

Le phénomène de Réaction Sulfatique Interne du béton

Par : Bruno GODART – AFGC et ex-LCPC (Université Gustave Eiffel)

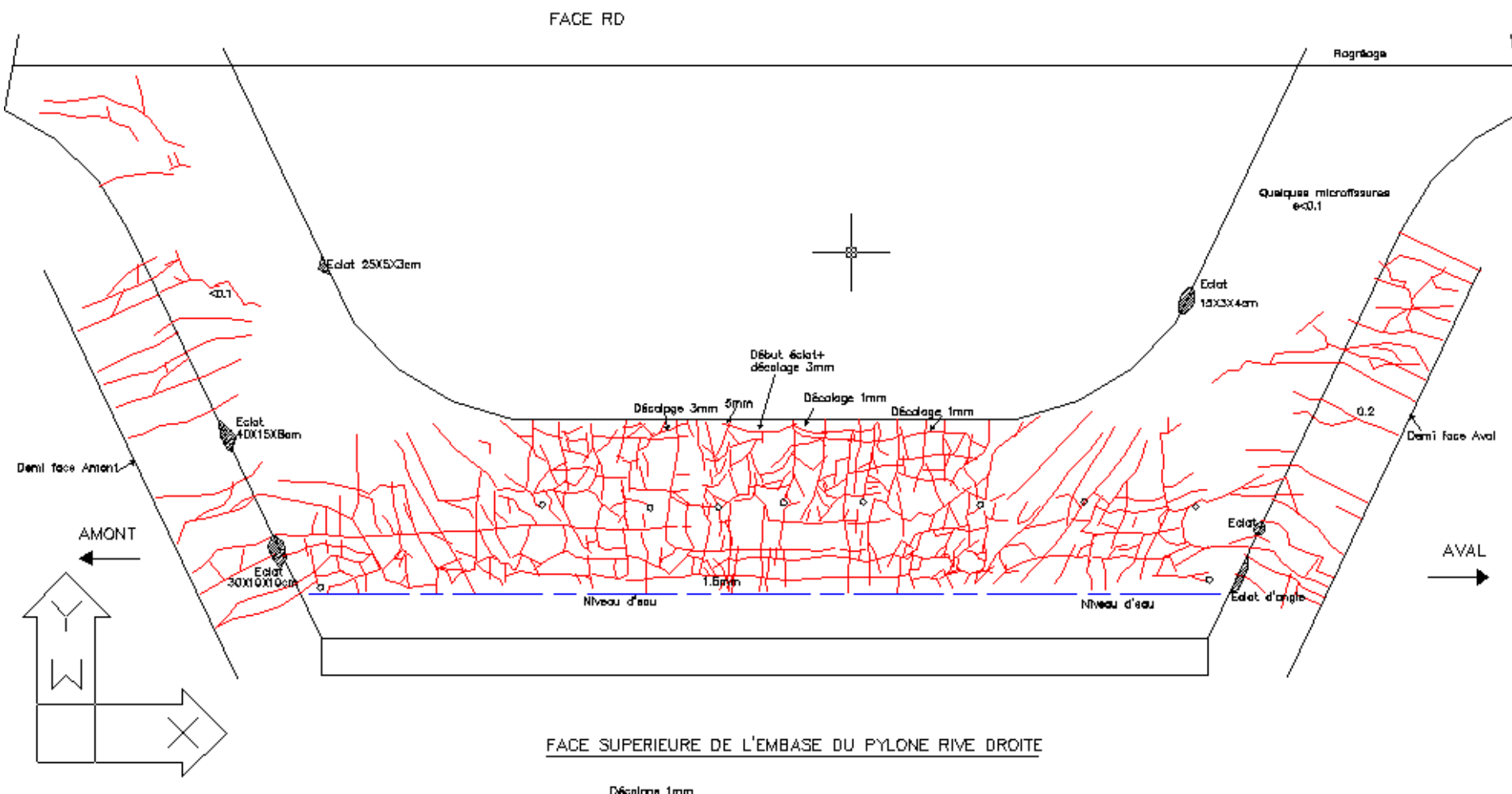
La RSI lors de l'Expertise (2001)

- **Analyse minéralogique des bétons par le LCPC (Loïc DIVET) :**
 - RSI identifiée dans les embases (sous forme de formation d'ettringite différée)
 - Pas de RSI identifiée dans la semelle, les jambes et les entretoises.

Les Investigations sur ouvrages (2001)

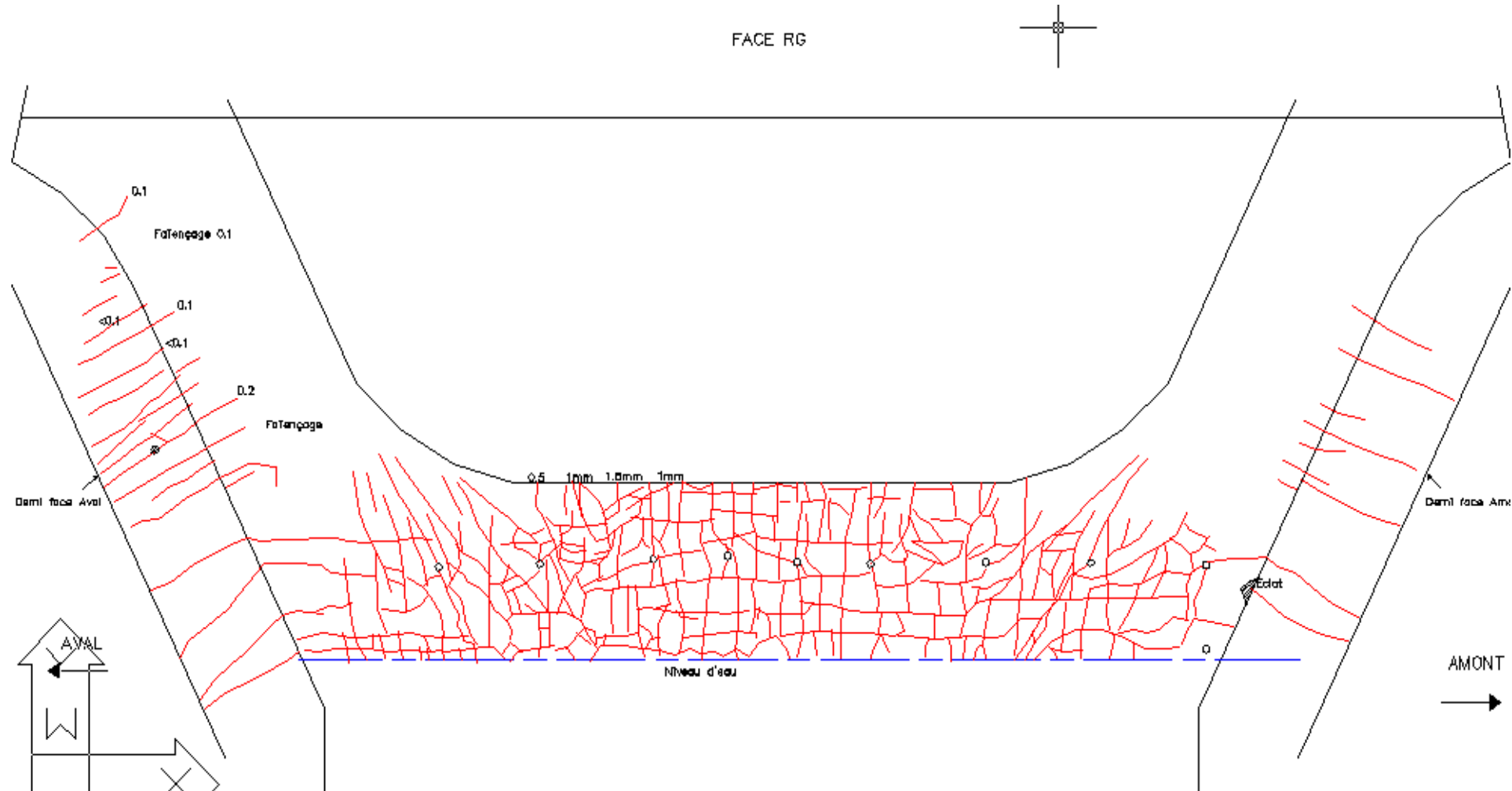


Relevé des fissures sur les embases, hors parties immergées



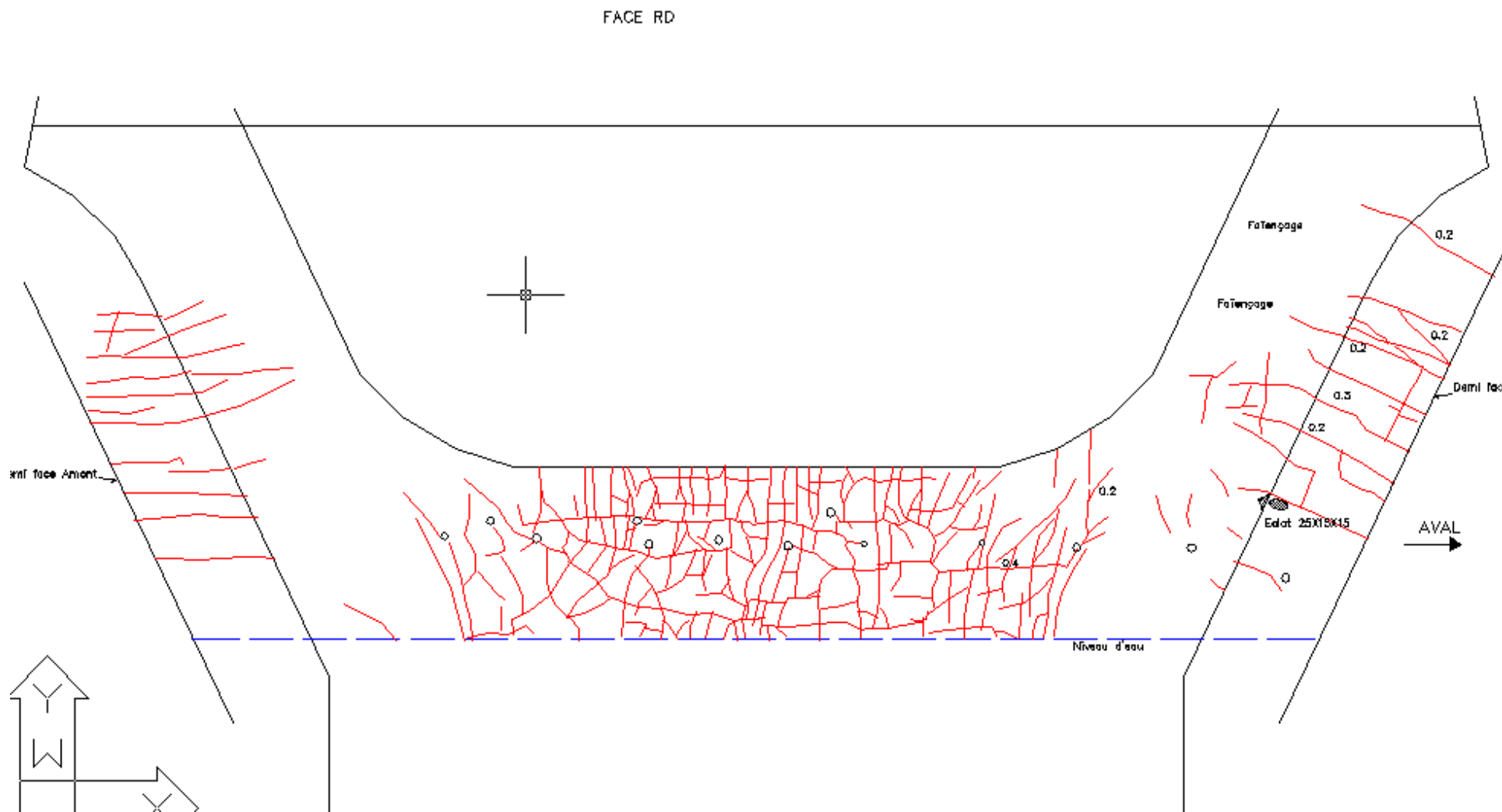
Pylône P3 RD FACE RD (Document LR Autun)

Relevé des fissures sur les embases, hors parties immergées



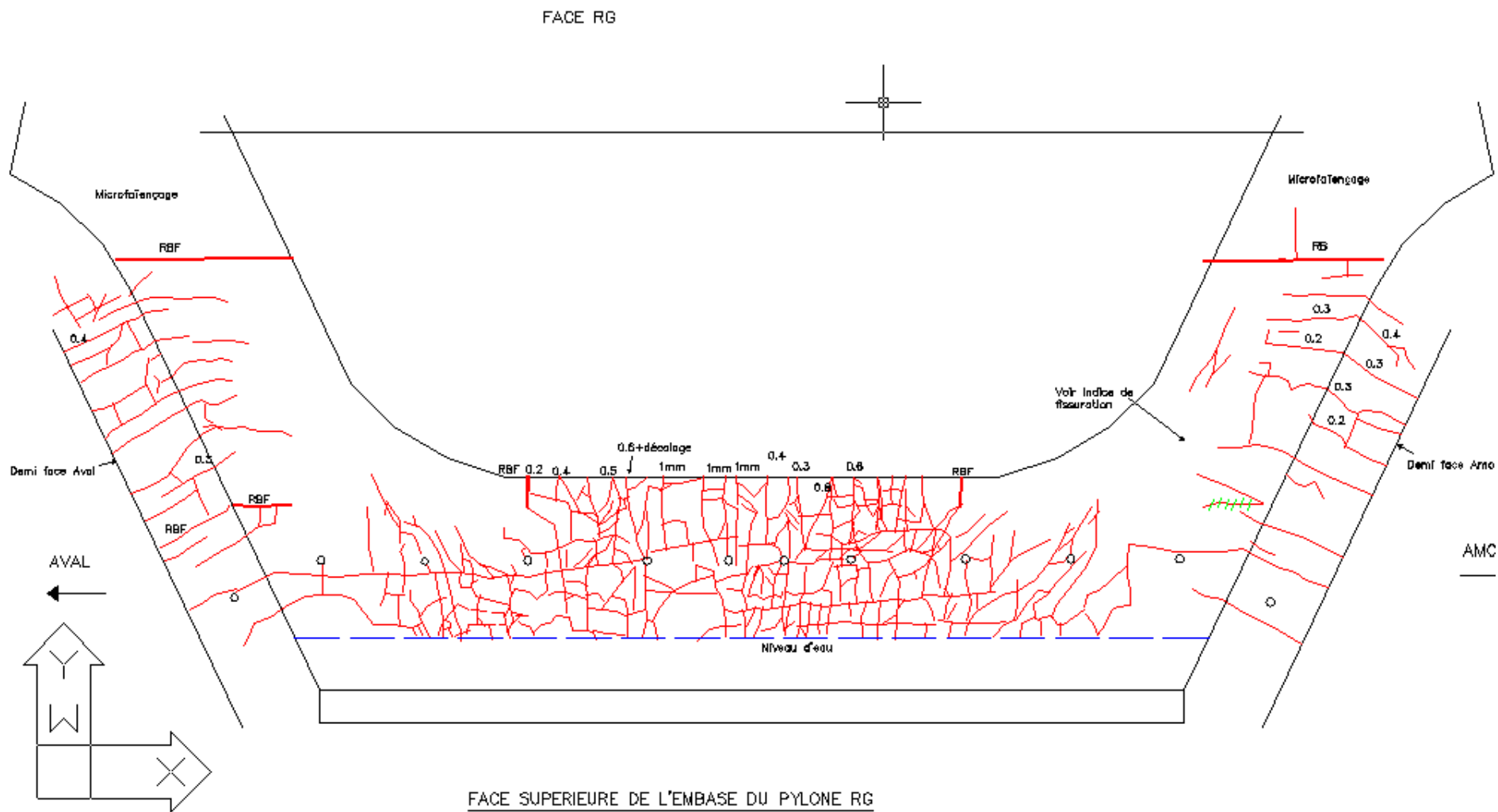
Pylône P3 RD FACE RG (Document LR Autun)

Relevé des fissures sur les embases, hors parties immergées



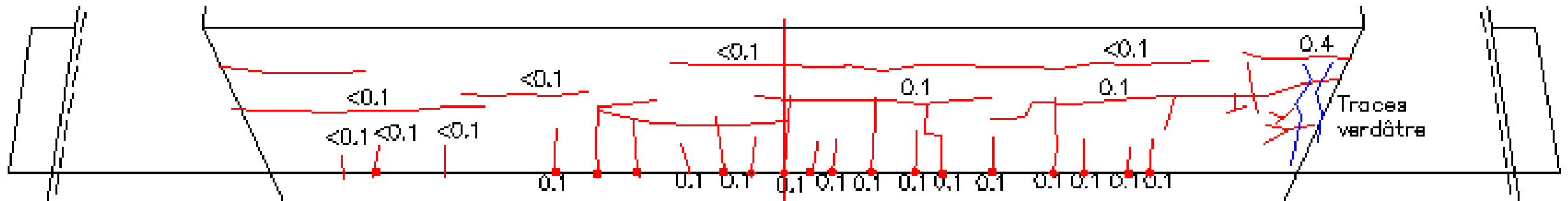
Pylône P4 RG FACE RD (Document LR Autun)

