeté à chaud



# Etude sur prélèvements

---

Rapport d'étude du LERM de mesure sur 52 semaines d'éprouvettes contaminées revêtues et placées dans une enceinte humide HR  $\approx$  100%

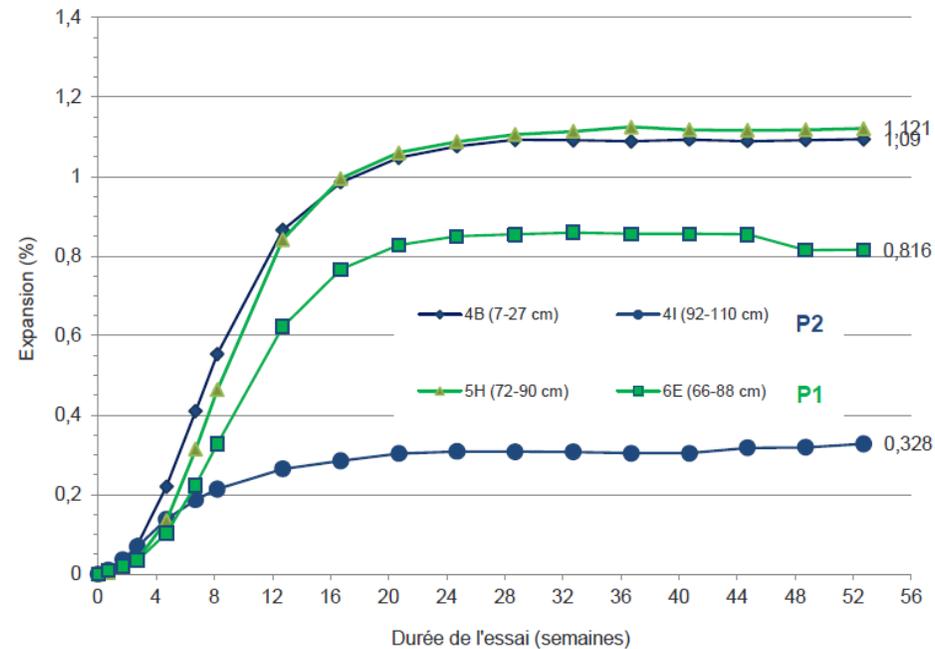
3 Procédés testés :

- LHM
- Revêtement d'imperméabilisation époxy polyuréthane
- SEL polyuréthane projeté à chaud



