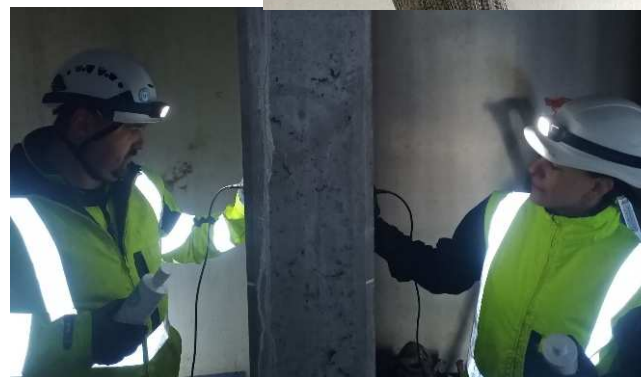
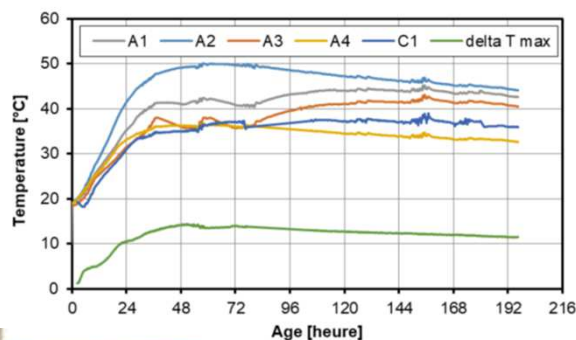


Maîtrise et Contrôle Qualité dans l'Exécution du Béton : Suivi, Diagnostic et Cas Pratique

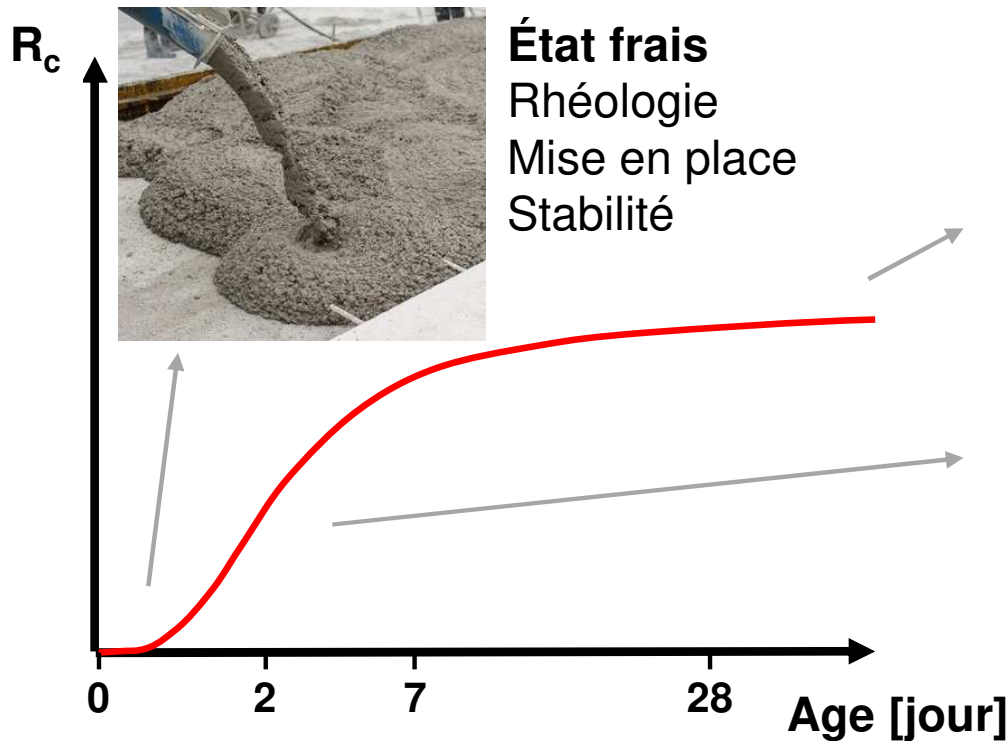


Exécution des structures en béton

Phase préliminaire : conception, dimensionnement, spécifications, planning...

➡ Intégration du contrôle qualité

Suivi des propriétés :



État durci
Défaut?
(vide/enrobage/...)
Réparation



Durcissement
Cure
Décoffrage
Maturométrie

Néanmoins en cas de problème d'exécution / imprévu, que faire ?

➡ Diagnostic ➡ Suivi / Quantification ➡ Solution

Origine des désordres / défauts

Erreurs de conception et de calcul

Défauts d'exécution (position des aciers, béton mal dosé, vibration...)

Accidents

Actions physico-chimiques

Internes
(composition du béton)

Externes
(climat, milieu agressif, charges...)



Réaction sulfatique interne

Chlorure (présent dans les granulats ou le ciment)



Réaction alcali-silice

Gel-dégel (interne / écaillage)

Réaction biologiques



Réaction sulfatique externe

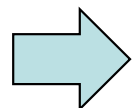
Chlorure (environnement marin / sels de déverglage)

Lixiviation

Carbonatation



Retrait/fluage



Les dégradations observées sur une structure en béton armé sont souvent une combinaison de plusieurs phénomènes.

Contrôle à l'état frais et durci

Température : **NIT 285 § 9.4.**

Tableau 9.4 Température minimale du béton lors de sa mise en place.