Relevé des fissures sur les embases, hors parties immergées

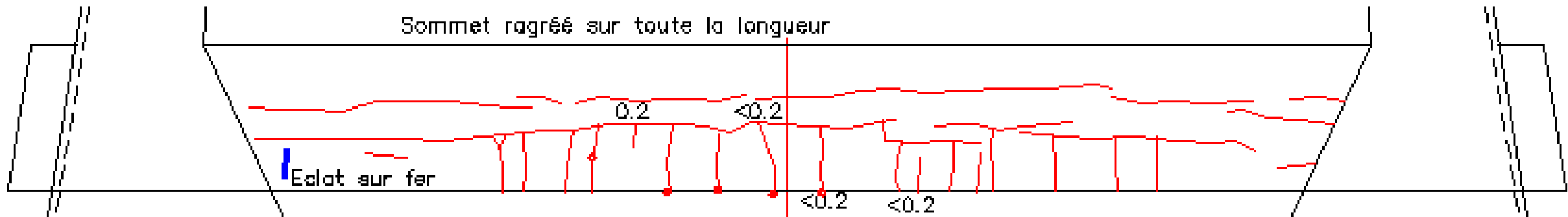


Pylône P4 RG FACE RG (Document LR Autun)

Fissuration entretoise du Pylône P3 RD

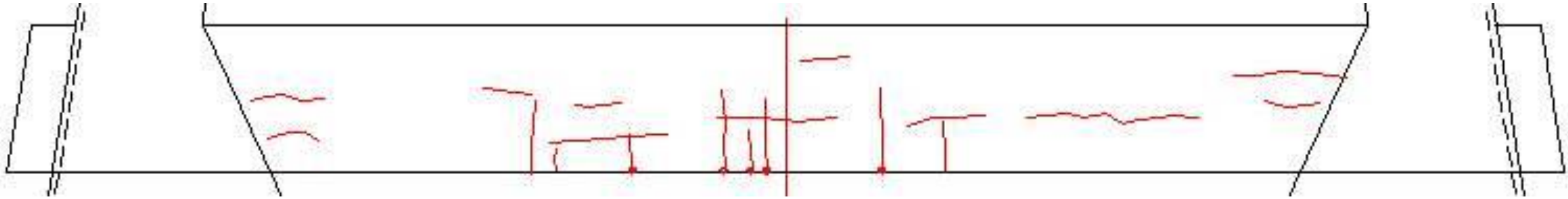


Face RIVE DROITE

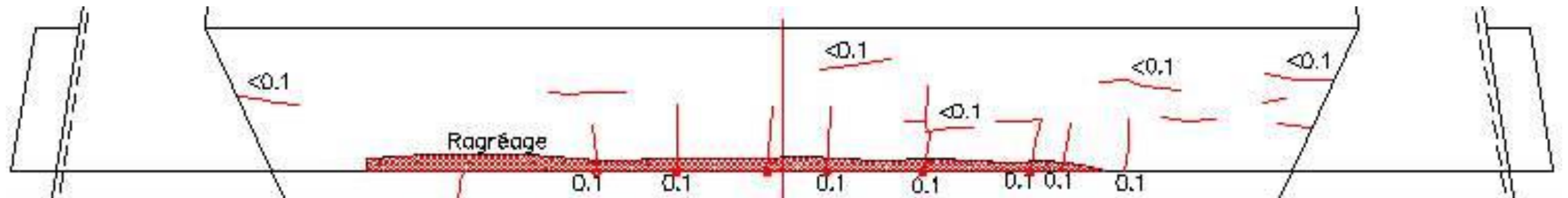


Face RIVE GAUCHE

Fissuration entretoise du Pylône P4 RG



Face RIVE DROITE



Face RIVE GAUCHE

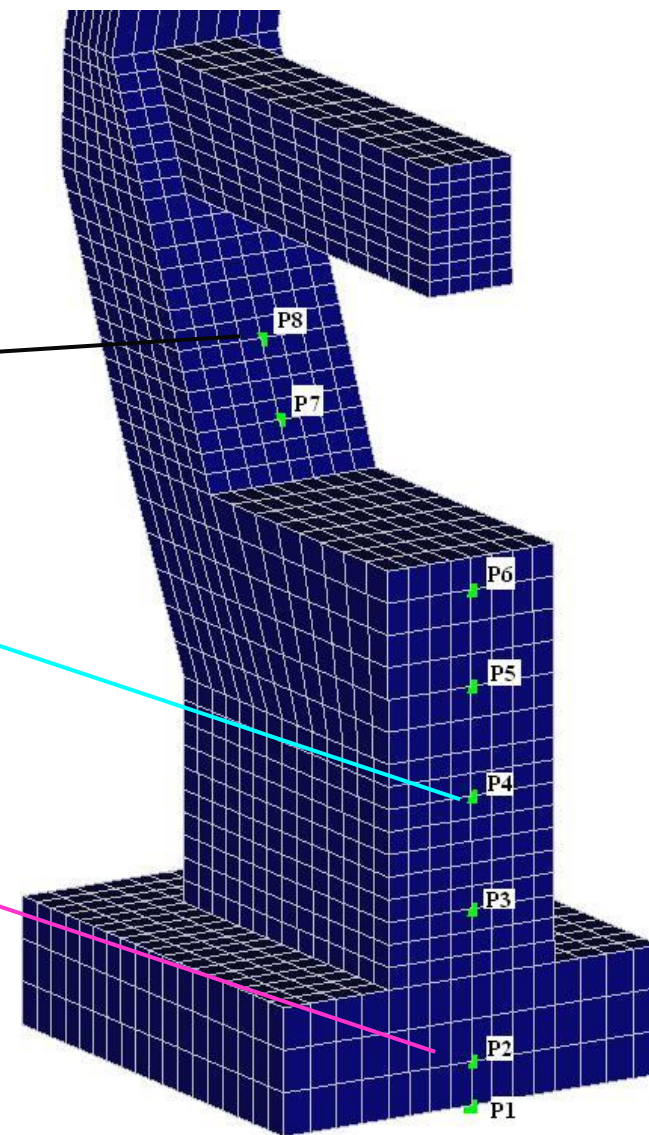
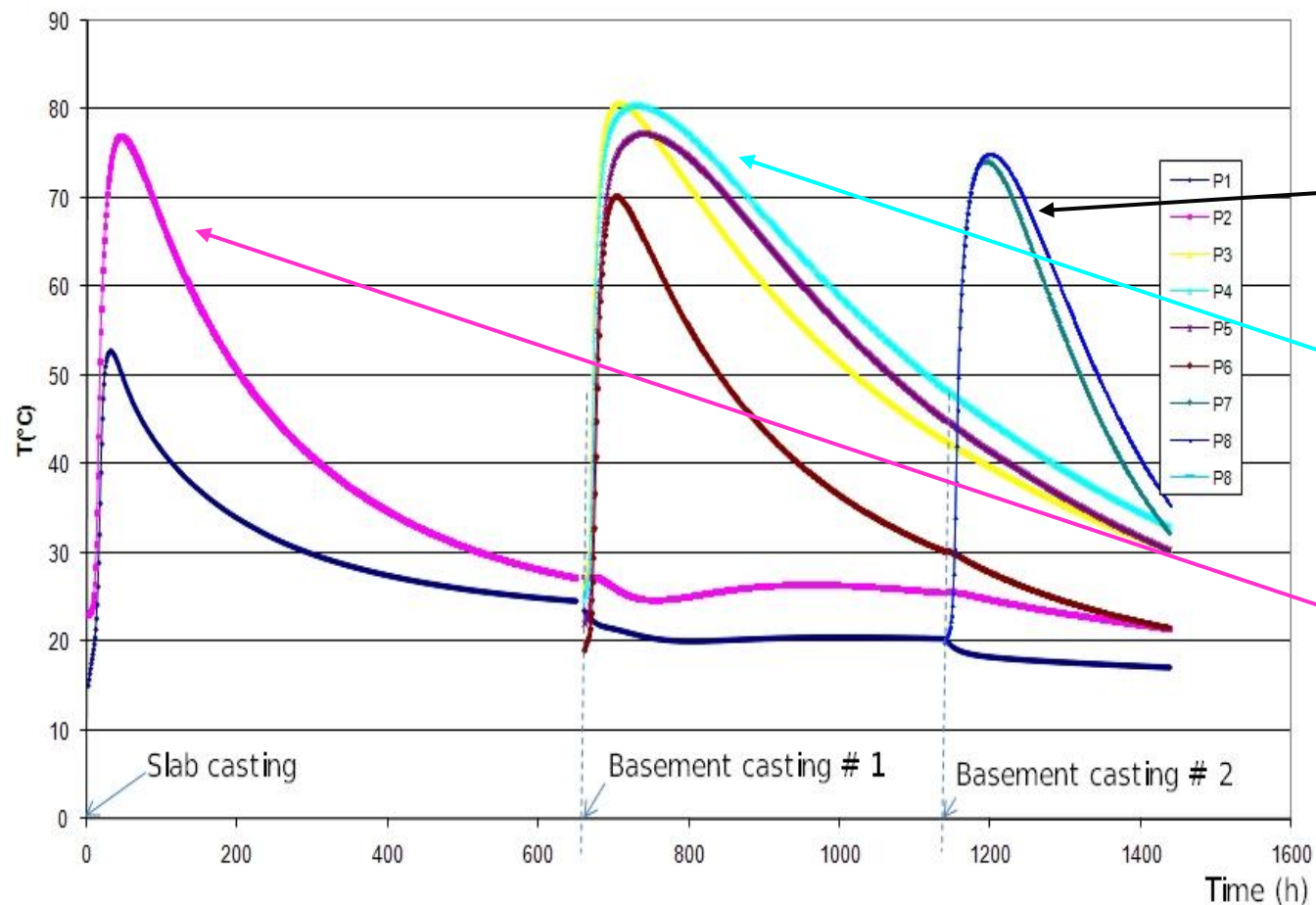
Inspections subaquatiques (2001) :

- les parties immergées des pylônes P3 et P4 présentent une fissuration multidirectionnelle développée, à l'image de ce que l'on voit en partie aérienne
- la fissuration est plus développée en longueur cumulée et en ouverture sur P3 que sur P4 ; alors que des fissures atteignent plusieurs millimètres sur P3, elles restent inférieures au millimètre sur P4
- cette fissuration multidirectionnelle est plus importante et plus dense en partie supérieure qu'en partie inférieure de l'embase ; en outre cette fissuration est plus ouverte dans la partie supérieure centrale où l'on note des fissures qui font en moyenne 1 mm d'ouverture et qui atteignent jusqu'à 3 mm d'ouverture sur P3
- les fissures, surtout sur P3, semblent s'orienter préférentiellement suivant une direction à 45° en partie inférieure de l'embase, sur les côtés à l'aplomb des jambes
- les fissures sont remplies d'exsudats
- aucune fissure visible sur la face supérieure de la semelle ; les fissures verticales qui existent dans le bas de l'embase ne se prolongent pas dans la semelle

Etude thermique des pylônes :

- **Objectif :** estimer les températures qui ont pu être atteintes lors de la construction des pylônes
- **Hypothèses :**
 - Dégagement de chaleur : 3 essais adiabatiques sur la base des formules théoriques de béton
 - Prise en compte des coffrages et de la température de l'eau de la Saône
 - Timing de bétonnage
 - Calcul aux éléments finis avec module TEXO de CESAR-LCPC
 - Difficulté : connaissance de la température initiale du béton à la fabrication...
- **Résultats : température maximale atteinte à cœur :**
 - 79 °C pour la semelle (maintien au dessus de 70 °C pendant 3 jours)
 - 79 °C pour l'embase (maintien au dessus de 70 °C pendant 6 jours)
 - 71 °C pour la moitié inférieure des jambes
 - 66 °C pour la moitié supérieure des jambes
 - 64 °C pour l'entretoise

Etude thermique des pylônes :



La température dans l'embase atteint 80 °C et reste à plus de 70 °C pendant 6 jours.

Indices de fissuration :

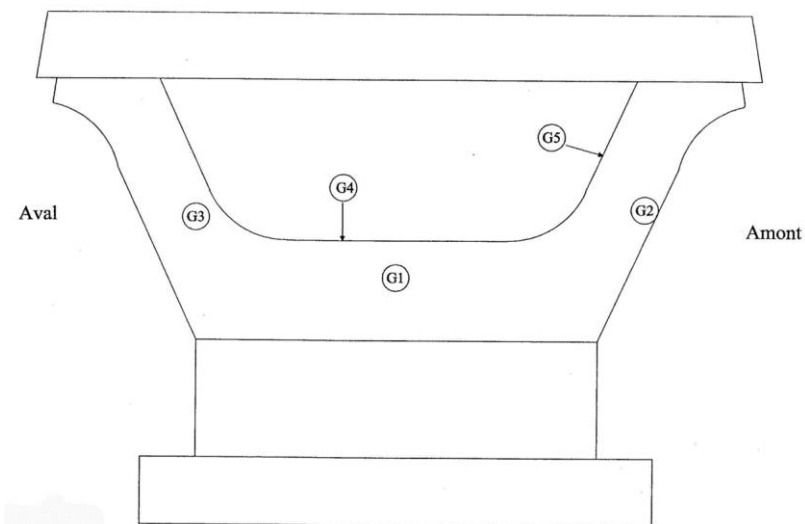
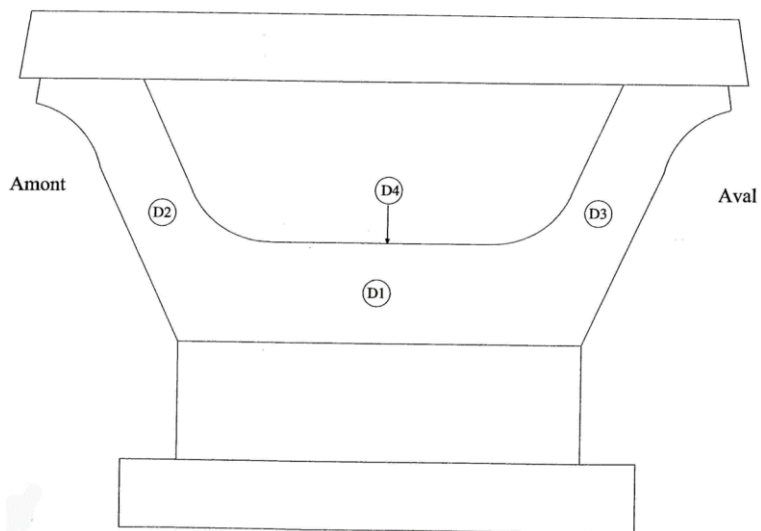
Indices relevés au 09/12/2004 par le LRPC Autun :

Pylône P3 :

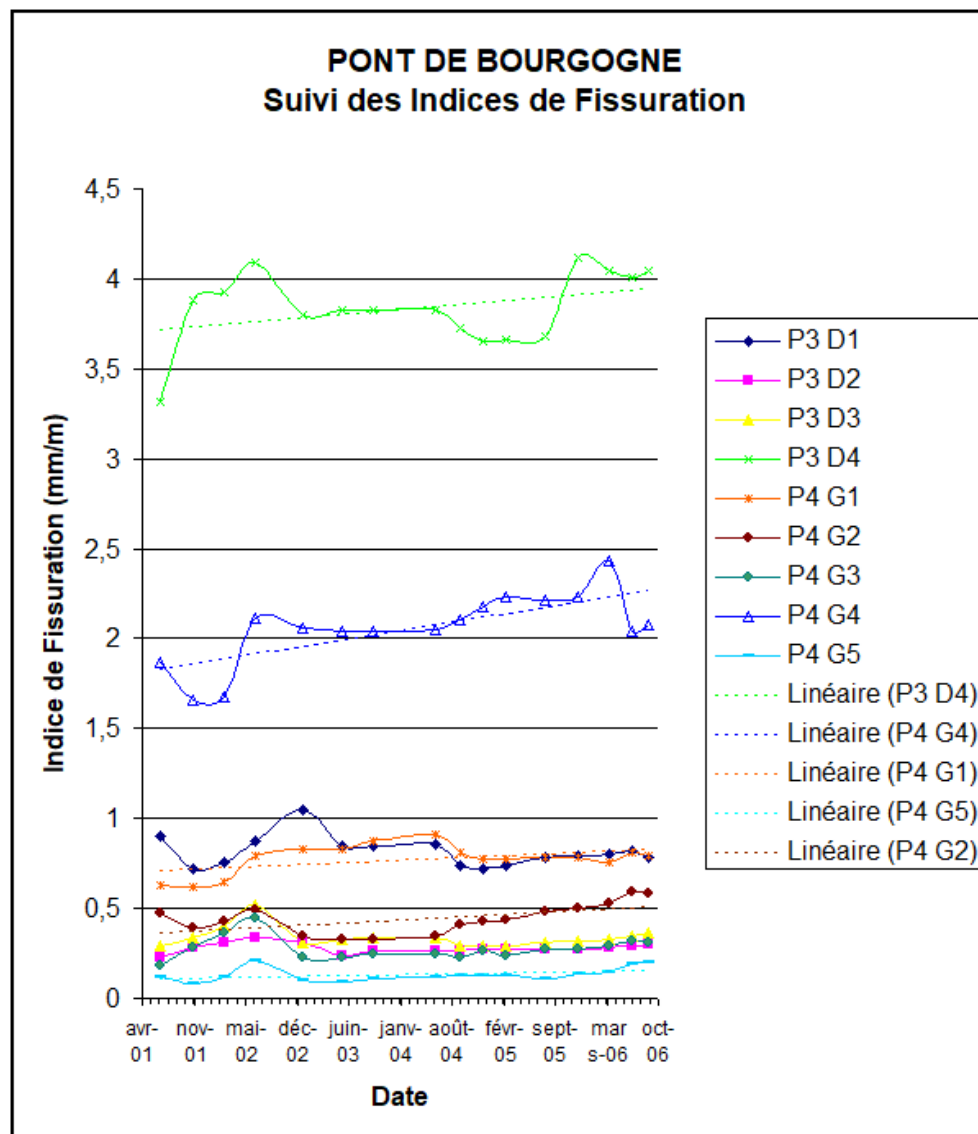
- D1 : 0,72 mm/m
- D2 : 0,27 mm/m
- D3 : 0,29 mm/m
- D4 : 3,65 mm/m

