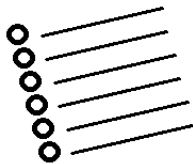




**Prise en compte de l'écaillage des
bétons à l'incendie dans les projets
de tunnels – par Maikel LOPEZ, Chef
de projet EFFECTIS**



SOMMAIRE



01 Le phénomène d'écaillage

04 Mesures de l'écaillage

02 Pour des ouvrages existant

03 Pour les ouvrages en projet



01

LE PHÉNOMÈNE D'ÉCAILLAGE

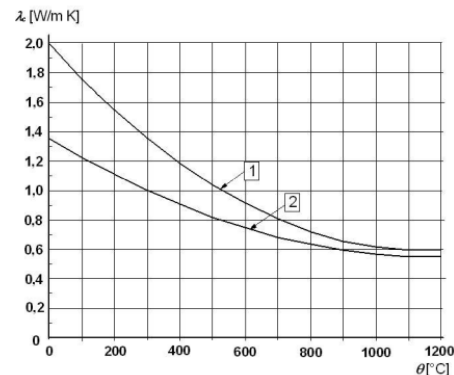
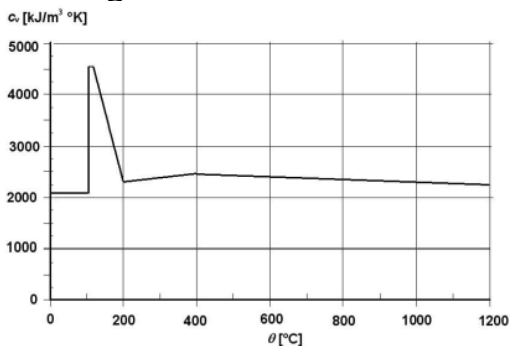
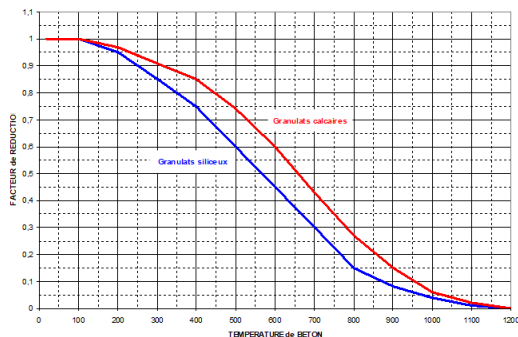
Béton et température

Principales caractéristiques thermiques



🔦 Le béton est à la base un produit de construction inerte (et incombustible), plutôt robuste, avec une forte inertie thermique et offrant de bonnes propriétés à la compression

- Masse volumique : $\sim 2\,400\text{ kg/m}^3$
- Conductivité thermique : $\sim 1,6\text{ W/m.K}$
- Capacité thermique spécifique : $\sim 920\text{ J/kg.K}$



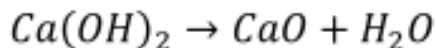
Béton et température (suite)

Températures caractéristiques

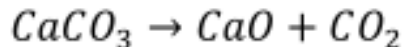
🔊 Pourtant :

- **A partir de 100°C** évaporation d'abord de l'eau libre
puis la déshydratation des hydrates de gel CSH (Silicate de calcium hydraté) contenant l'eau liée se produit progressivement entre 100°C et 600°C (induit une perte de masse importante)

- **Entre 450 °C et 550°C** décomposition de l'hydroxyde de calcium (portlandite) en chaux libre



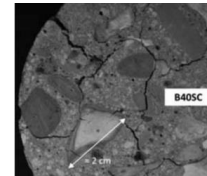
- **A partir de 700°C jusqu'à 900 °C** décomposition des hydrates (les carbonates de calcium se décomposent en chaux libre et en gaz carbonique)



- En phase de refroidissement, la chaux (CaO) formée au cours de l'échauffement peut réagir avec l'humidité de l'air et régénérer de la portlandite entraînant une augmentation de la fissuration du béton (augmentation du volume de 44%)
- + valeurs de températures caractéristiques des armatures acier (cf. diapo suivante)

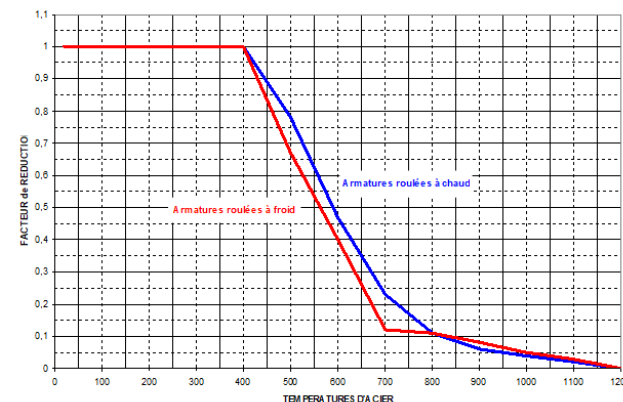
Béton et température (suite)

Comment se manifeste le phénomène d'écaillage ?