Type de temps	I	II	III	IV	V
Simple recouvrement (°C)	> 7	> 10	> 12	> 15	> 15
En cas de mise en place d'une protection isolante thermique, la température minimale peut être ramenée à (°C)	> 5	> 5	> 10	> 10	> 10

NIT 285 § 9.6. : $T < 25^{\circ} \text{C}$

Béton pompable : NIT 285 § 7.3.2.2

Consistance : S4

Temps d'ouvrabilité : 150 minutes

Prélèvement de cubes (R_c) : 2, 7, 28 et 56 J



Ou maturométrie

Fréquence : 1 prélèvement / 50 m³



Contrôle à l'état frais et durci

Si le slump n'est pas bon → camion rejeté

Si les résistances à la compression ne sont pas bonnes :

Aspect mécanique



Prélèvement in situ couplé à
des essais non-destructifs
NBN EN 13791
NBN EN 12504-1/2/3

Aspect de durabilité



essai
stat
ab



Nombre de volumes d'environ 30 m ³ dans la zone d'essai	Nombre minimal de carottes	Critère 1 : moyenne des résultats d'essai sur carottes au niveau des aires les plus proches de l'indice de rebondissement médian pour la zone d'essai ^(*) [MPa]	Critère 2 : résultat d'essai le plus faible sur carottes pour la zone d'essai ^(*) [MPa]
1	Une carotte à chacune des deux valeurs les plus faibles obtenues avec la mesure au scléromètre	-	$\geq 0,85 (f_{ck,spec} - 4)$
2 à 4	Trois carottes : une carotte à la valeur la plus faible obtenue avec la mesure au scléromètre pour la zone d'essai et une carotte au niveau de chacune des deux aires d'essai les plus proches de l'indice de rebondissement médian	$\geq 0,85 (f_{ck,spec} + 1)$	$\geq 0,85 (f_{ck,spec} - 4)$
5 à 6		$\geq 0,85 (f_{ck,spec} + 2)$	$\geq 0,85 (f_{ck,spec} - 4)$

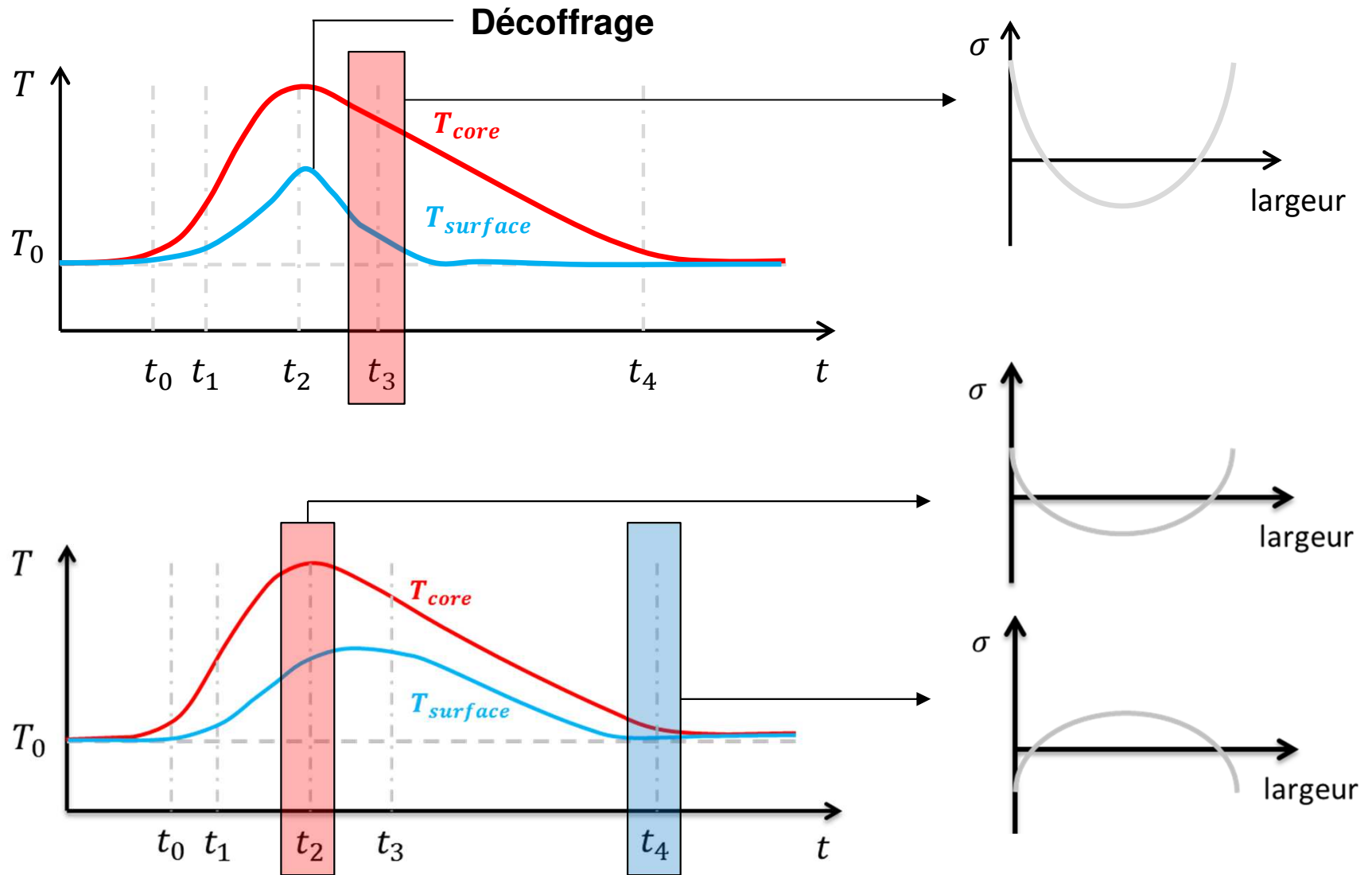


* moyennes au lieu de la

$$f_{ck} \neq f_{cm} \rightarrow f_{ck,is} = \min(f_{c,m(n)is} - k_n S; f_{c,is,lowest} + M)$$