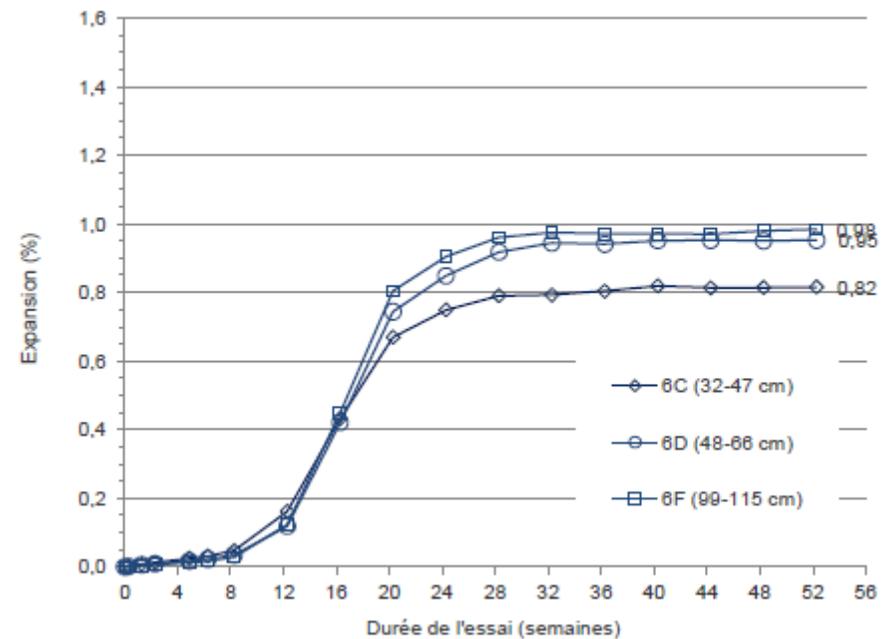
# Résultats Etude sur prélèvements

- Suivi de l'évolution de l'expansion sur éprouvettes non revêtues



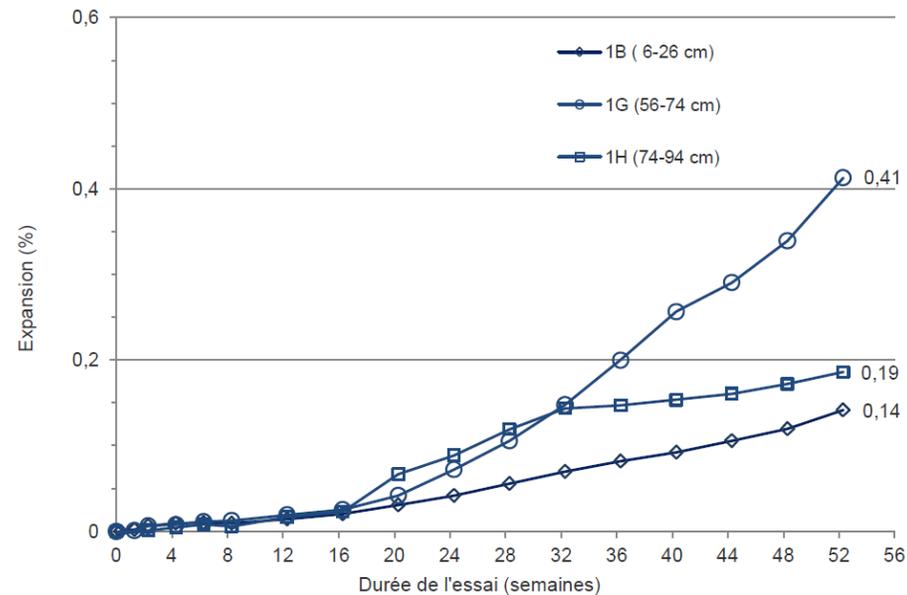
# Résultats Etude sur prélèvements

- Suivi de l'évolution de l'expansion sur éprouvettes avec revêtement LHM



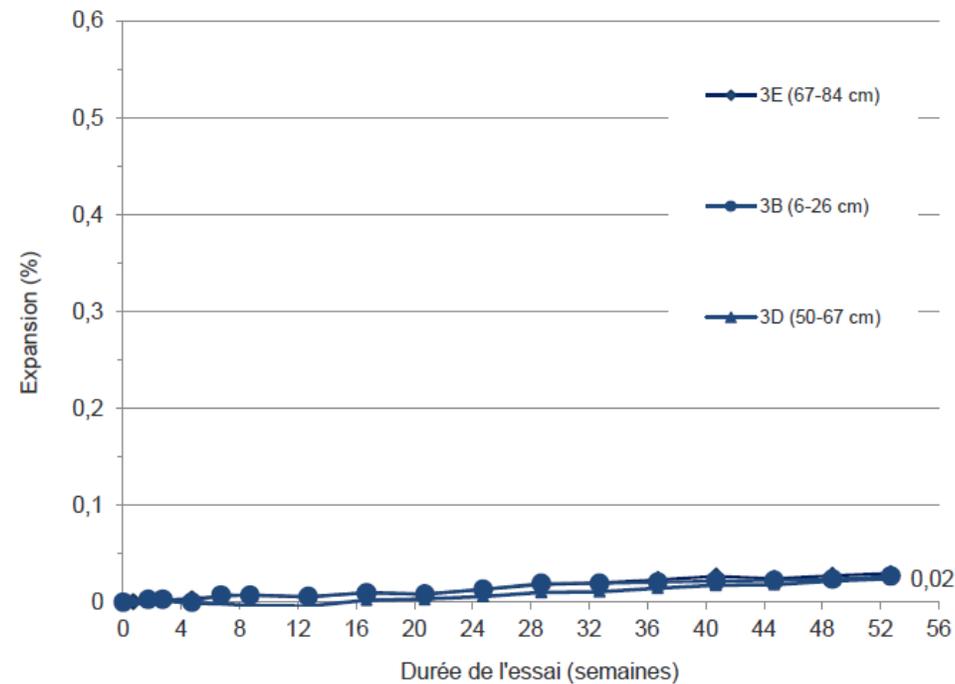
# Résultats Etude sur prélèvements

- Suivi de l'évolution de l'expansion sur éprouvettes avec revêtement d'imperméabilisation époxy polyuréthane