🔥 Et en situation d'incendie lorsque le béton monte trop rapidement en température :

- il se dilate
- l'eau qu'il contient **cherche à s'échapper**, ce qui génère des pressions interstitielles
- des contraintes thermiques se développent et provoquent son **éclatement** sur une profondeur plus ou moins importante (qq cm)
 - réduisant la capacité portante de la matrice d'une part
 - et mettant potentiellement à nus les aciers d'armatures d'autre part (notion d'épaisseur sacrificielle)
- phénomène se produisant dans les 30 minutes après exposition à une sollicitation thermique très forte



Béton et température (suite)

Illustration



Acier et température

(Températures forfaitaires usuelles pour mémoire)

- 🔥 350 °C pour les éléments de classe 4 (« élancement important »)
- 🔥 400 °C début de la perte de résistance des éléments classiques
- 🔥 500 °C Isotherme courante (~25% de réduction de la performance)

Possibilité de monter les valeurs,
par détermination de la température critique fonction
du chargement et du système constructif
(formes, nuances, taux de chargement, etc.)



Principaux paramètres d'influence de l'écaillage

🔊 La teneur en eau du béton

- une augmentation de la teneur en eau augmente le risque d'écaillage et son importance

🔊 La perméabilité du béton :

- les bétons disposant d'une certaine quantité de fibres de **polypropylènes (PP)** présentent par exemple un éclatement moindre, à même composition,
- en revanche, les **Bétons à Hautes Performances (BHP)** montrent une propension à l'écaillage plus importante que les bétons ordinaires

🔊 La nature du granulat et sa taille

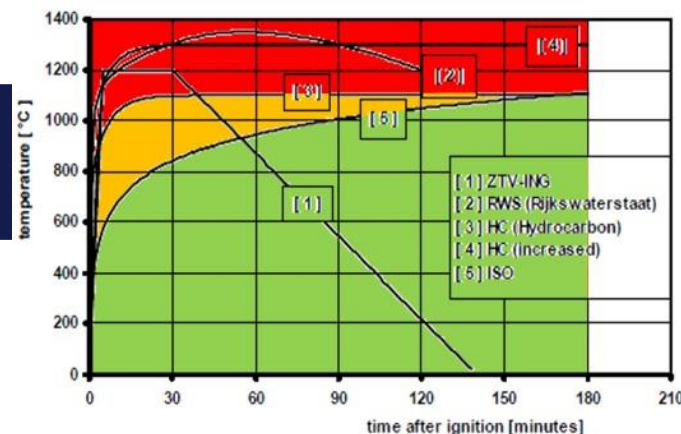
🔊 Le chargement appliqué et les dilatations empêchées

🔊 Le scénario d'échauffement

Quelques mots sur le scénario d'échauffement (terme source)

Que disent les textes réglementaires de référence tunnels :

- **En routier l'IT Mt Blanc** indique (§4.2.3) :
 - « Dans l'état actuel des modélisations numériques, le calcul ne pourra être utilisé seul pour justifier une structure en béton lorsqu'il y a risque d'éclatement de celui-ci. *Ce risque existe systématiquement lorsque la courbe HCM est utilisée et peut exister lorsque la courbe CN est utilisée avec des bétons à hautes performances.* »
- **En ferroviaire IT 98-300** stipule (§2.2.1.3) pour les Tunnels autorisés au transit des matières dangereuses
 - « Dans le cas des tunnels visés au 3^{ème} alinéa du point 2.2.1.1. et autorisés au transit des matières dangereuses, la résistance au feu des éléments de structure est vérifiée, quels que soient les matériaux utilisés, en utilisant à la fois
 - la courbe ISO 834 pendant une durée maximale de quatre heures,
 - la courbe hydrocarbure pendant une durée maximale de deux heures; *il y a lieu alors de s'assurer du non éclatement du béton. Si celui ci n'est pas garanti, la justification de la résistance au feu sera apportée par la réalisation d'essais* »