Pylône P4 :

- G1 : 0,77 mm/m
- G2 : 0,43 mm/m
- G3 : 0,26 mm/m
- G4 : 2,18 mm/m
- G5 : 0,13 mm/m

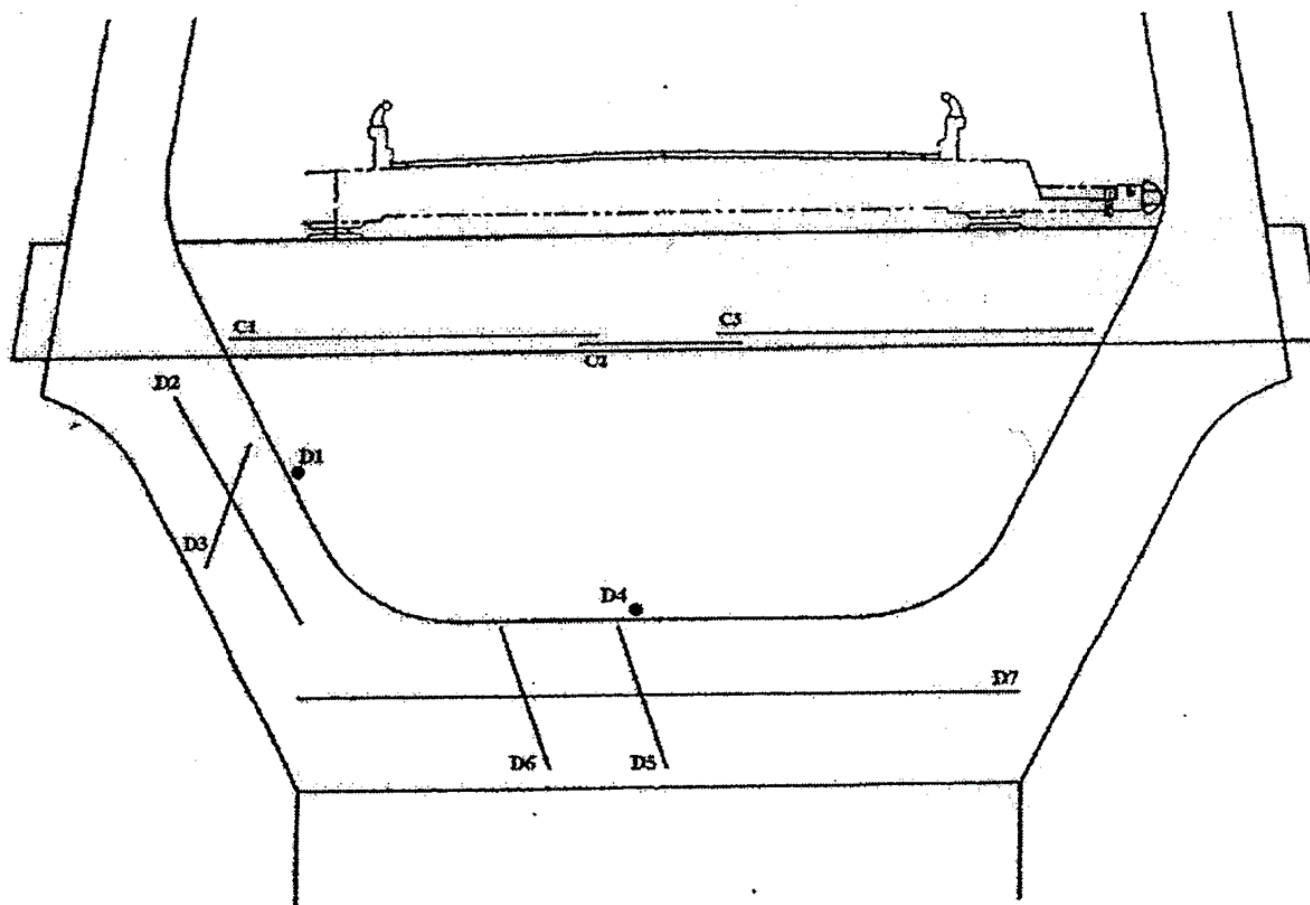


Indices de fissuration : Suivi de 2001 à 2006

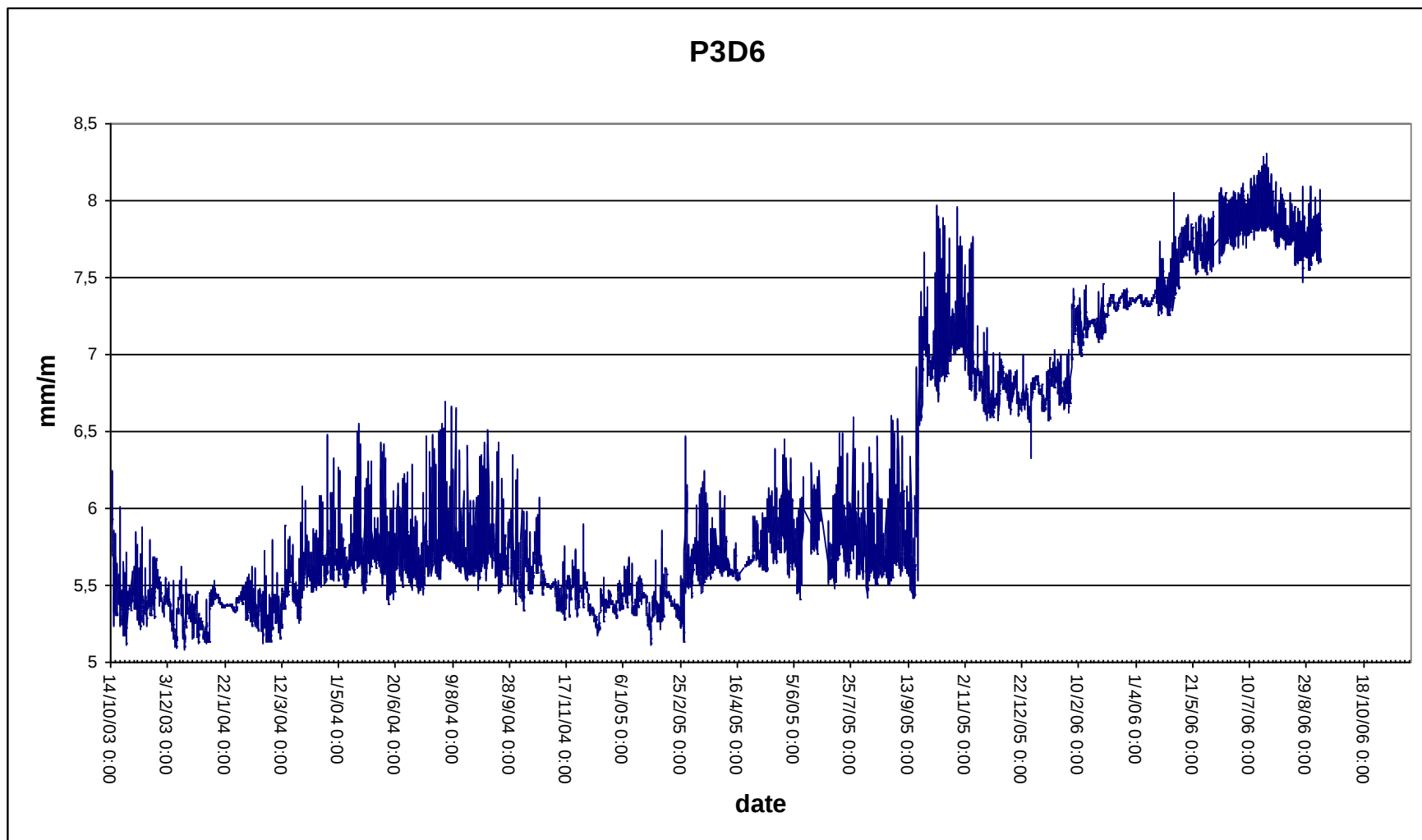


Instrumentation par Distancemétrie

Implantation des distancemètres sur piles et entretoises

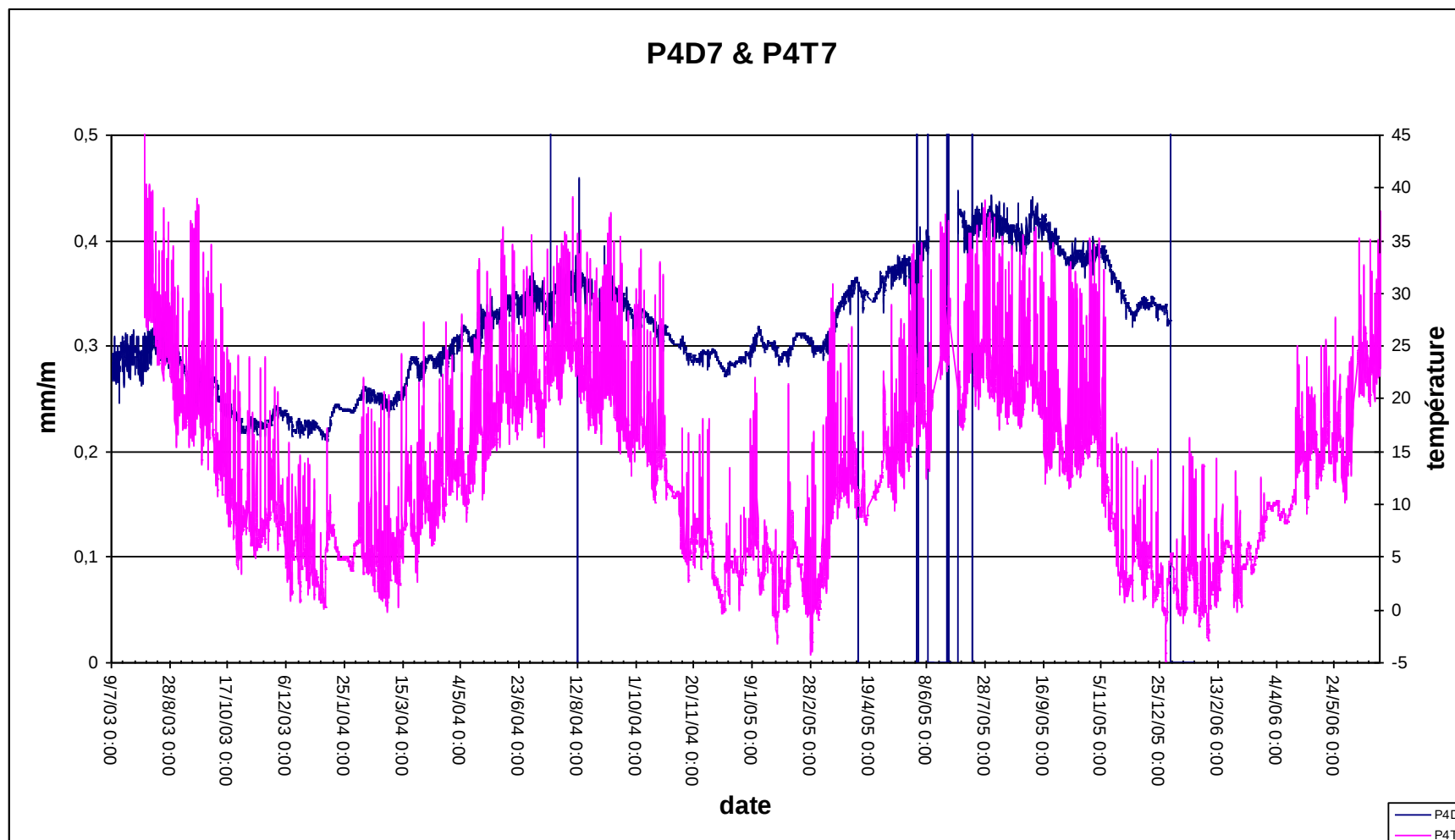


Instrumentation par Distancemétrie



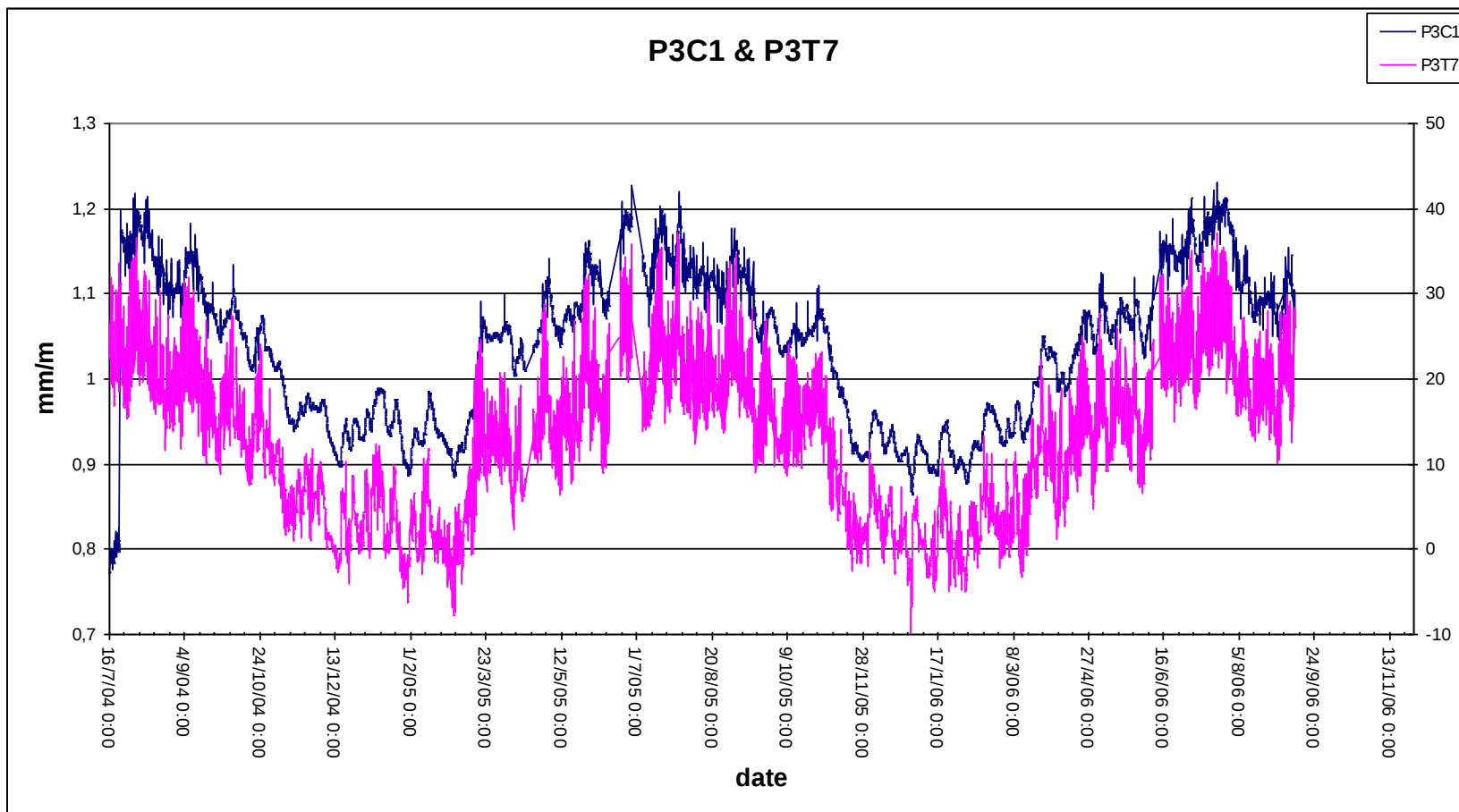
Détection d'un évènement.... (Pylône P3 – Distancemètre D6)

Instrumentation par Distancemétrie



Détection d'une tendance.... (Pylône P4 – Distancemètre D7)