Cure et protection du béton

Fissuration au jeune âge, origine thermique



Cure et protection du béton

Fissuration au jeune âge, origine thermique

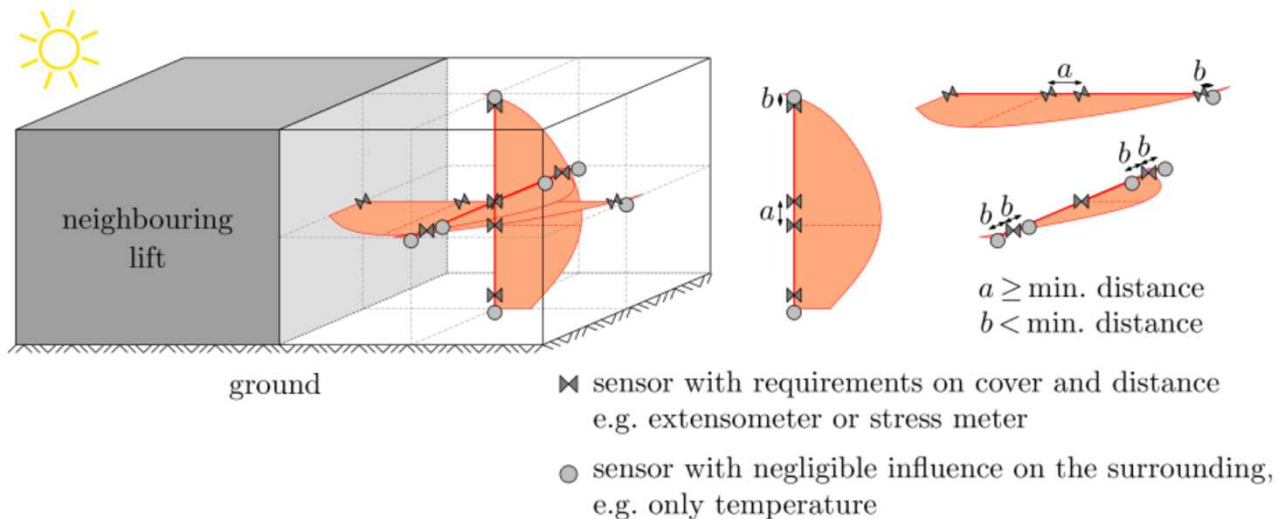
NIT 285 : § 9.5.2

$$T^{\circ} \text{ interne} < 65^{\circ} \text{ C (DEF)}$$

$$T_{\text{coeur}} - T_{\text{surface}} < 20^{\circ} \text{ C}$$

Prévention : type de ciment (LH), système de refroidissement interne, isolation, béton frais de faible température

Suivi de la température

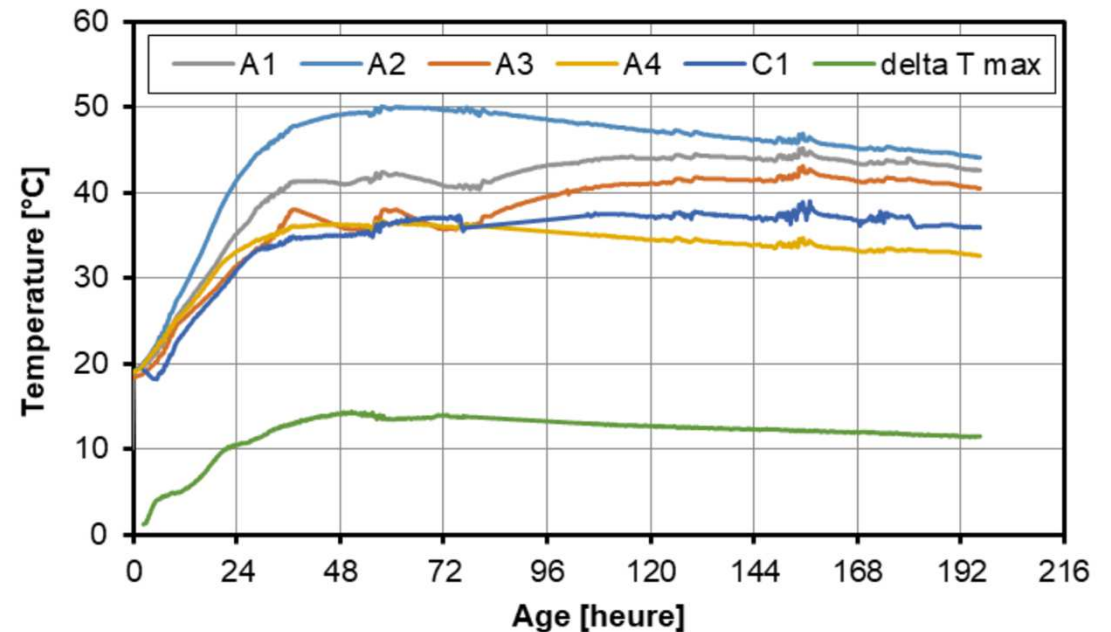
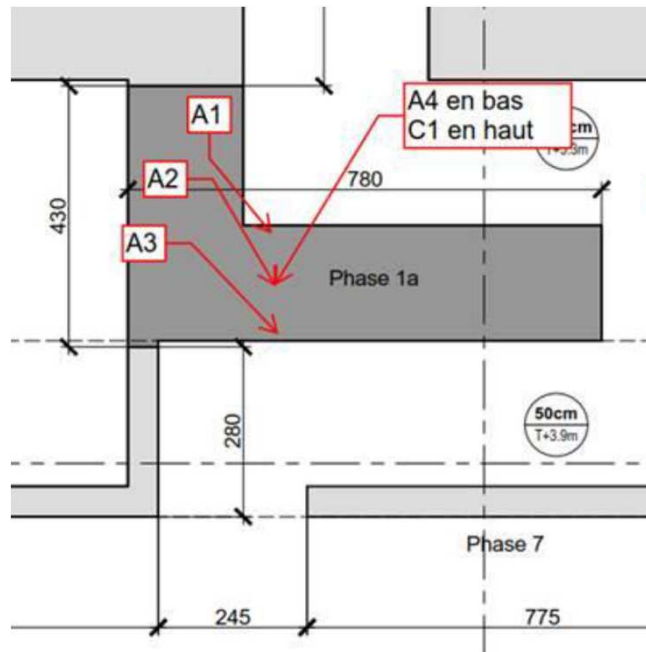