# Résultats Etude sur prélèvements

- Suivi de l'évolution de l'expansion sur éprouvettes avec revêtement SEL polyuréthane projeté à chaud



# Résultats Etude sur prélèvements

---

## Conclusions :

- Après 52 semaines d'essai, les éprouvettes revêtues d'un SEL PU projeté à chaud ne présentent aucune expansion significative
- Ces résultats confirment ainsi une très bonne capacité de ce système d'étanchéité à empêcher le transfert, à l'intérieur du matériaux, de l'humidité nécessaire à la formation différée d'étringite (RSI).

NOTA : Une solution acceptable correspond à une expansion résiduelle à 52 semaines inférieure à 0,04%

La solution SEL PU projetée à chaud démontre une expansion à 52 semaines de 0,02%

# Traitement grandeur nature d'une problématique RSI par SEL PU projeté à chaud

Étanchéité de type SEL PU projeté à Chaud

Sous Avis technique CEREMA et agrément SNCF



# Traitement grandeur nature d'une problématique RSI par SEL PU projeté à chaud

Exemple d'un chantier réalisé :

Préparation du support (ponçage, sablage...)



# Traitement grandeur nature d'une problématique RSI par SEL PU projeté à chaud

Exemple d'un chantier réalisé :

Traitement des fissures par calfeutrement ou injection si nécessaire



# Traitement grandeur nature d'une problématique RSI par SEL PU projeté à chaud

---

Exemple d'un chantier réalisé :

Application d'un primaire ETANPRIM SH (pare vapeur – Résistance à la contre pression)



# Traitement grandeur nature d'une problématique RSI par SEL PU projeté à chaud

Exemple d'un chantier réalisé :

Application de la solution PROTHEANE AC



# Traitement grandeur nature d'une problématique RSI par SEL PU projeté à chaud

---

Exemple d'un chantier réalisé :

Application de la finition colorée



# Conclusion

---

- Nécessité d'un suivi important de l'ouvrage
- Nécessité d'une instrumentation pour contrôler l'ouvrage

Solution SEL PU projeté à chaud

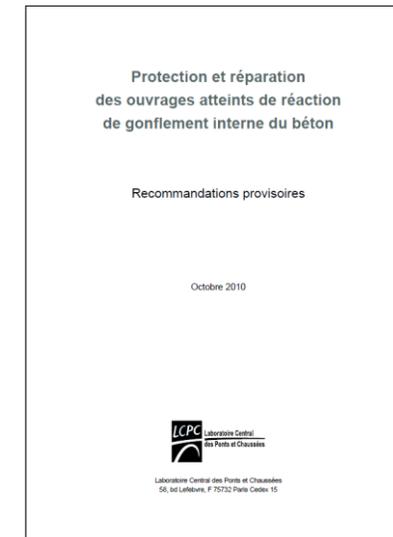
- Solution pour limiter les arrivées d'eau dans l'ouvrage et contribuer ainsi à la pérennité des ouvrages soumis au risque RSI

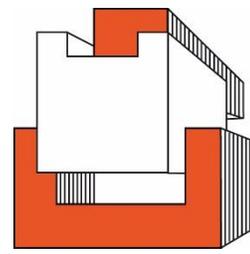
# Documents de référence

Guides du LCPC : Aide à la gestion des ouvrages atteints de réaction de gonflement interne (2003)

Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne (2007)

Recommandations provisoires : Protection et réparation des ouvrages atteints de réaction de gonflement interne du béton (2010)





ÉTANDEX



Merci de votre attention

---