Instrumentation par Distancemétrie



Pas de tendance.... Pylône P3 – Distancemètre C1 sur l'entretoise)

Les essais de gonflement sur carottes

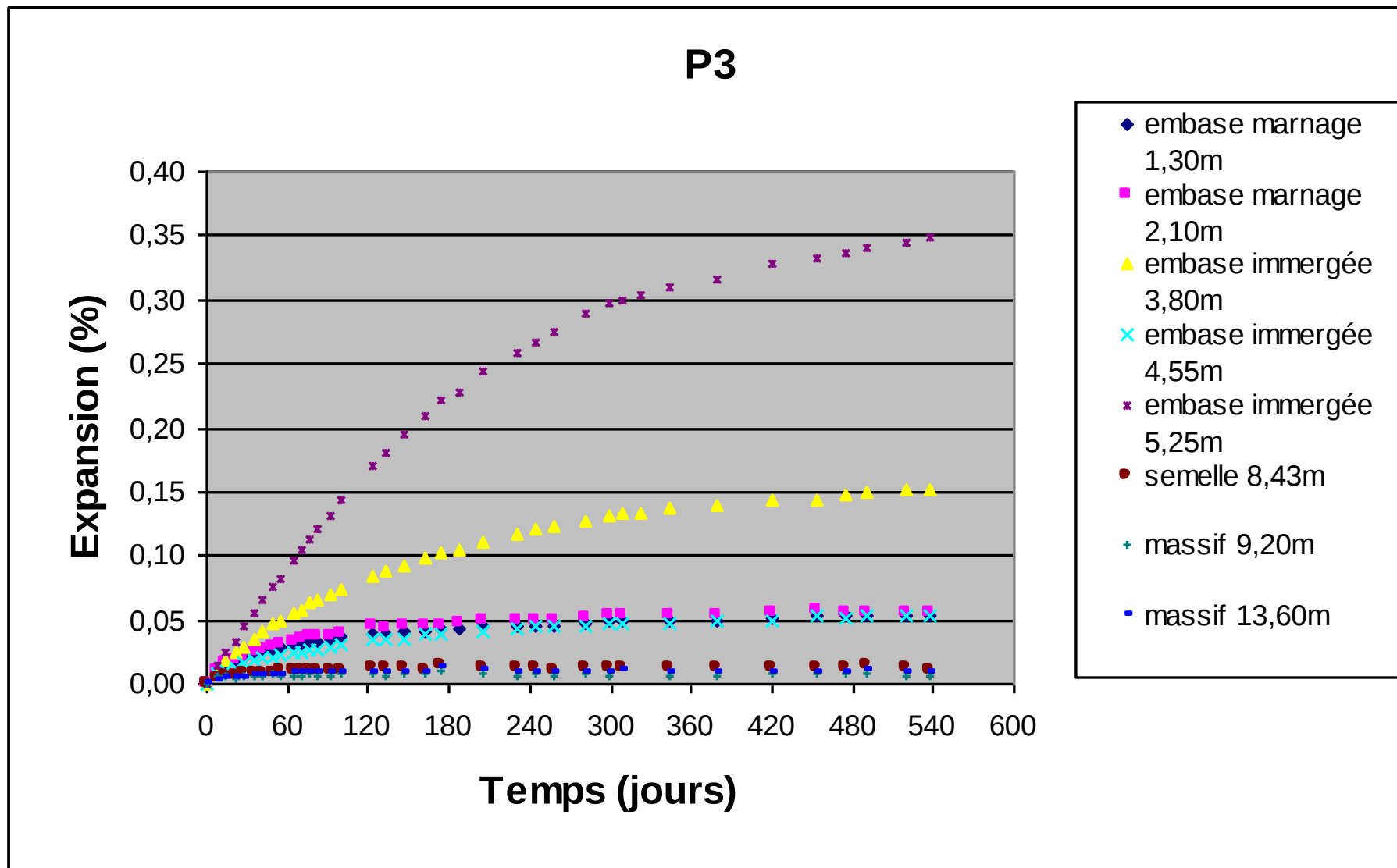
- Objectifs de l'étude :
 - Déterminer l'évolution probable de la réaction sulfatique au sein des 2 pylônes du pont de Bourgogne
 - Obtenir des informations sur les propriétés mécaniques futures du béton (lorsque la réaction sulfatique sera arrivée à terme)
 - Avoir des données pour aider dans le choix de la solution de réparation de l'ouvrage

Les essais d'expansion résiduelle sur carottes

- **Mesurer l'expansion résiduelle selon la méthode LCPC :**
 - Echantillons prélevés dans les carottes verticales ($\Phi = 10$ cm) extraites des pylônes P3 et P4
 - 4 zones de prélèvements par pylône :
 - embase en zone de marnage
 - embase immergée
 - Semelle
 - massif
 - Carottes non protégées
 - Carottes revêtues d'un film d'aluminium : pour éviter la pénétration d'eau en provenance de l'extérieur

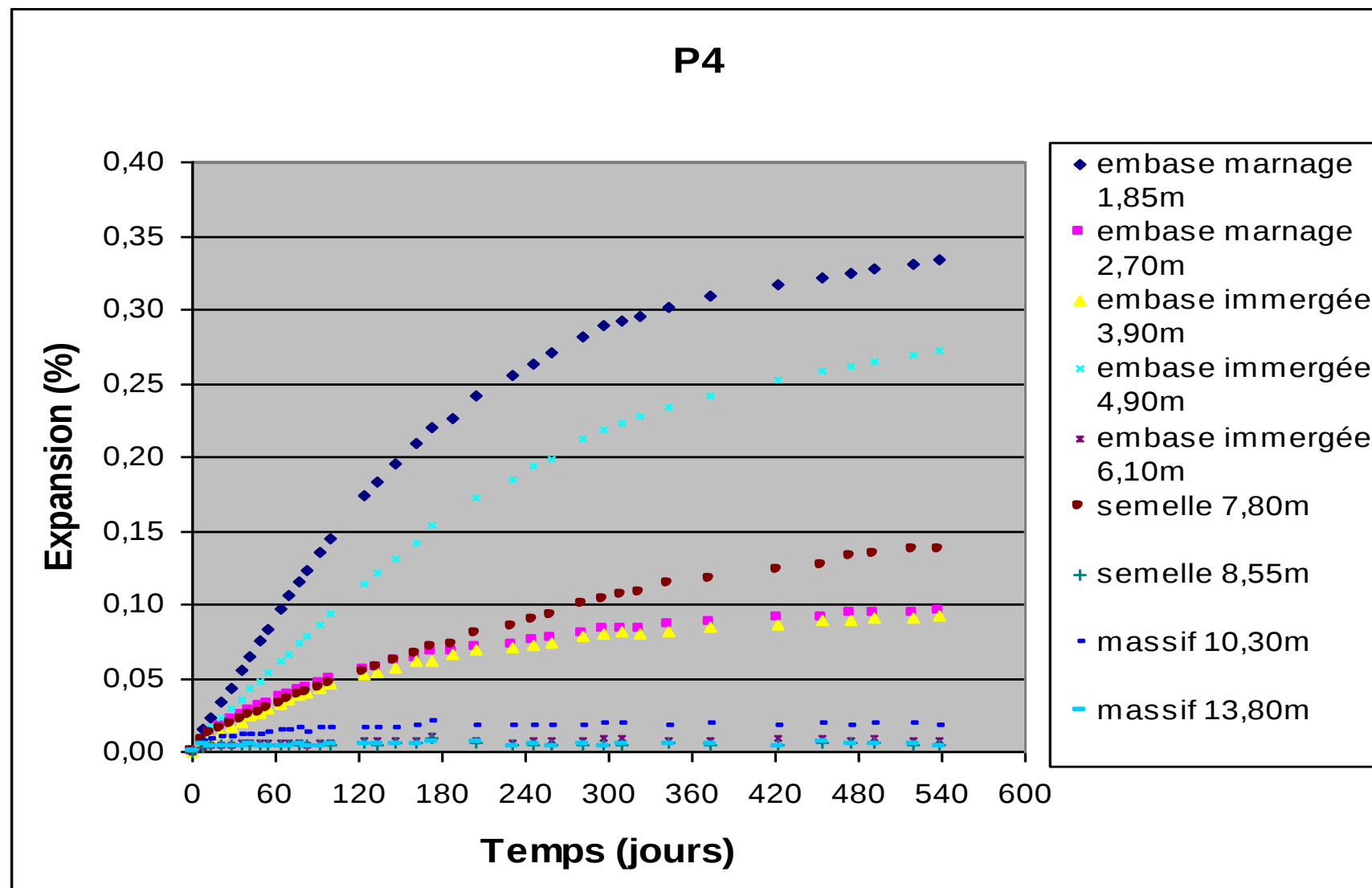
Les essais d'expansion résiduelle sur carottes

Pile P3
(embase –
semelle –
massif)

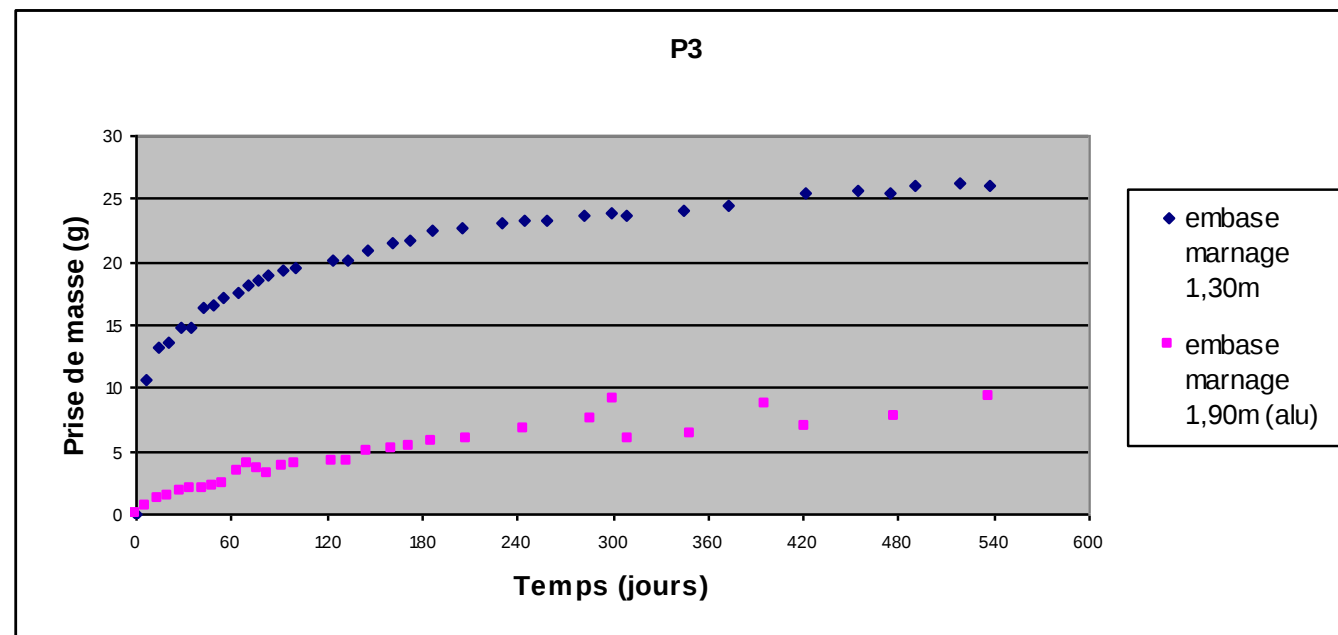
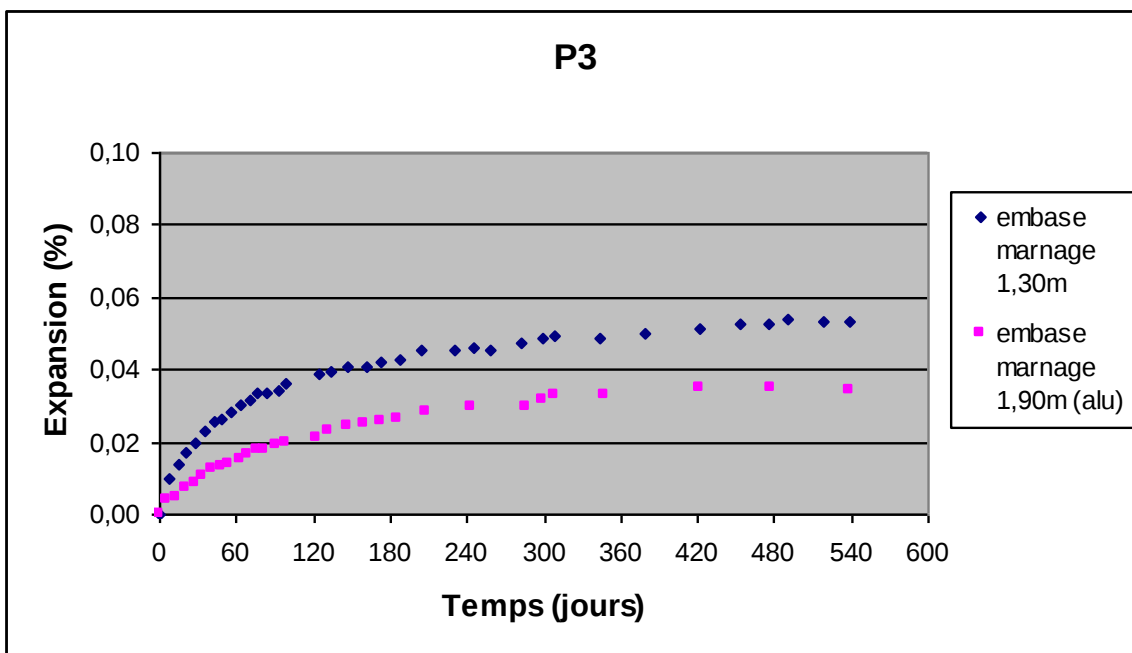


Les essais d'expansion résiduelle sur carottes

Pile P4
(embase –
semelle –
massif)

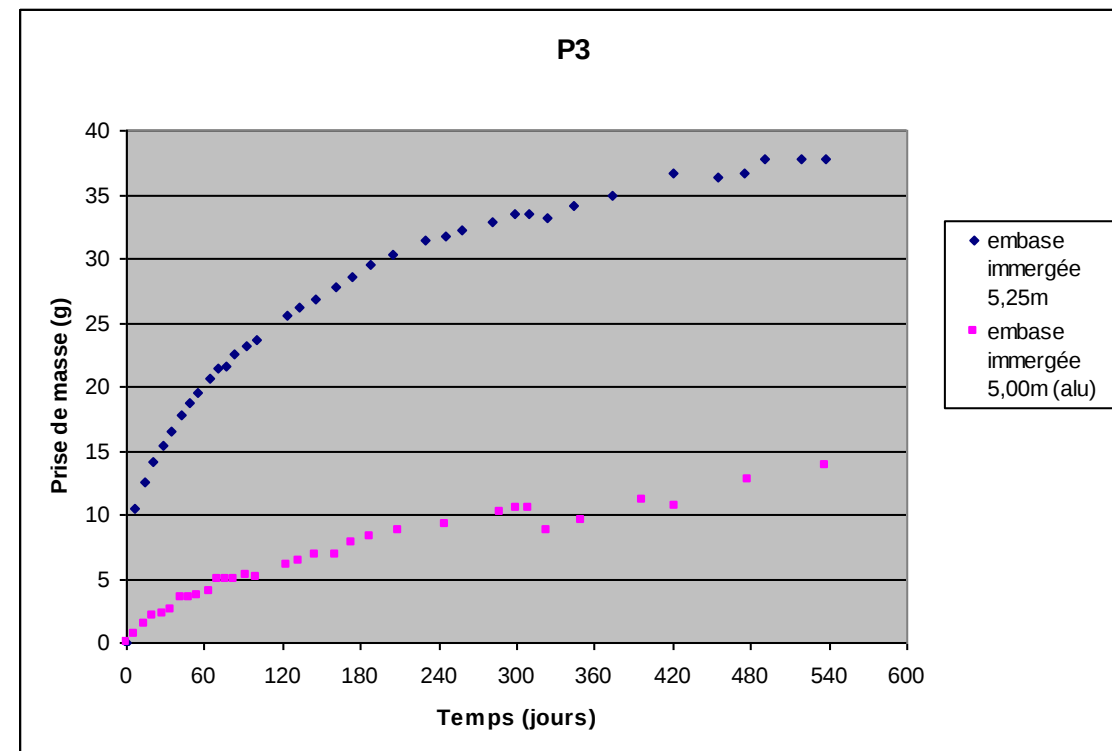
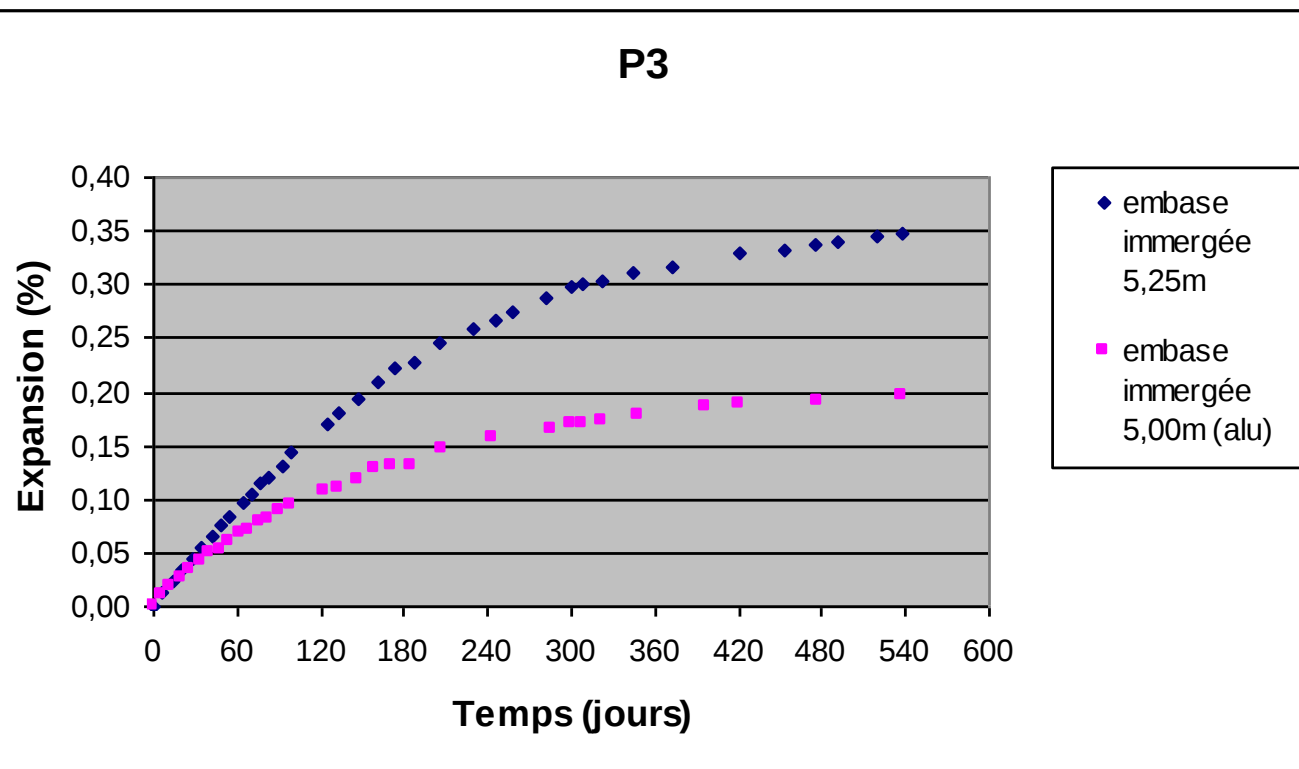