Dirk Schlicke et al, "On-site Monitoring of Mass Concrete", January 2019, In book: Thermal Cracking of Massive Concrete Structure.

Cure et protection du béton

Fissuration au jeune âge, origine thermique

Suivi de la température – Cas d'un bunker



Mesure de la température au moyen de thermocouple :

- **Avantage** : partiellement réutilisable, faible coût, mesure disponible en temps réel.
- **Désavantage** : intrusif (connexion par fil), trou dans le coffrage

Tolérances

Aspect – bulles d'air : NIT 285 § 11.5

Causes principales : type de coffrage, mode de coulage, serrage et rhéologie du béton

« En principe, l'impact de bulles d'air présentes à la surface sur la durabilité du béton armé est limité... » « ...Par contre, des bulles d'air plus profondes vont réduire l'enrobage des armatures. Au moment d'évaluer de grandes bulles d'air, il convient donc principalement de vérifier si l'enrobage minimum des armatures est encore respecté. »



NBN B 15-007 – Béton apparent

« Parfois, le terme 'béton apparent' est utilisé pour des applications pour lesquelles on songe plutôt à du béton laissé visible avec moins d'exigences esthétiques que celles définies dans la présente norme. Des exemples de telles applications possibles sont des murs de cave, des parkings, des piles ou culées de ponts, ... Lorsque, pour ces applications, aucune exigence esthétique n'est spécifiée conformément à la présente norme, on part du principe que le terme 'béton apparent' a été utilisé de manière impropre. Dans ce cas, on retombe sur les normes NBN EN 13670 et NBN B 15-400. »

Tolérances

Aspect – bulles d’air : Cas de voile apparent

Bullage important sur une grande partie des voiles.

Causes probables :

- Décoffrage précoce
 - < 12h , CEM III/A, T° hivernale
- Ferrailage dense et vibration insuffisante
 - Vibration externe

Quantification :

- Sélection de voile avec des dégâts d’amplitude différente apparente (faible – moyen et élevé)
- Cartographie par ultrason (non-destructif)
- Prélèvement par carottage
 - Mécanique → Essai de compression (centre)
 - Durabilité → Essai d’absorption et Masse volumique sur l’épaisseur de l’élément