02

POUR LES OUVRAGES
EXISTANT



Prise en compte de l'écaillage sur l'existant

Méthodes

🔊 Méthode 1 : « ingénierie incendie »

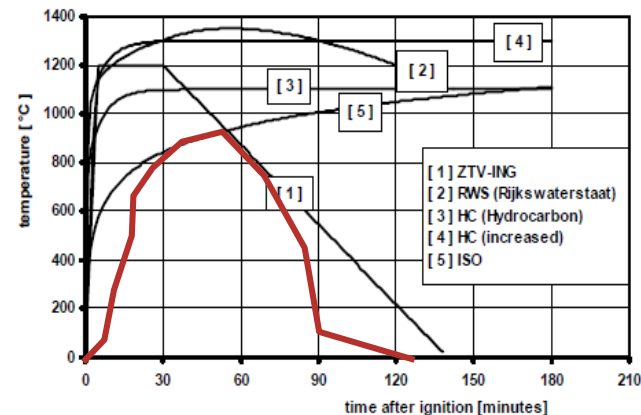
- études des scénarios d'incendie possibles (courbes réglementaires ISO ou termes sources ISI?)
- définition à la carte des sollicitations thermiques (utilisation de sollicitations atténuées)
- avec ou sans prise en compte des SFLI (Systèmes Fixes de Lutte Incendie)

🔊 Méthode 2 : « protection feu »

- mise en œuvre d'un isolant thermique adaptée (PV? + ETAG ?)
 - plaques silico-calcaires,
 - flocages,
 - bétons projetés (attention à la mise en œuvre : Cf guides Asquapro et recommandations AFTES)
 - ...

🔊 Méthode 3 et 4 : « essai de tenue au feu »

- (cf. deux diapos suivantes)

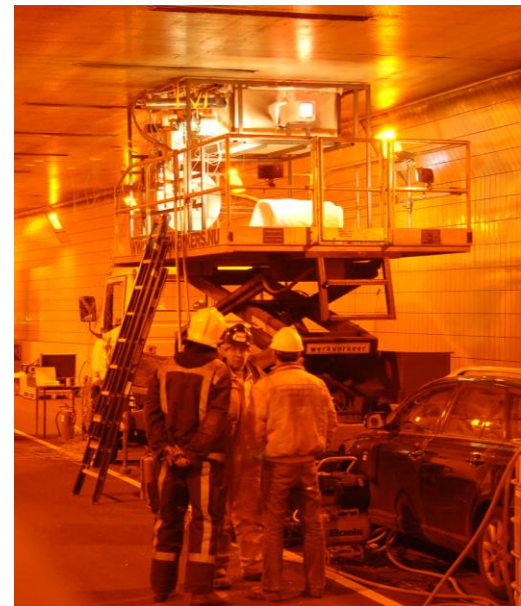


Prise en compte de l'écaillage sur l'existant

Essai in situ au four mobile

🔥 Méthode 3 : essai de tenue au feu in situ :

- Évite le prélèvement d'un échantillon sur site (ou sa réélaboration)
- Analyse du comportement à chaud d'un revêtement connu ou inconnu sous différentes courbes de feu (ISO, HCM, RWS, etc. ou « à la carte »)
- Détermination de l'épaisseur sacrificielle à prévoir dans les calculs de tenue au feu des structures
- Déploiement et exécution rapide (même de nuit)
- Permet de tenir compte directement des variables d'environnement difficiles à reproduire en laboratoire (contraintes, géométries, vieillissement, etc.)



Prise en compte de l'écaillage sur l'existant

Essai in situ au four mobile (illustration)



Avant



Pendant



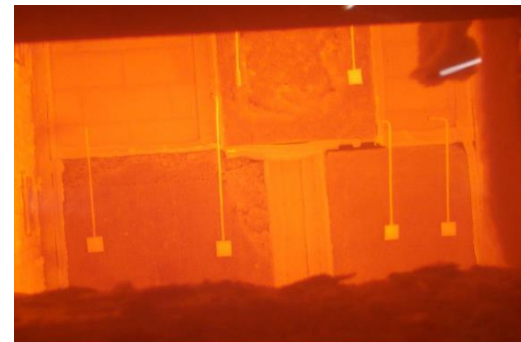
Après

Prise en compte de l'écaillage sur l'existant

Essai en laboratoire

🔥 Méthode 4 : essai de tenue au feu en laboratoire

- Nécessite, soit :
 - de faire un prélèvement sur site (intervention et logistique lourde)
 - d'utiliser un échantillon représentatif coulé à l'époque et disponible...
 - de réélaborer la recette de l'époque...
- **+ mise en œuvre d'un processus similaire à un projet neuf**
(démarche longue et couteuse avec études techniques des paramètres d'essai)
cf. diapos suivantes