Les essais d'expansion résiduelle sur carottes



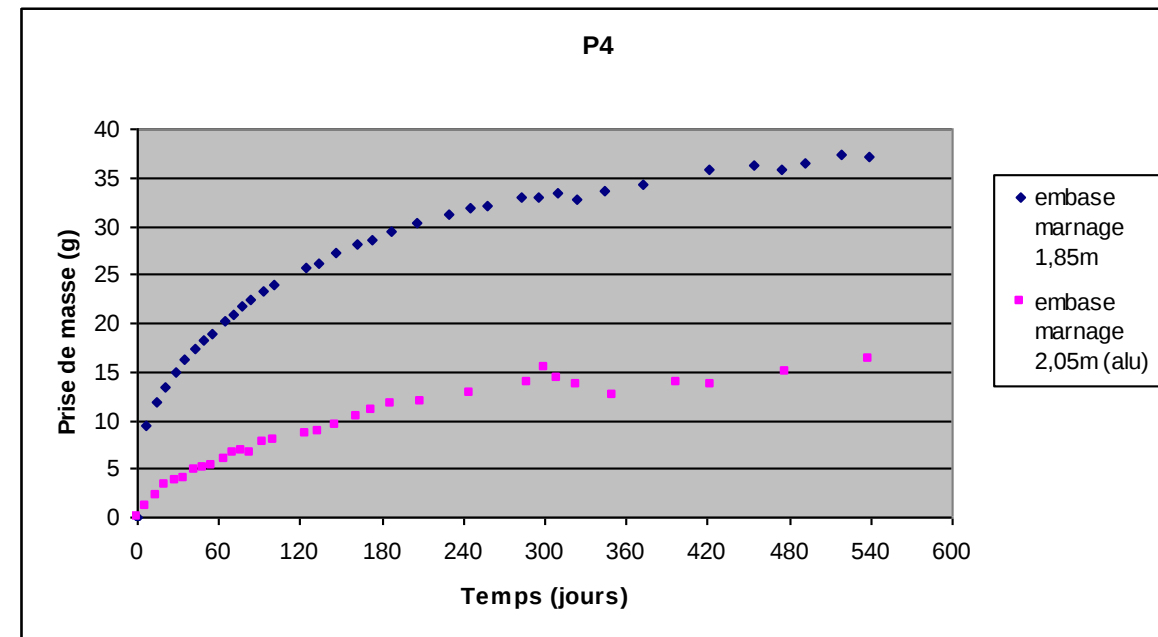
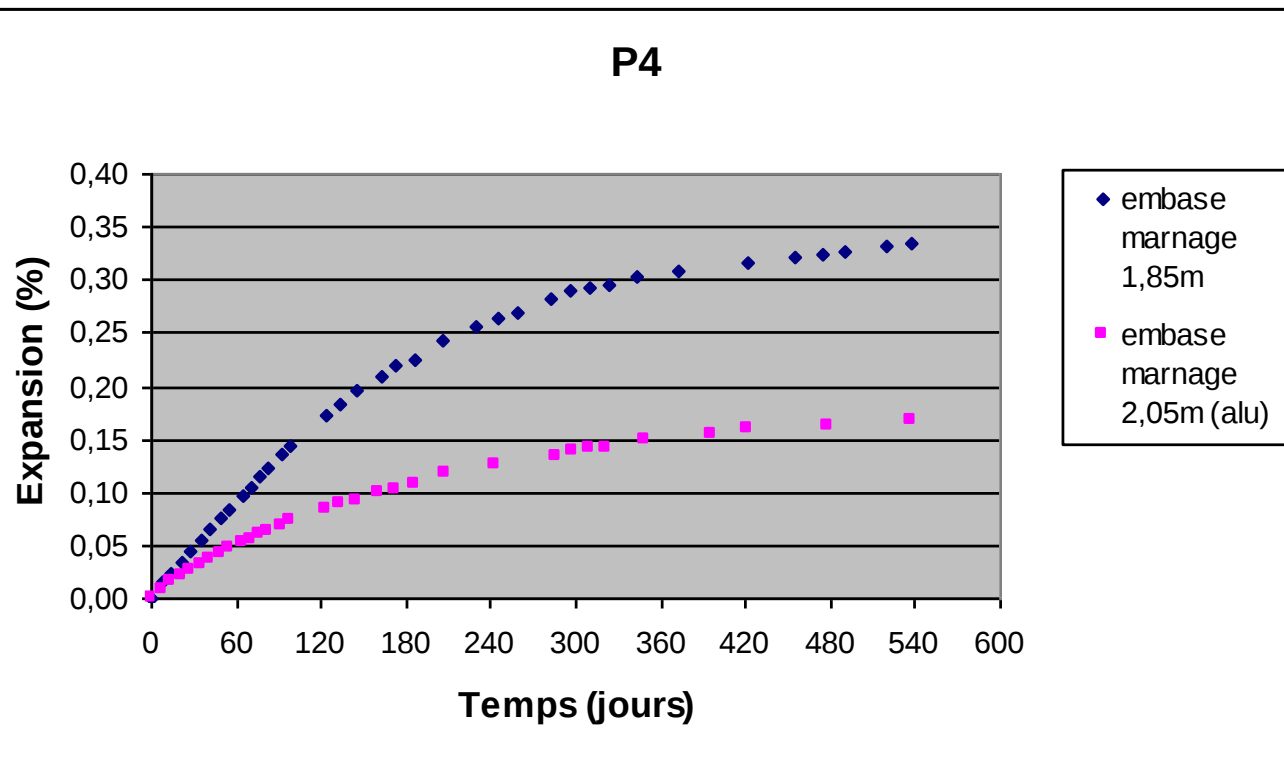
Pile P3 – embase – marnage (1,3 –1,9 m)

Les essais d'expansion résiduelle sur carottes



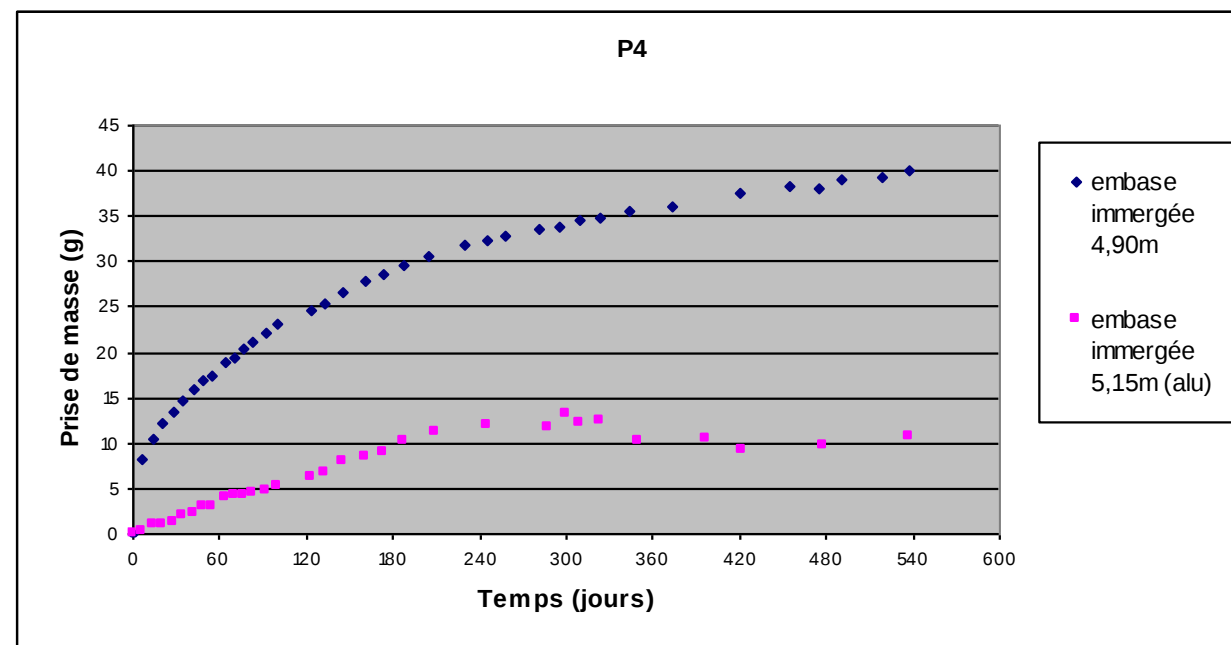
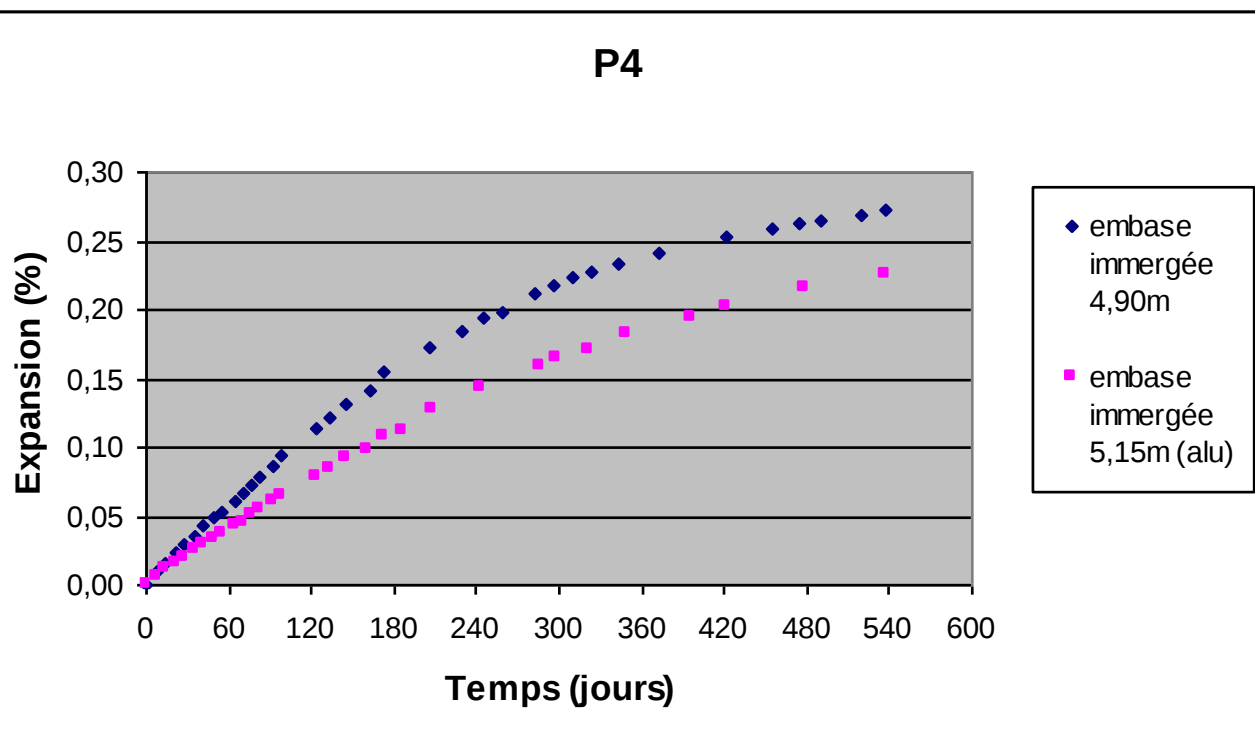
Pile P3 – embase – immergée (5,0 – 5,2 m)

Les essais d'expansion résiduelle sur carottes



Pile P4 – embase – marnage (1,8 – 2,0 m)