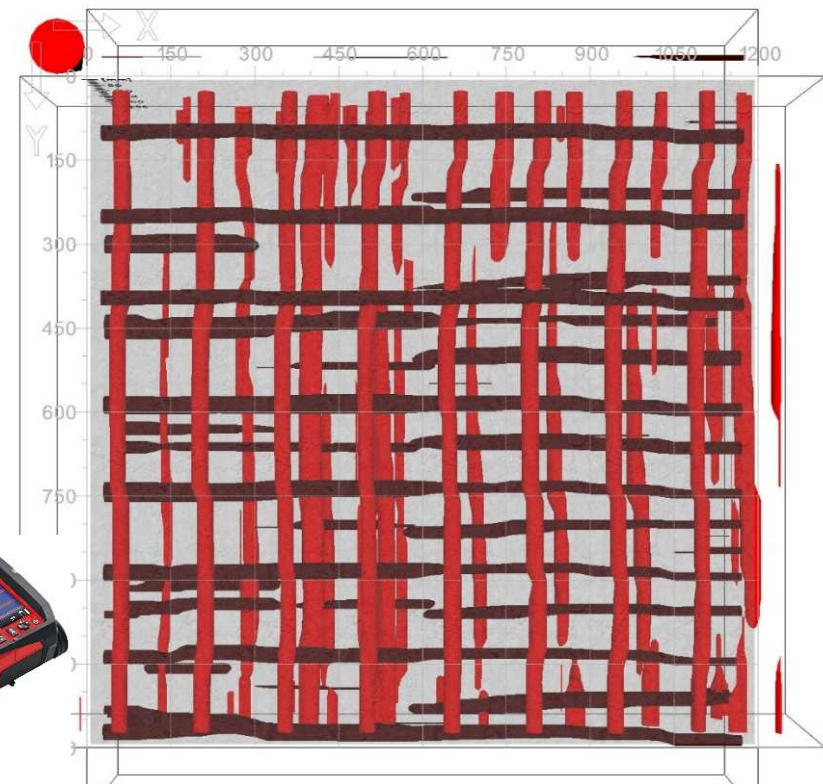


Tolérances

Aspect – bulles d'air : cartographie par ultrason

Position des aciers

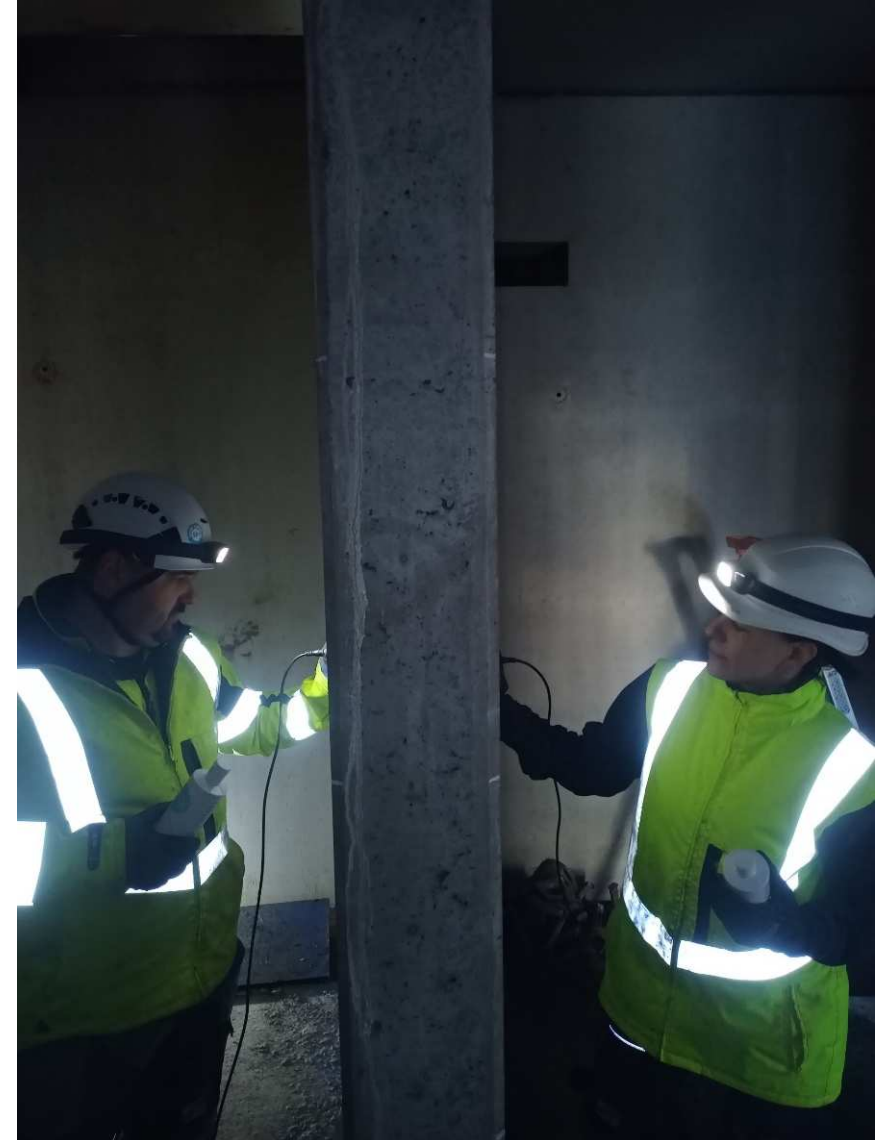
- Détermination des zones à mesurer par ultrason
- Enrobage des aciers