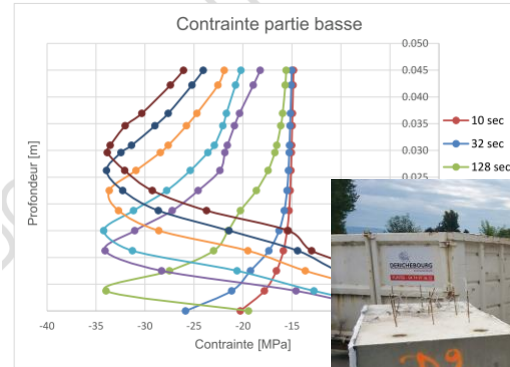


03

POUR LES OUVRAGES
EN PROJET

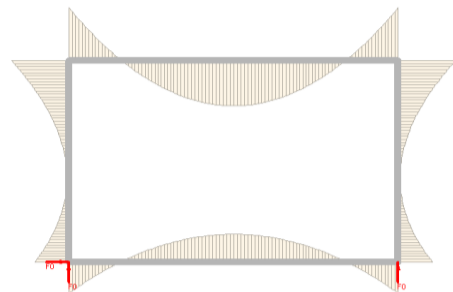
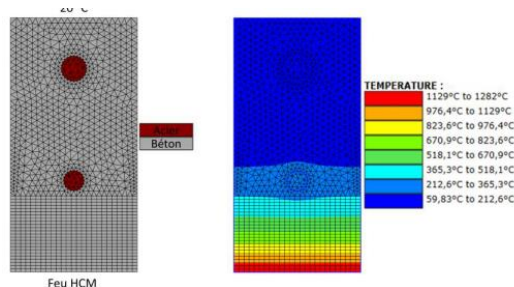
Un processus (en théorie) en 3 items

- 🔥 Item 1 : études préalables
- 🔥 Item 2 : essais dits « de sélection »
- 🔥 Item 3 : essais dits « de convenance »



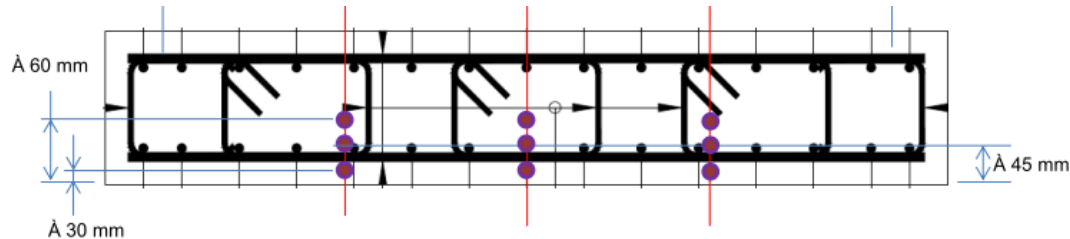
Item 1 : études préalables

- 🔥 Études « à froid » de l'ouvrage (=donnée d'entrée)
- 🔥 Sélection des sections caractéristiques en fonction des niveaux contraintes déterminées par les calculs
- 🔥 Études « à chaud » de l'ouvrage (selon programme thermique adapté : HCM, HC, ISO, RMW, etc.)
- 🔥 Définition des paramètres d'essai (représentativité & sécurité de l'essai) :
 - dimensions des corps d'épreuve
 - scénario et modalités de chargement
 - plan d'instrumentation



Item 2 : essais de sélection

- 🔗 Réalisation de tests préalables de plusieurs formulations de béton sous forme de dallettes ou comparer leur comportement
- 🔗 Démarche généralement abandonnée dans le cadre des projets



Item 3 : essais de convenance

- ⦿ Réalisation de tests sur des corps d'épreuve à grande échelle caractéristiques de la configuration étudiée à l'item 1



Éléments de planning

Anticiper...