Les essais d'expansion résiduelle sur carottes

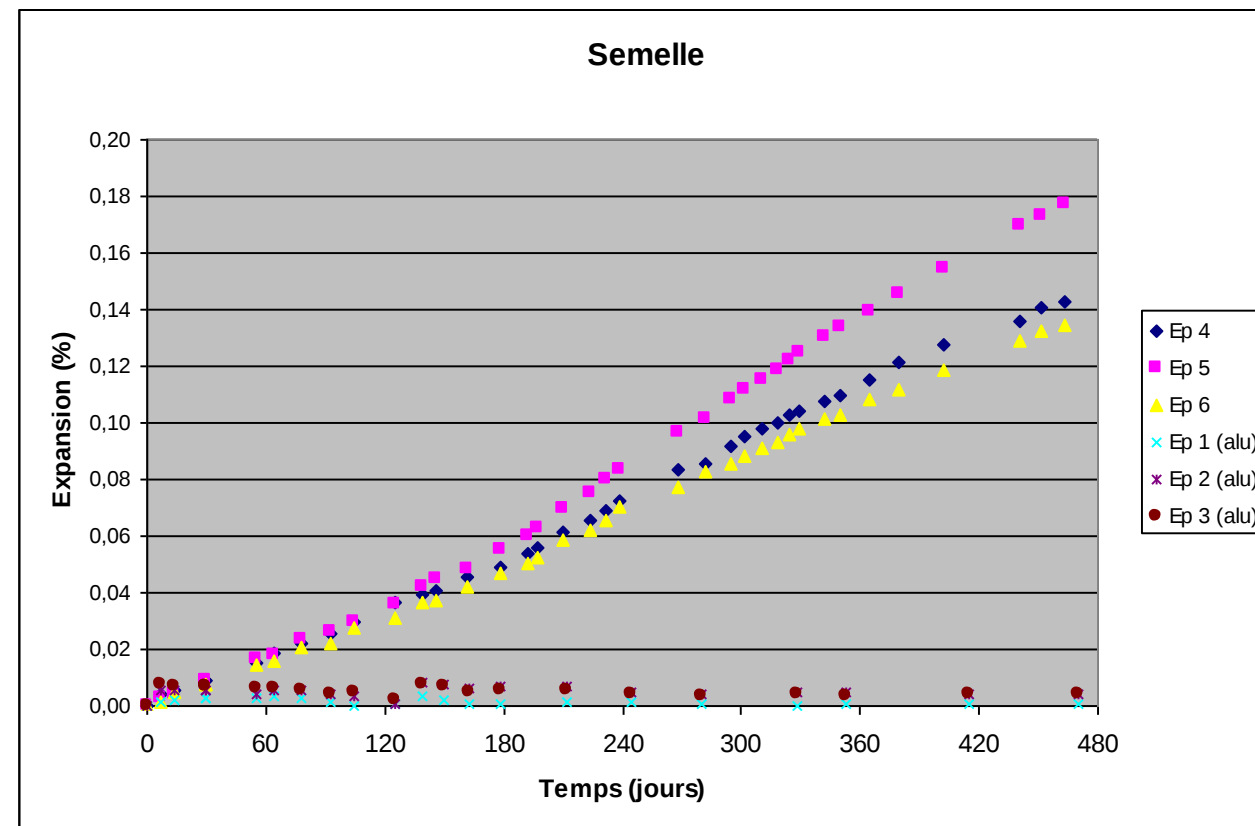
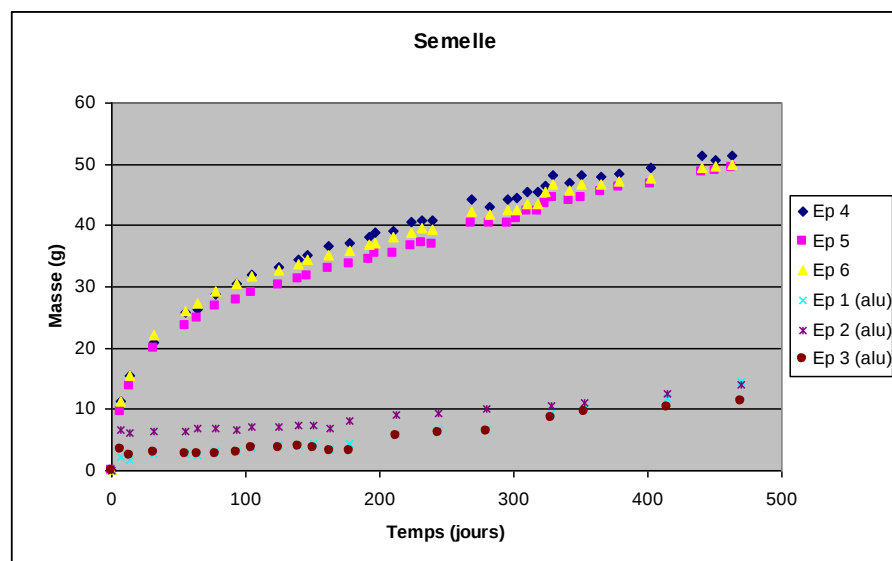
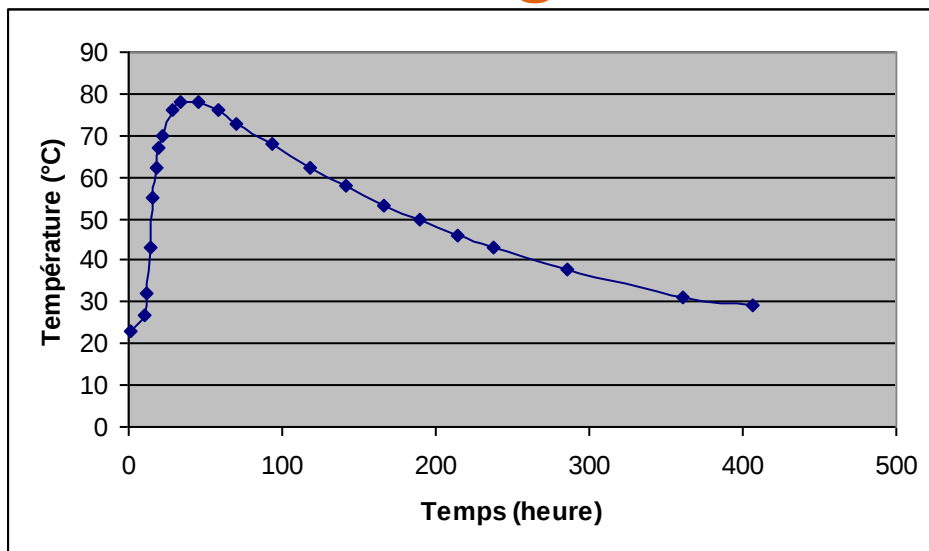


Pile P4 – embase – immergée (4,9 – 5,1 m)

Les essais de gonflement sur formule reconstituée du béton

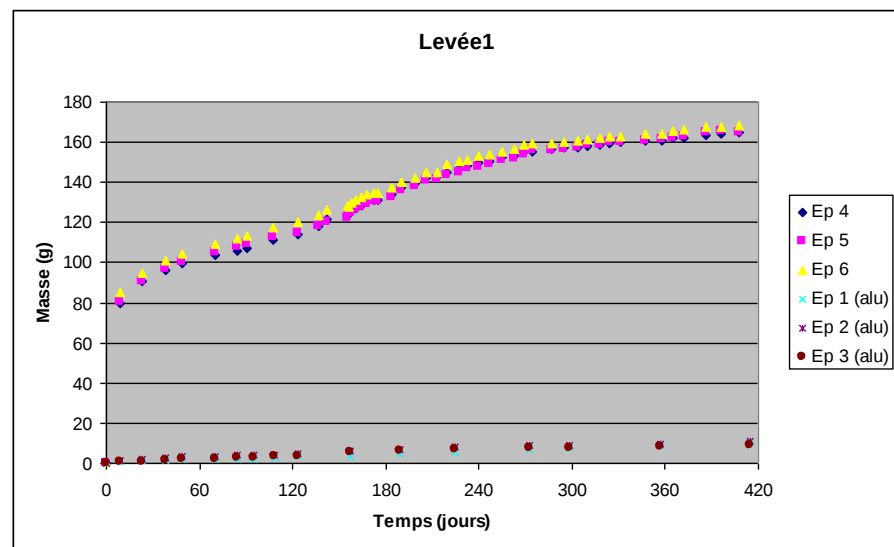
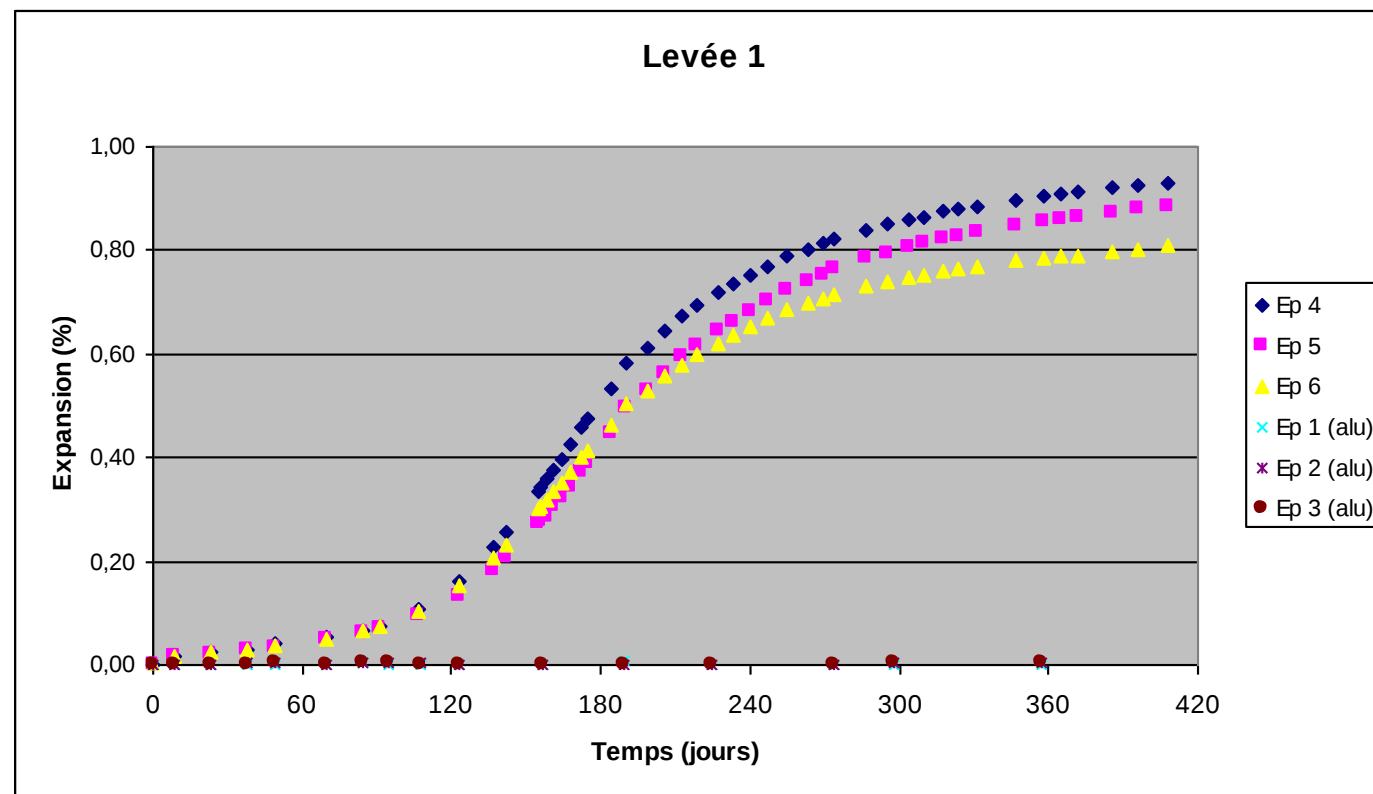
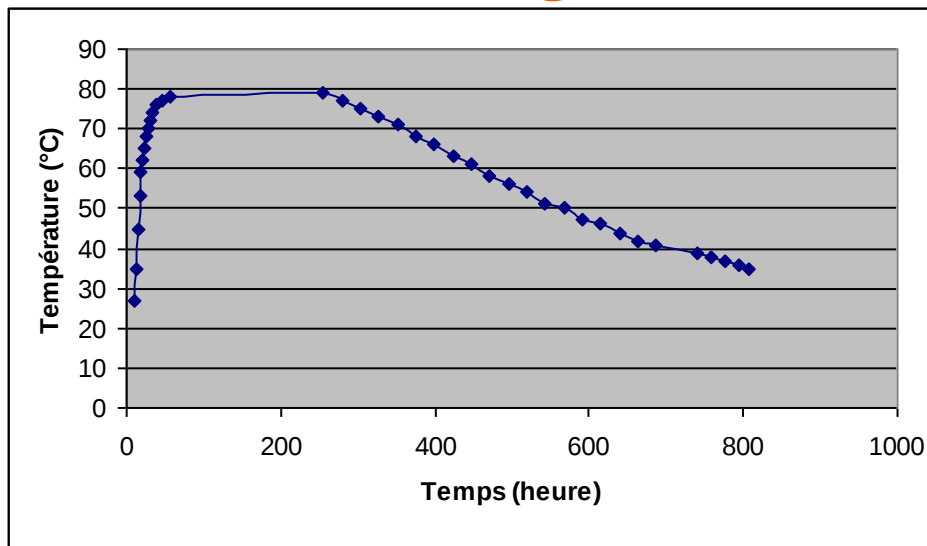
- Confection d'éprouvettes 11 x 22 cm
- Formulation des bétons
 - ❑ Granulat 0/4 CADS Chalon/Saône 730 kg
 - ❑ Granulat 4/12 SGB Lays/Doub 376 kg
 - ❑ Granulat 12/20 SGB Lays/Doub 700 kg
 - ❑ Ciment de Rochefort CEM I 52,5 N 400 kg
 - ❑ Adjuvant CIMPLAST 115 AXIM 1 kg
 - ❑ Eau 180 l
- Simulation dans une enceinte thermique de l'échauffement des bétons de la semelle et de l'embase et de l'entretoise.

Les essais de gonflement sur formule reconstituée du béton



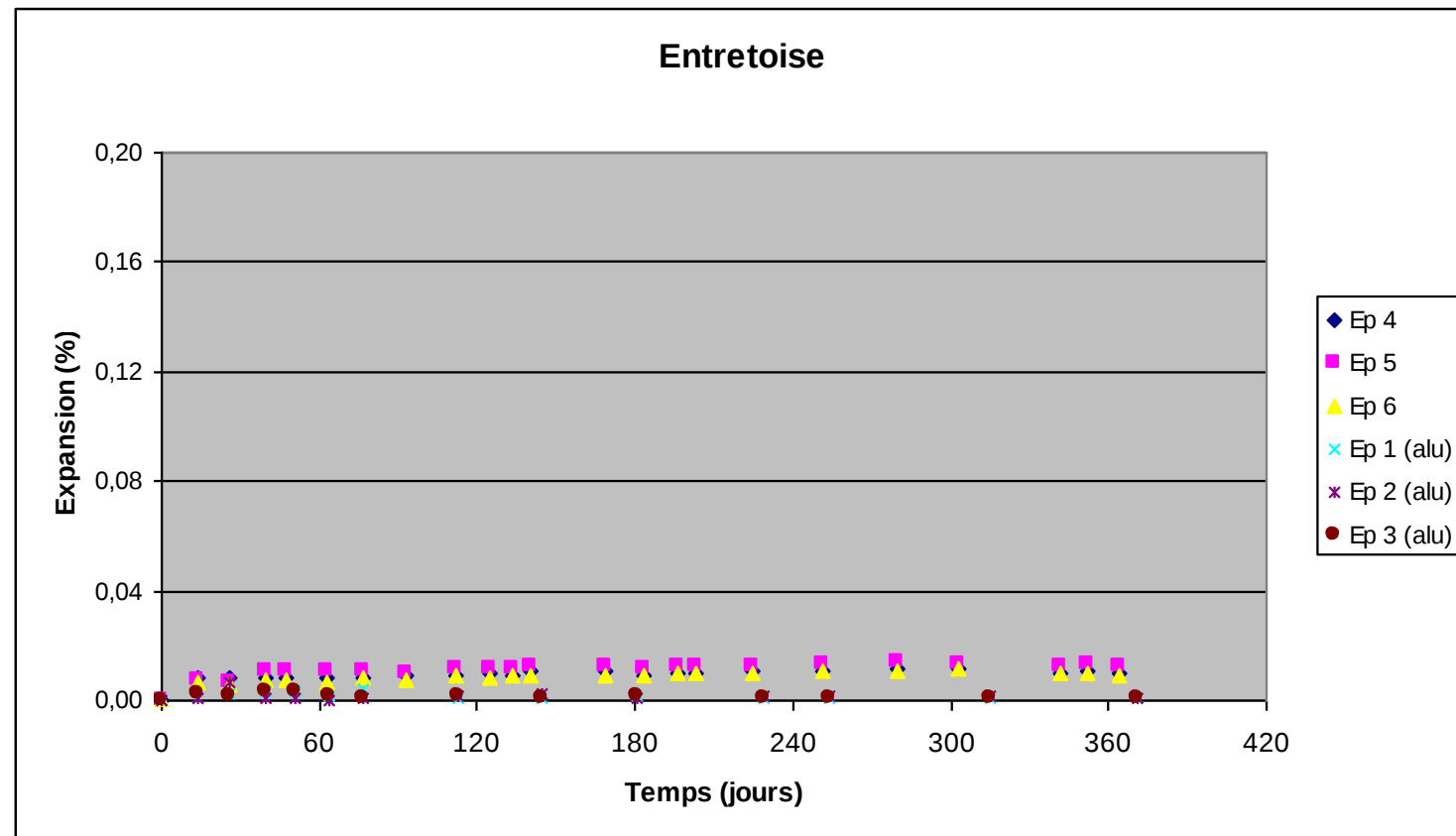
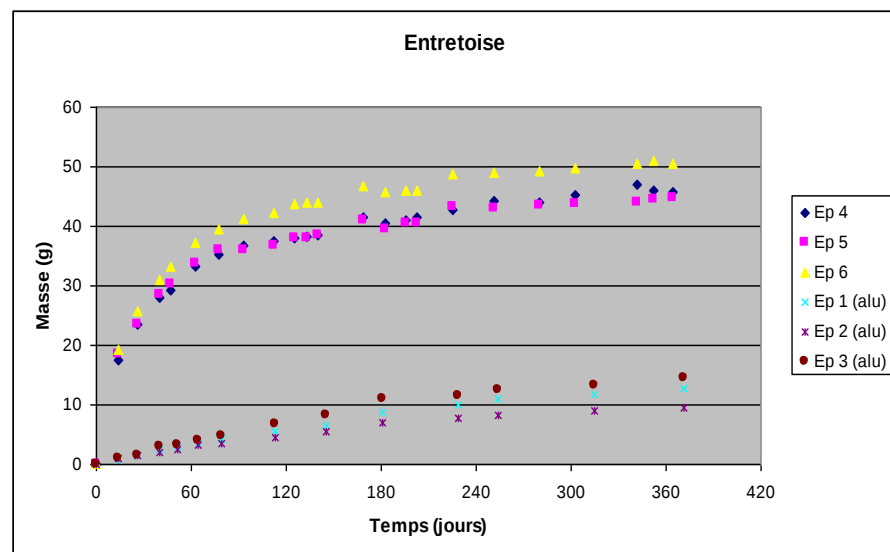
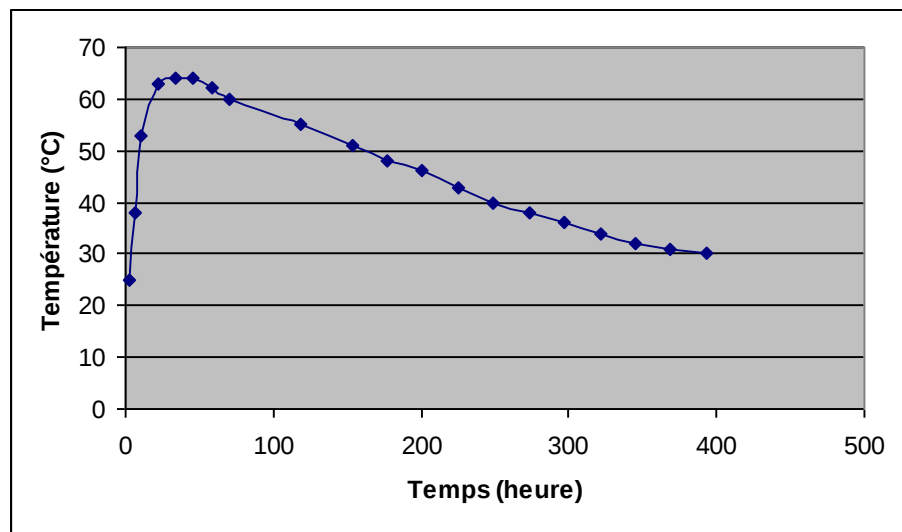
Essai de gonflement
total - semelle