Distance entre lit d'armature < 50 mm sur certaines zones

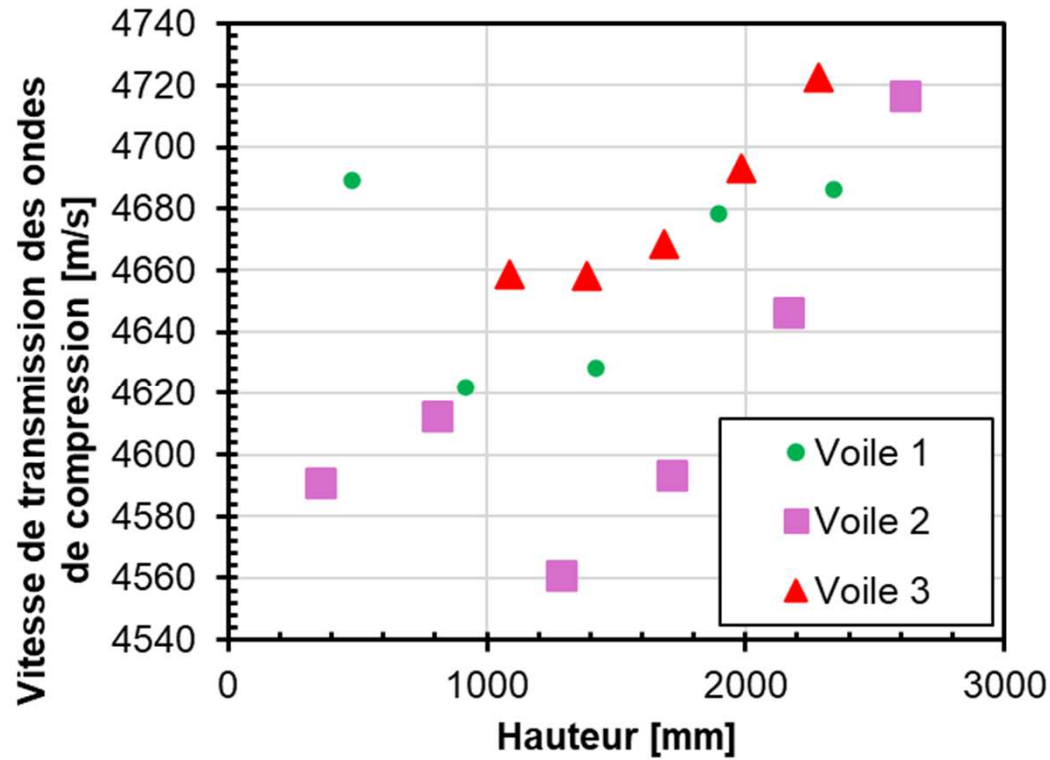
Tolérances

Aspect – bulles d'air : cartographie par ultrason



Tolérances

Aspect – bulles d'air : cartographie par ultrason



Influence de la hauteur

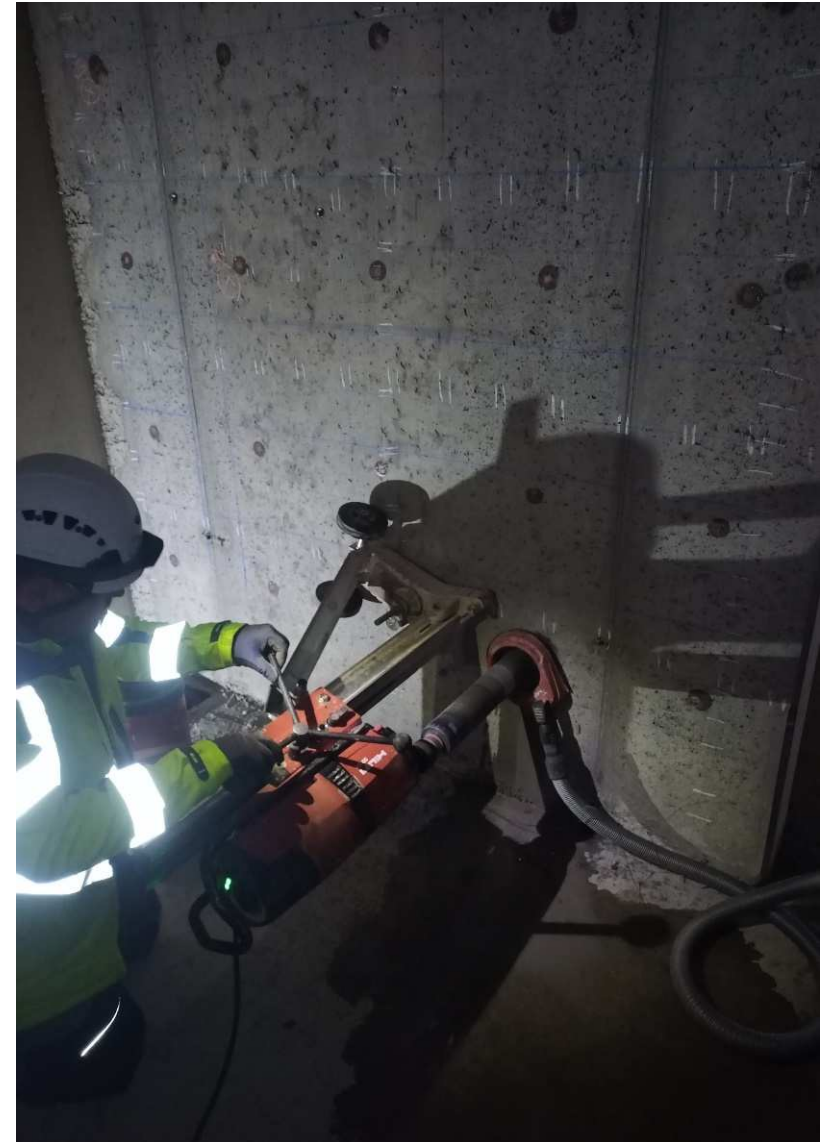
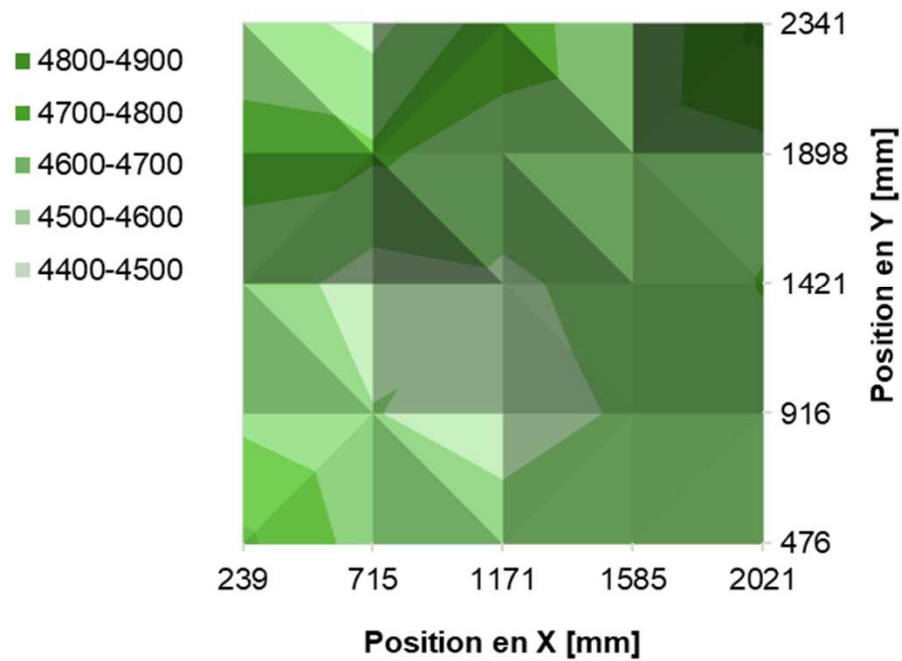
- Minimum à 1.5 m
- Mise en place ?
 - Hauteur de chute < 1 m ?
- Vibration externe insuffisante