		Février		Mars		Avril		Mai		Juin		Juillet		Août		Septembre																		
#	Étapes	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25	S26	S27	S28	S29	S30	S31	S32	S33	S34	S35	S36	S37
100	Item 1 : Etude des corps d'épreuve																																	
101	Réunion d'enclenchement																																	
102	Analyse des entrants																																	
103	Etude à chaud et paramètres d'essais																																	
104	Rédaction du protocoles des convenances																																	
200	Item 2 : Essais de selection																																	
	Sans objet																																	
200	Item 3 : Essais de convenance																																	
106	Approvisionnement échelles de Tc																																	
116	Fourniture des plans pour les convenances																																	
117	Installation Tc sur échelles pour les essais																																	
118	Instrumentation corps d'épreuve sur site client																																	
119	Coulage des corps d'épreuve																																	
120	Attente délai 90 jours total																																	
121	Préparation du four pour essais de selection																																	
122	Essai au feu <u>convenance N° 1</u>																																	
123	Essai au feu <u>convenance N° 2</u>																																	
124	Rédaction rapport d'écaillage																																	
125	Mise au rebut																																	

Page 1



04

Mesure de l'écaillage

Problématique de la mesure de l'écaillage après essai

Avant l'essai au feu



Peu après l'essai au feu

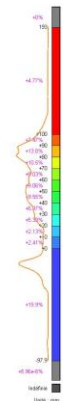
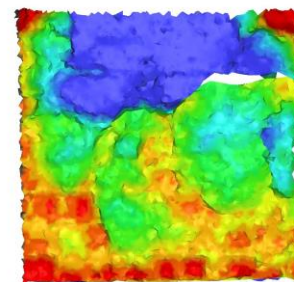
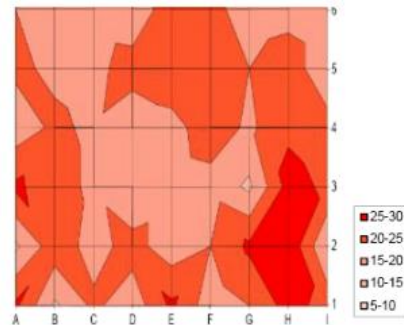


Encore quelques minutes après



Plusieurs méthodes de mesures possibles

- 🔦 Méthode manuelle
- 🔦 Méthode par scan 3D ou photogrammétrie
- 🔦 Méthode par thermocouples incrustés
- 🔦 Autres méthodes



Mesures manuelles



Outils :

- pied à coulisse
- mètre à ruban
- jauge de profondeur
- + carroyage (maillage ~10 cm)

Y6	1	4	2	3	4	8	9	4	8	6	5	8	6	3	5	5	5	7	9	8	7	3	6	9	8	8	8	11	9	10	12	13
Y5	4	8	4	0	6	5	5	3	4	7	2	4	5	3	0	7	6	4	6	3	7	4	7	9	7	11	2	4	9	8	11	10
Y5	5	5	4	1	5	3	0	2	7	4	6	2	5	1	4	6	7	5	1	1	4	1	4	4	6	6	8	4	7	7	1	9
Y4	3	4	2	1	5	2	2	1	0	0	5	4	3	0	2	4	4	5	6	3	0	0	4	6	2	4	3	4	2	7	6	11
Y3	1	7	6	0	1	0	3	2	3	7	4	4	2	1	2	4	3	3	2	4	5	2	5	6	6	2	7	4	4	10	12	7
Y2	6	3	5	1	3	2	6	2	5	0	5	3	4	2	4	7	5	4	7	5	6	2	5	7	7	7	8	4	1	10	6	6
Y1	4	5	8	0	4	1	4	2	2	2	6	2	5	0	0	4	6	2	3	5	10	2	5	8	7	10	7	7	7	6	6	12
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19	X20	X21	X22	X23	X24	X25	X26	X27	X28	X29	X30	X31	X32



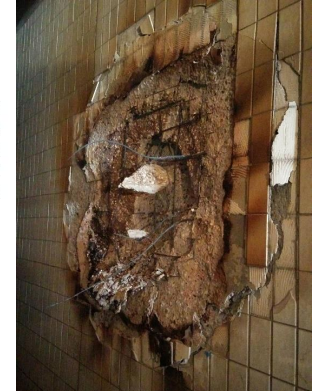
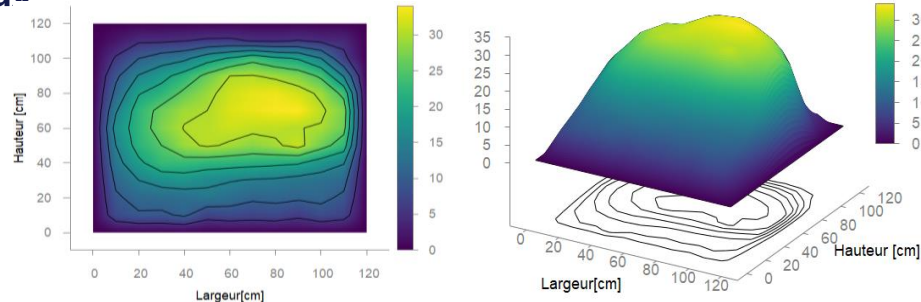
Nécessite d'attendre le refroidissement du corps d'épreuve