Les essais de gonflement sur formule reconstituée du béton



Essai de gonflement
total - embase

Les essais de gonflement sur formule reconstituée du béton



Essai de gonflement
total - entretoise

Les essais de compression sur carottes : résultats

Résistance moyenne en compression mesurée sur **éprouvettes prélevées après essai de gonflement** :

P3 : Embase : 47 MPa
 Semelle : 61 MPa
 Massif : 42 MPa

P4 : Embase : 47,5 MPa
 Semelle : 46,5 MPa
 Massif : 37,5 MPa

Résistance moyenne en compression mesurée sur **éprouvettes reconstituées après essai de gonflement** :

Embase : 17 MPa
Entretoise : 54 MPa

Les essais de gonflement sur carottes : conclusions

Massifs en gros béton : Aucun gonflement des éprouvettes prélevées

- Confirmation du diagnostic de non-réactivité
- Partie à conserver

Entretoises inférieures : Aucun gonflement des éprouvettes de béton reconstitué

- Confirmation du diagnostic de non-réactivité
- Partie à conserver

Embases : Fort gonflement des éprouvettes prélevées :

- Confirmation du diagnostic de réactivité (0,35 %)
- Très fort gonflement des éprouvettes reconstituées (0,90 %)

Le béton de l'embase (en condition libre) a donc une expansion résiduelle égale à environ 40 % du gonflement total (0,35 / 0,90).

Les essais de gonflement sur carottes : conclusions

Embases : Pour pouvoir estimer l'expansion future de l'ouvrage, nous avons fait l'hypothèse que le rapport gonflement résiduel / gonflement total du béton dans l'ouvrage est égal au rapport gonflement résiduel / gonflement total du béton mesuré sur éprouvette en gonflement libre.

Gonflement transversal actuel de l'embase = 0,1 % (soit 60 % du gonflement total)

Gonflement total futur = 0,17 %, arrondi à 0,2 % pour tenir compte d'un assouplissement de la structure (valeurs prises en compte dans les calculs par éléments finis du pylône)

Si la protection permet de ralentir l'évolution des désordres, elle ne permet pas de les arrêter : gonflements résiduels mesurés de 0,10 % sur éprouvettes prélevées protégées

L'eau contenue dans le béton de l'embase (immergée et fissurée) permet d'alimenter la réaction

La protection n'empêche pas l'eau de remonter par le dessous (par la semelle et par capillarité)

Difficulté de mise en œuvre et réfection régulière...→ **Protection non recommandée...**

Les essais de gonflement sur carottes : conclusions

Semelles : Absence de pathologie globale (mais avec difficulté d'observation des fissures éventuelles à cause des palplanches...), mais existence de sites localisés d'ettringite différée

Gonflement des éprouvettes prélevées :

P3 : 0,01 %

P4 : 0,14 % - 0,01 %

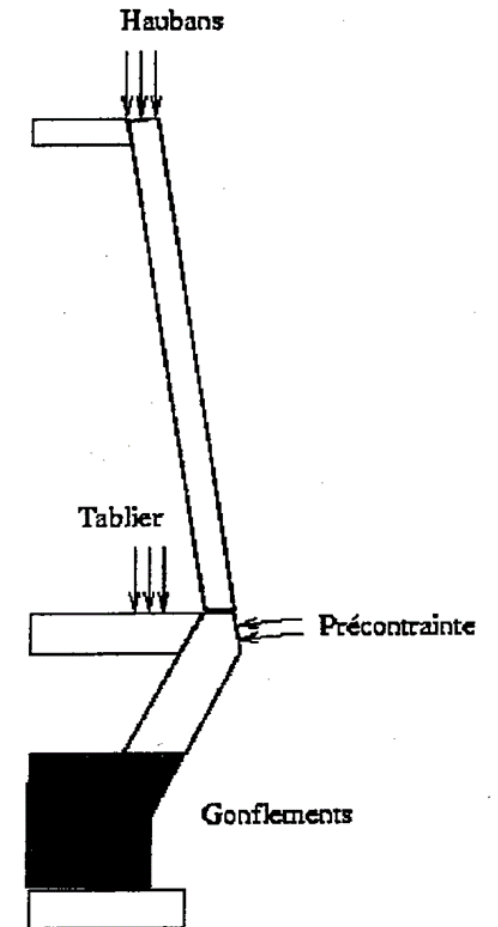
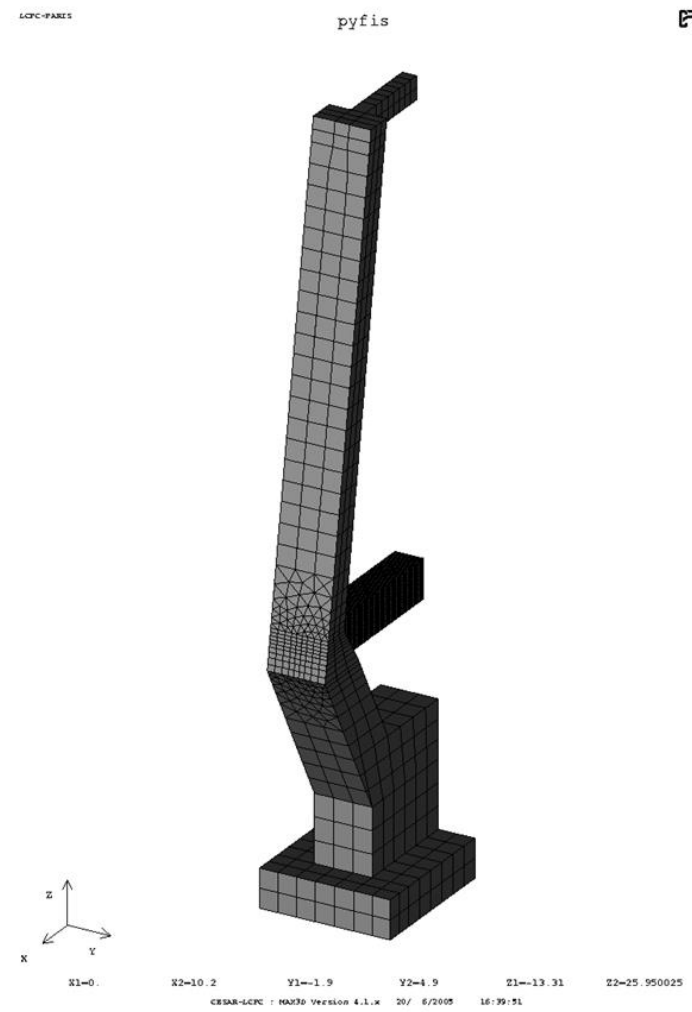
Gonflement des éprouvettes reconstituées :

0,14 % - 0,18 % - 0,14 % à 463 jours, non stabilisé

Hypothèse du cinétique lente, avec gonflements futurs possibles → Nous recommandons aussi de traiter les semelles.

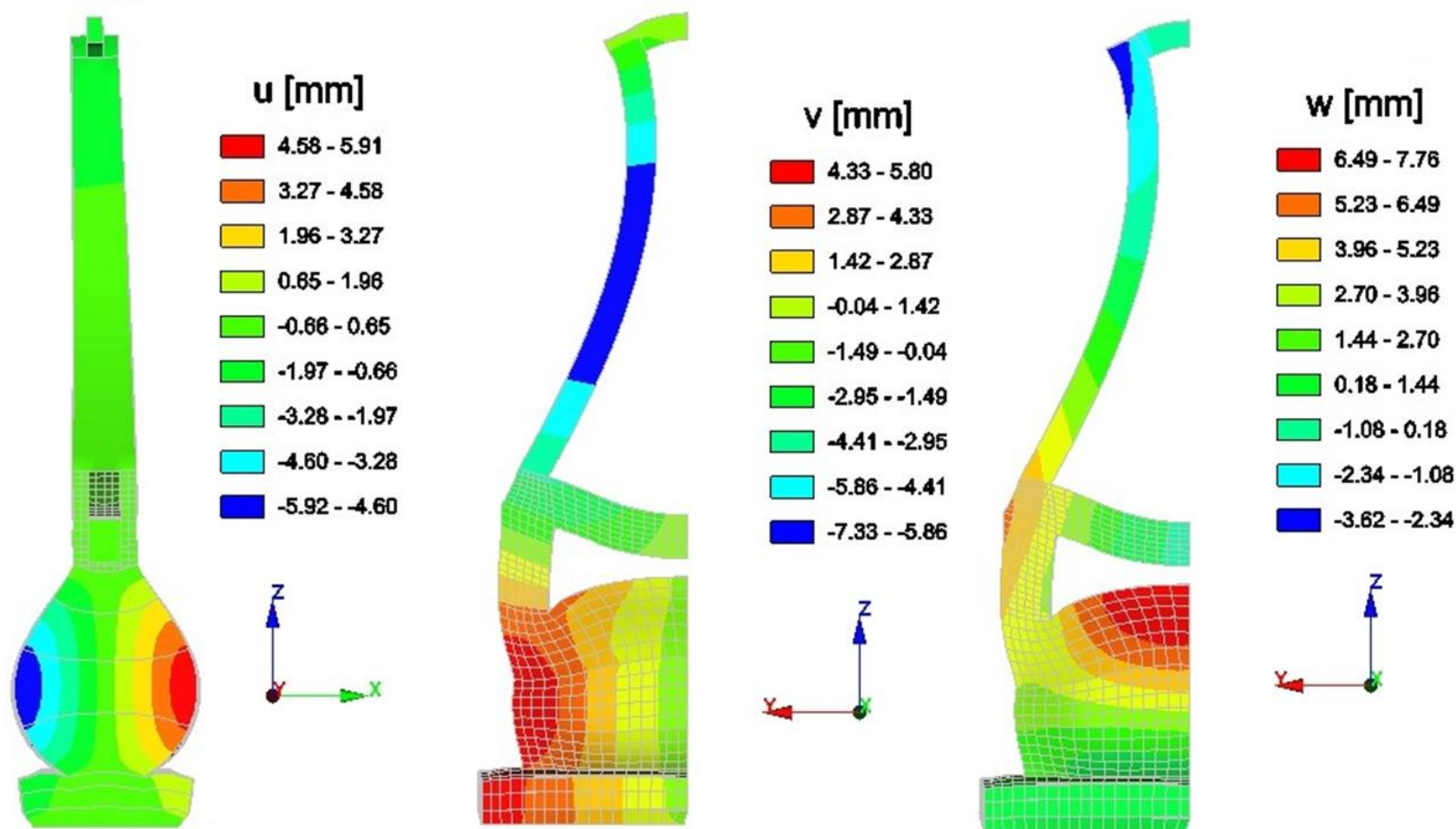
Le recalcul par éléments finis avec CESAR-LCPC (par JF Seignol)

- **Objectif : vérifier le comportement de l'entretoise et de sa fissuration**
- Éléments béton : hexaèdres à 20 nœuds
- **Entretoise :**
 - Pas de discrétisation de 10 cm environ
 - Béton : linéaire élastique isotrope
 - Aciers : éléments de barre à deux nœuds à comportement élastique
 - fissures observées modélisées à l'aide d'éléments de contact placés tous les 60 cm le long de l'entretoise et positionnés sur 80 % de la hauteur
- **chargement simulant la RSI** introduit comme une déformation imposée suivant les trois directions (0,1 % actuel – 0,2 % à la fin)



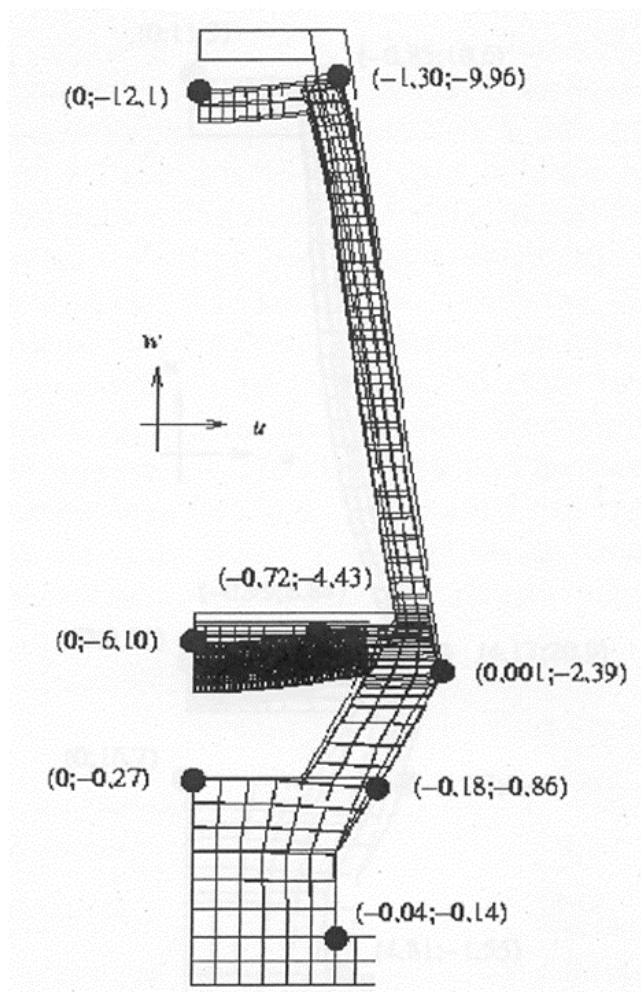
Chargements appliqués sur le pylône

Le recalcul par éléments finis : Déformations

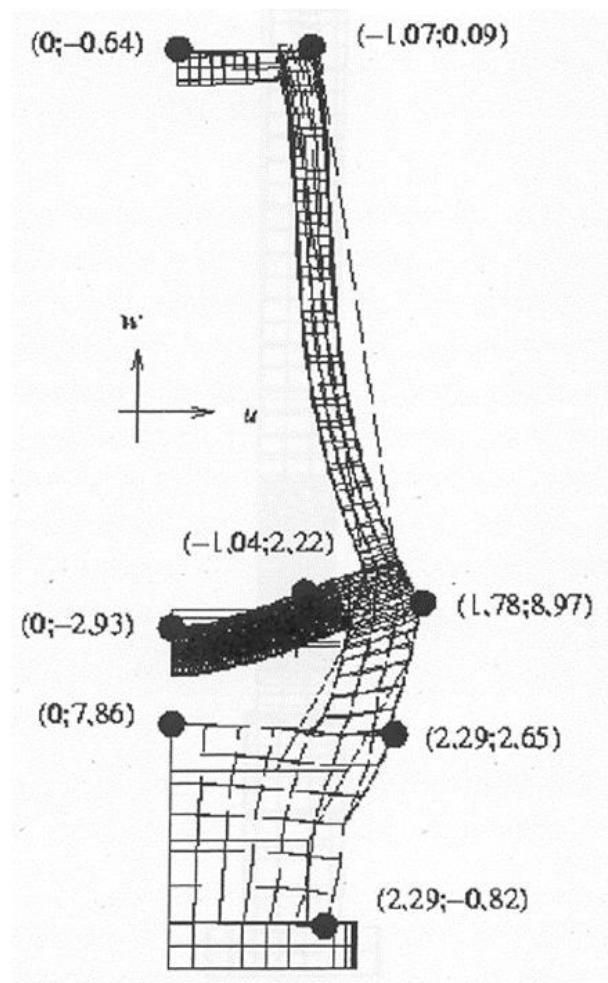


A l'état actuel

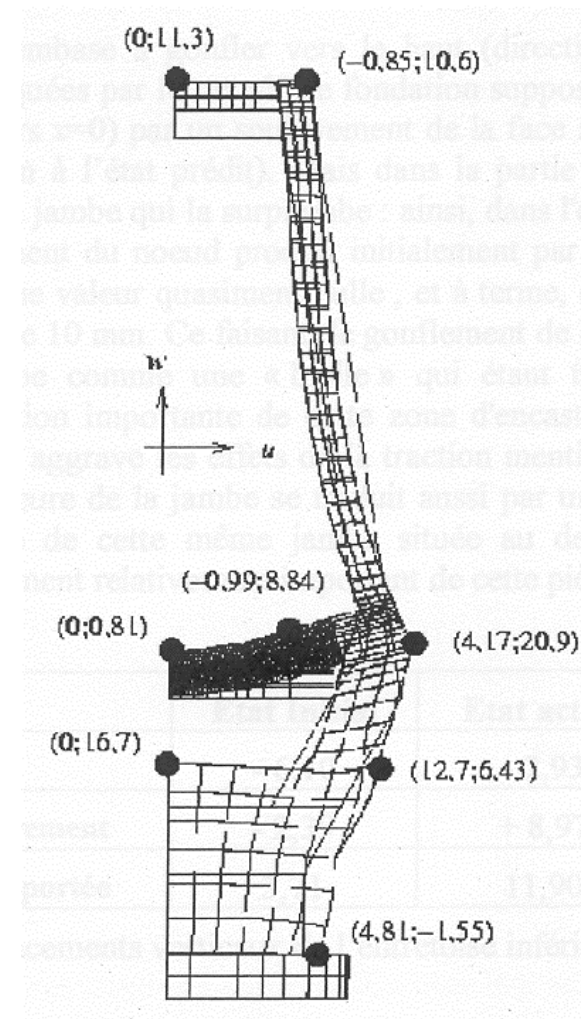
Le recalcul par éléments finis : Déformations à l'ELU (mm)