Tolérances

Aspect – bulles d'air : cartographie par ultrason

Prélèvement par carottage

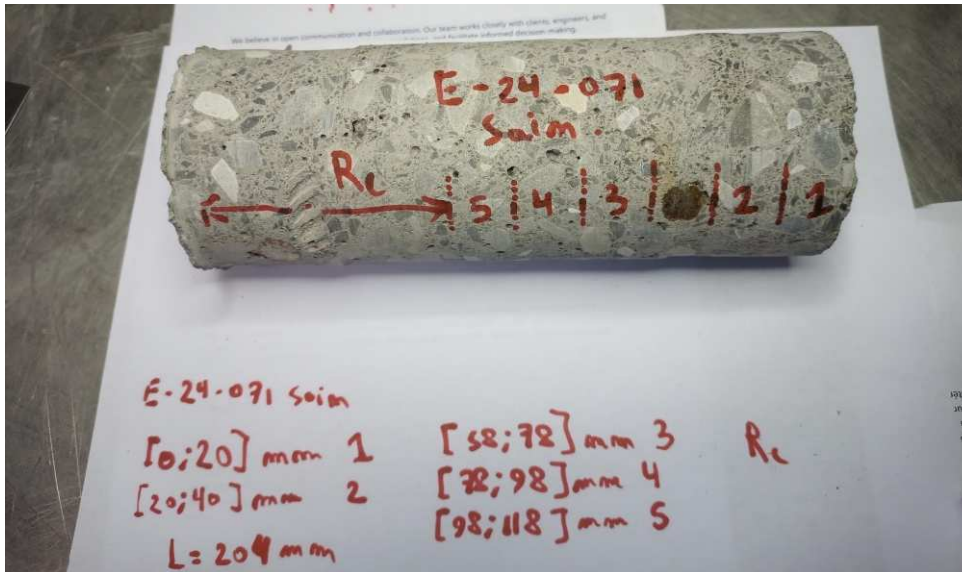
Cartographie du voile 1 par ultrason [m/s]



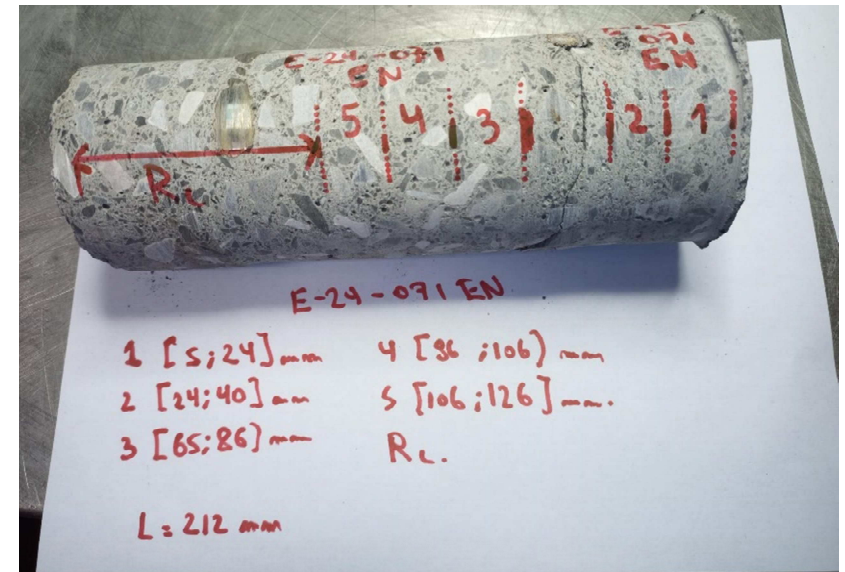
Tolérances

Aspect – bulles d'air : Quantification

Zone saine



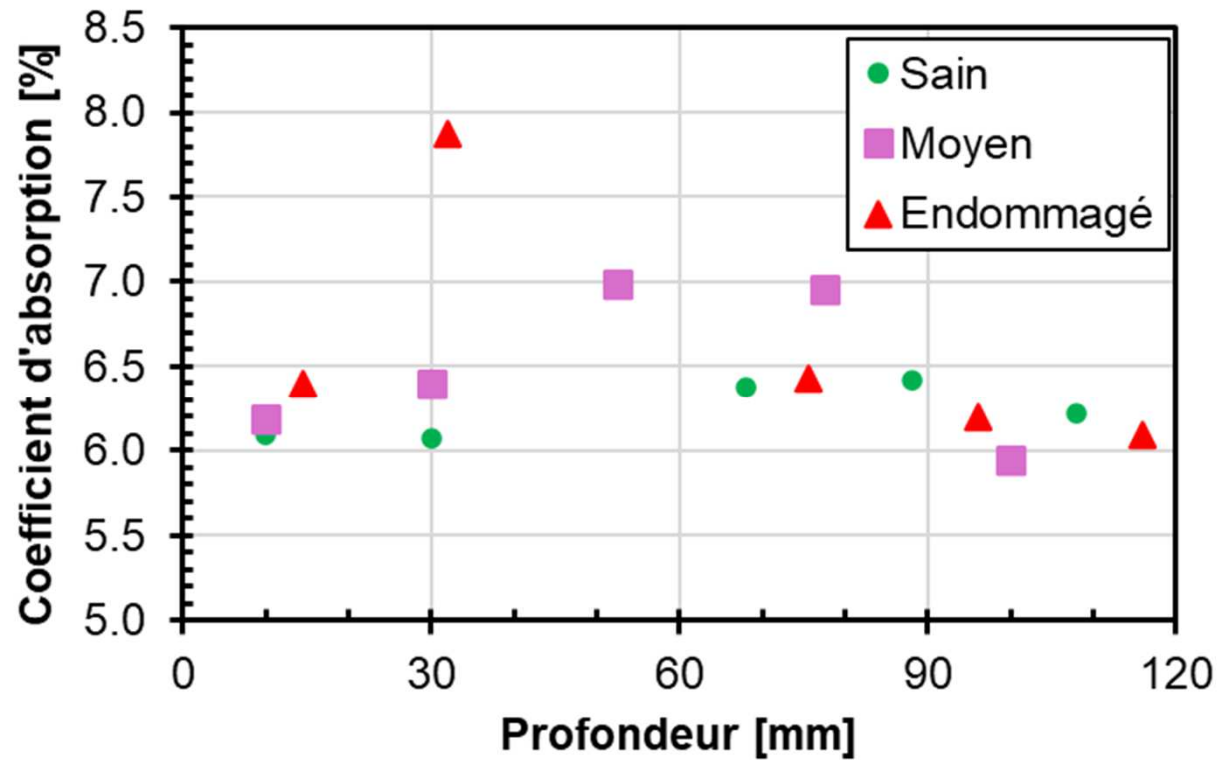
Zone endommagée



Pas d'influence sur R_c

Tolérances

Aspect – bulles d'air : Quantification



Variation plus importante à hauteur du premier lit d'armature sur les zones « endommagées ».