Travail pouvant être laborieux



Précision ~2 mm



Mesures par scan 3D



Outils :

- pied à coulisse,
- mètre à ruban,
- jauge de profondeur
- + carroyage (maillage ~10 cm)



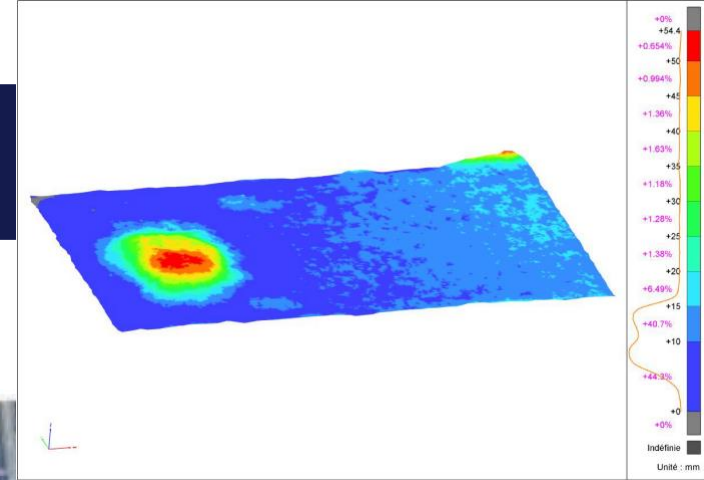
Nécessite d'attendre le refroidissement du corps d'épreuve



Couteux



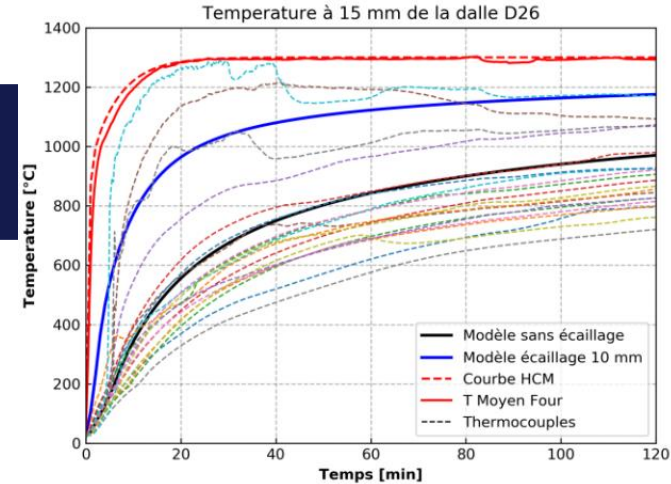
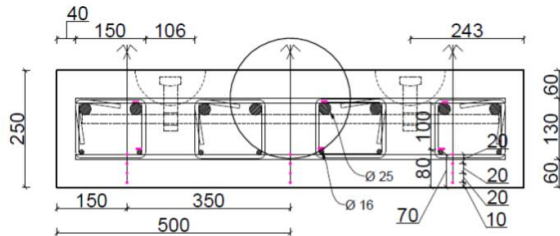
Précision $< 1 \mu\text{m}$



Méthode par thermocouples incrustés

- Principal intérêt
 - Permet d'avoir une mesure directe durant l'essai (pas besoin d'attendre le refroidissement)

- Mais :
 - Méthode non visuelle
 - Non plébiscité par le GT interlabo
 - Nécessite beaucoup de capteur pour être intéressante
 - // Possible perturbation de l'écaillage



Autres méthodes

- 🔥 Par caméra
- 🔥 Par onde sonore (ultrasons)
- 🔥 Par rayonnement ionique
- 🔥 ...

MERCI DE VOTRE ATTENTION

Avez-vous des questions ?

Pour tout renseignement, n'hésitez pas à nous
contacter

Suivez-nous | Contacter nous :



1972 - 2022

Efectis

*« Efectis est un acteur mondial de
l'incendie et couvre l'ensemble de
l'expertise en sécurité incendie en matière
d'essais et de modélisation, de certification,
d'inspection, de formation et d'expertise. »*