Sous chargement initial



A l'état actuel



A l'état prédit

Le recalcul par éléments finis : Contraintes ELS dans les aciers de l'entretoise

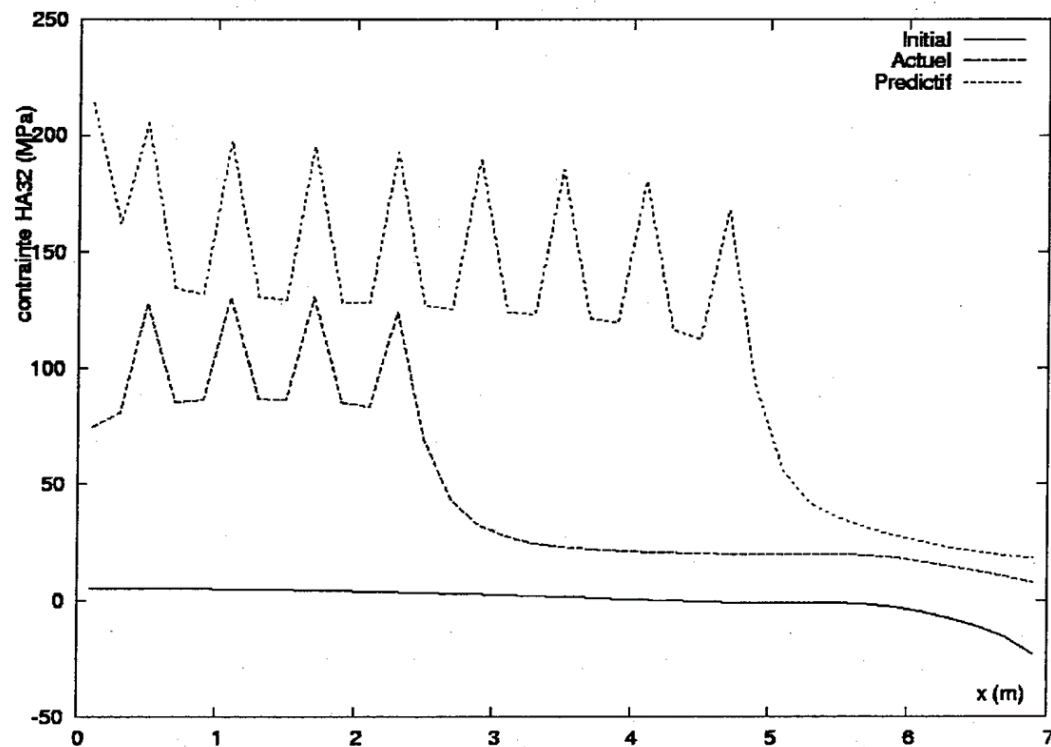


Figure 13 : Contraintes dans les armatures basses HA 32 de l'entretoise inférieure à l'ELS

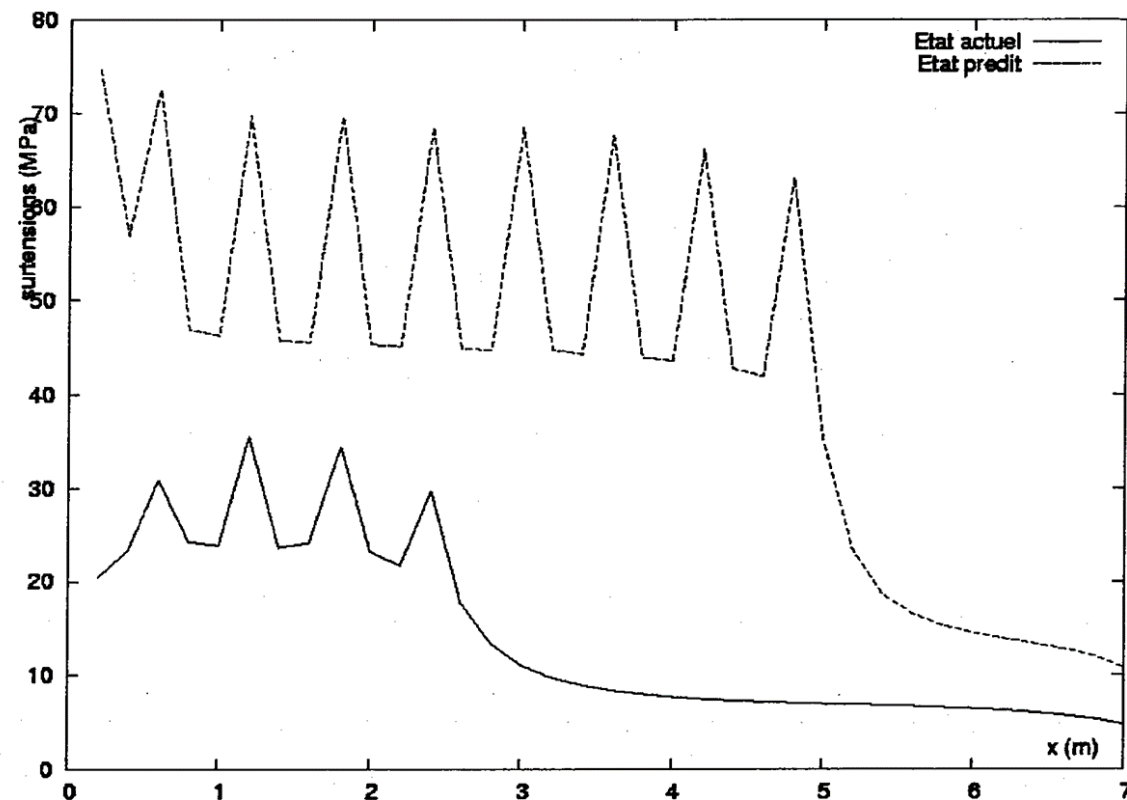
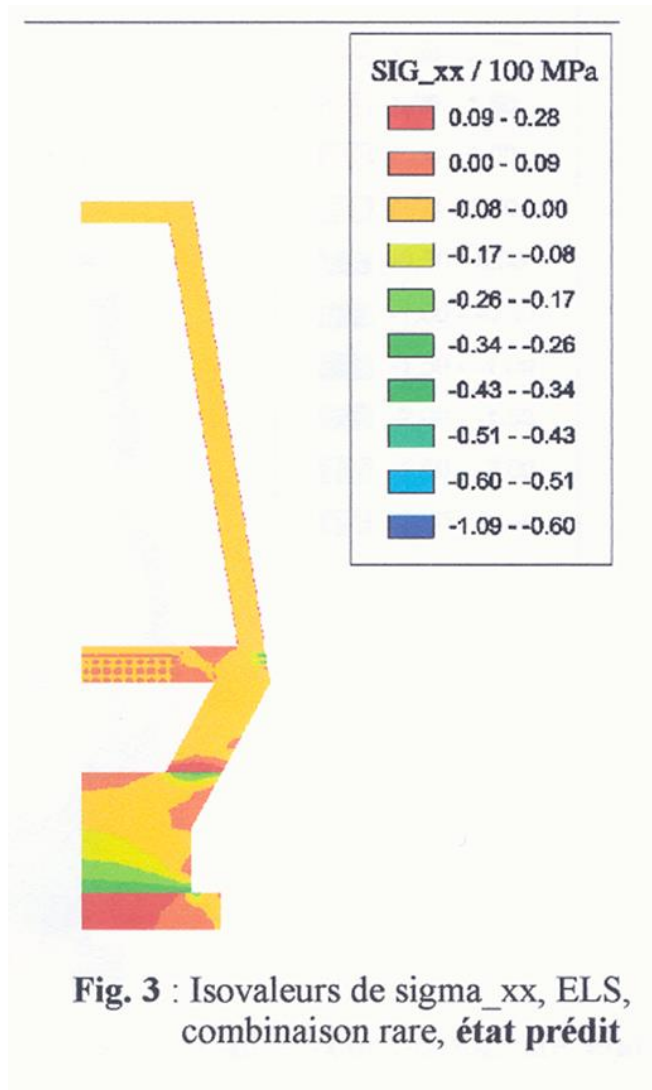
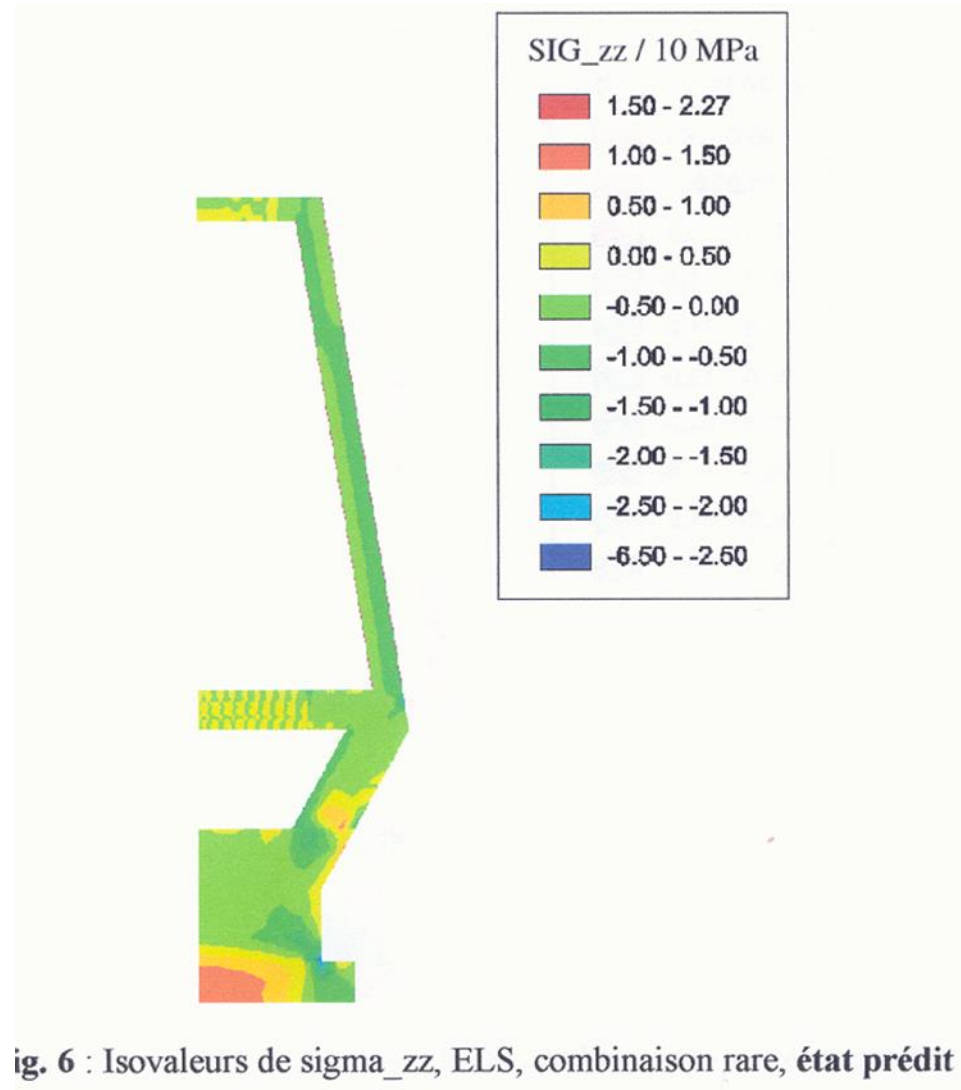


Figure 15 : Surtensions dans les câbles bas de précontrainte de l'entretoise inférieure à l'ELS

Le recalcul par éléments finis : Isovaleurs de contraintes à l'ELS



Contrainte Horizontale



Contrainte verticale

Le recalcul par éléments finis : Conclusions (2005)

- Importants effets de la RSI sur l'ensemble de l'ouvrage (en déformations et en déplacements)
- Modification non négligeable du fonctionnement de la structure.
- Fissures présentes actuellement en fibre inférieure de l'entretoise expliquées par les résultats de nos calculs : ouverture d'environ 0,2 mm proche de celle observée
- Ouverture des fissures dans l'entretoise inférieure directement imputable à la réaction de gonflement. A plus long terme, les calculs prédisent des ouvertures de 0,3 mm
- Surtensions dans les armatures de l'entretoise inférieure lors du développement de la RSI sont importantes : de l'ordre de 200 MPa pour les aciers passifs les plus sollicités
- En service et dans le futur, les aciers passifs atteindront quasiment leur limite de fonctionnement réglementaire → Vérifications en fatigue à faire...
- La RSI modifie de façon importante les champs de contraintes dans le reste du pylône, mais elle ne conduit pas à la mise en traction d'autres éléments que l'entretoise et la semelle
- La partie supérieure de la jambe du pylône subit une flexion notablement supérieure à celle prise en compte pour son dimensionnement, et la déformée du pylône sous l'effet de cette flexion devrait amener à effectuer des vérifications vis à vis de la stabilité de forme.

Evolution des connaissances sur la RSI depuis l'expertise du pont de Bourgogne

- Le pont de Bourgogne a grandement fait avancer les connaissances sur la RSI...
- Depuis sa découverte en France en 1997 (pont d'Ondes), plusieurs thèses ont permis d'aboutir aux recommandations provisoires du LCPC en 2007.
- Depuis 2007, plus aucun nouveau cas de RSI n'est apparu en France
- Par contre, on découvre de nouveaux cas d'ouvrages malades construits avant 2007 : environ 100 à 150 cas, essentiellement des ponts et des barrages, souvent des pièces massives, mais aussi des poutres de PRAD...
- En 2017, publication des Recommandations définitives IFSTTAR pour prévenir la RSI (version anglaise disponible).
- Réaction plus nocive que l'alcali-réaction...
- Pas de solution fiable et pérenne de réparation : traitement de protection recommandé pour éviter le contact avec l'eau et l'humidité....
- La RSI peut apparaître dans un béton soumis à échauffement, même très tardif (incendie, déchets nucléaires,...)

Evolution des connaissances sur la RSI depuis l'expertise du pont de Bourgogne

	Ondes	Bourgogne	Lodève	Bellevue	Beynost	Cheviré
Date de construction	1955	1990	1980	1988	1982	1988/89
Mois de bétonnage	08	08/09	08/09	08/09	08	07/08
Délai d'apparition des dommages (ans)	27	6	9	10	10	8
Environnement	Problème d'étanchéité	Immergé + marnage	Défaut de drainage	Immergé + marnage	Exposée aux intempéries	Pluies et capillarité
Tmax (°C)	80	79	80	80	69	75
Type et teneur en Ciment (kg/m3)	CEM I 430	CEM I 400	CEM I 400	CEM II/A 380	CEM I 350	CEM II/A 385
SO3 (%)	2.5	2.8	2.6	2.5	3.4	2.5
C3A (%)	11.2	8.2	9.8	7.0	10.4	7.0

Evolution des connaissances sur la RSI depuis l'expertise du pont de Bourgogne

- **Mécanisme de base :** Lorsque la température dépasse 65 °C lors de la prise, il se forme des monosulfates à la place de l'ettringite, et lors du refroidissement les monosulfates se transformant en ettringite expansive, en milieu humide, au sein d'un béton devenu rigide...
- **4 paramètres importants de la RSI :**
 - température atteinte au cœur de la structure (> 65 °C), et sa durée de maintien
 - Teneur en sulfate → limite SO₃ à 3 %
 - Teneur en aluminat → limite C₃A à 8 %
 - Teneur en alcalin → limite à 3 kg/m³

Rôle bénéfique des additions avec au moins :

20 % pour les cendres volantes
35 % pour les laitiers de haut fourneau
10 % pour la fumée de silice
20 % pour le métakaolin.