Au cœur et en surface, les résultats obtenus sont très similaires.

Tolérances

Aspect – bulles d'air : Solutions

Révision de la mise en place du béton

Utilisation d'un béton autoplaçant

Assurer des hauteurs de chute < 1.0 m

Validation du nouveau type d'exécution avec une pièce d'épreuve.

Cartographie par ultrason

Essai d'absorption sur l'épaisseur de l'élément.

Mise en oeuvre de BAP

Spécificités – NIT 285 § 3.8.1

Slump flow, Ségrégation, Viscosité apparente, Aptitude à l'écoulement

Classe de viscosité apparente	Classe d'étalement		
	SF1	SF2	SF3
VS2 VF2	RAMPES		
VS1 ou VS2 VF1 ou VF2		MURS ET PILIERS	ÉLEMENTS HAUTS ET ELANCÉS
VS1 VF1	SOLS ET DALLES		

Mise en oeuvre – NIT 285 § 7.4.1

Méthode de remplissage

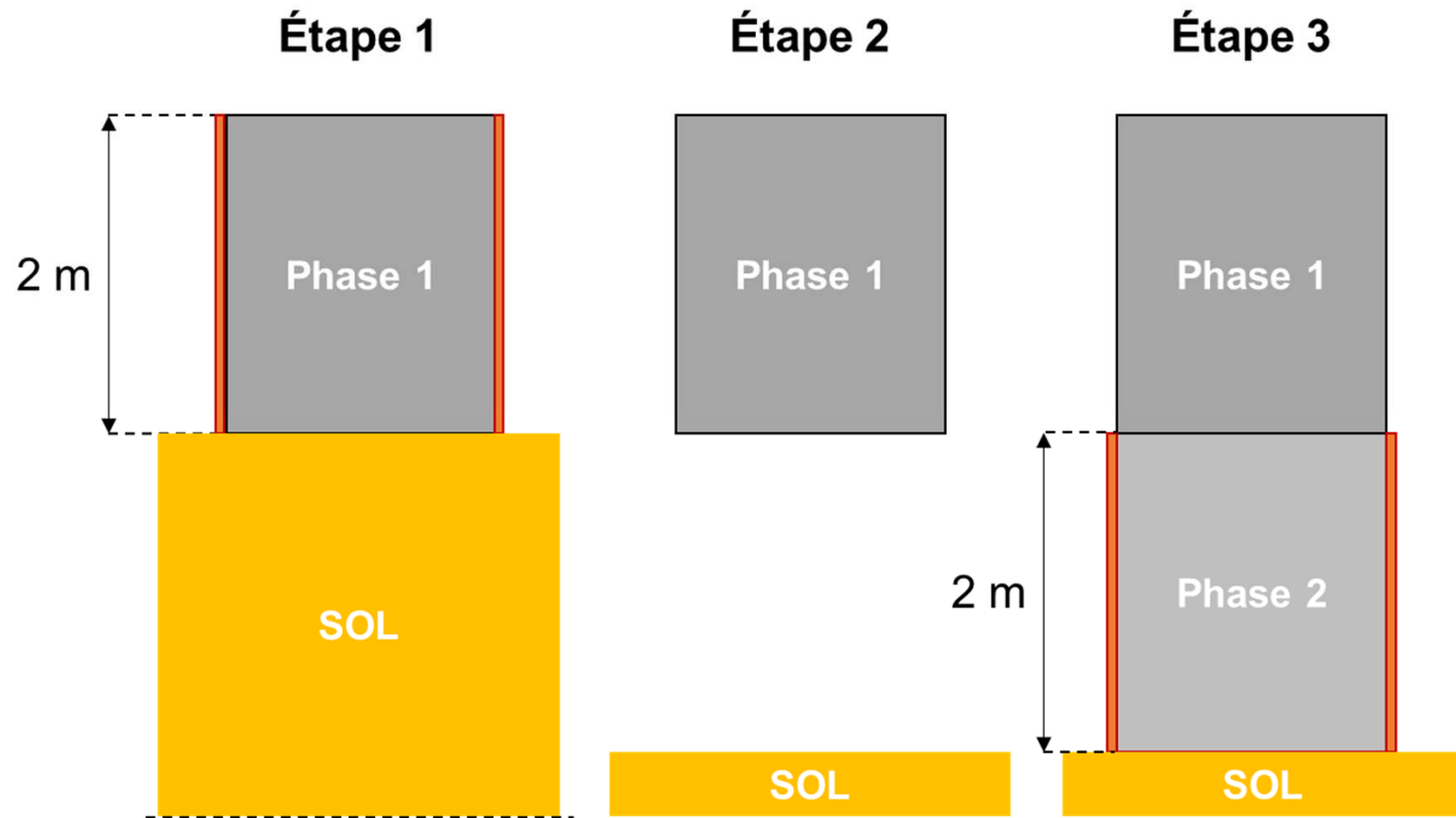
Distance de coulage maximal à l'horizontale de 5 à 10 m

Contrôles – NIT 285 § 12.2.3

Inspection visuelle, propriétés rhéologiques, temps de maintien de consistance

Mise en oeuvre de BAP

Cas d'une construction souterraine

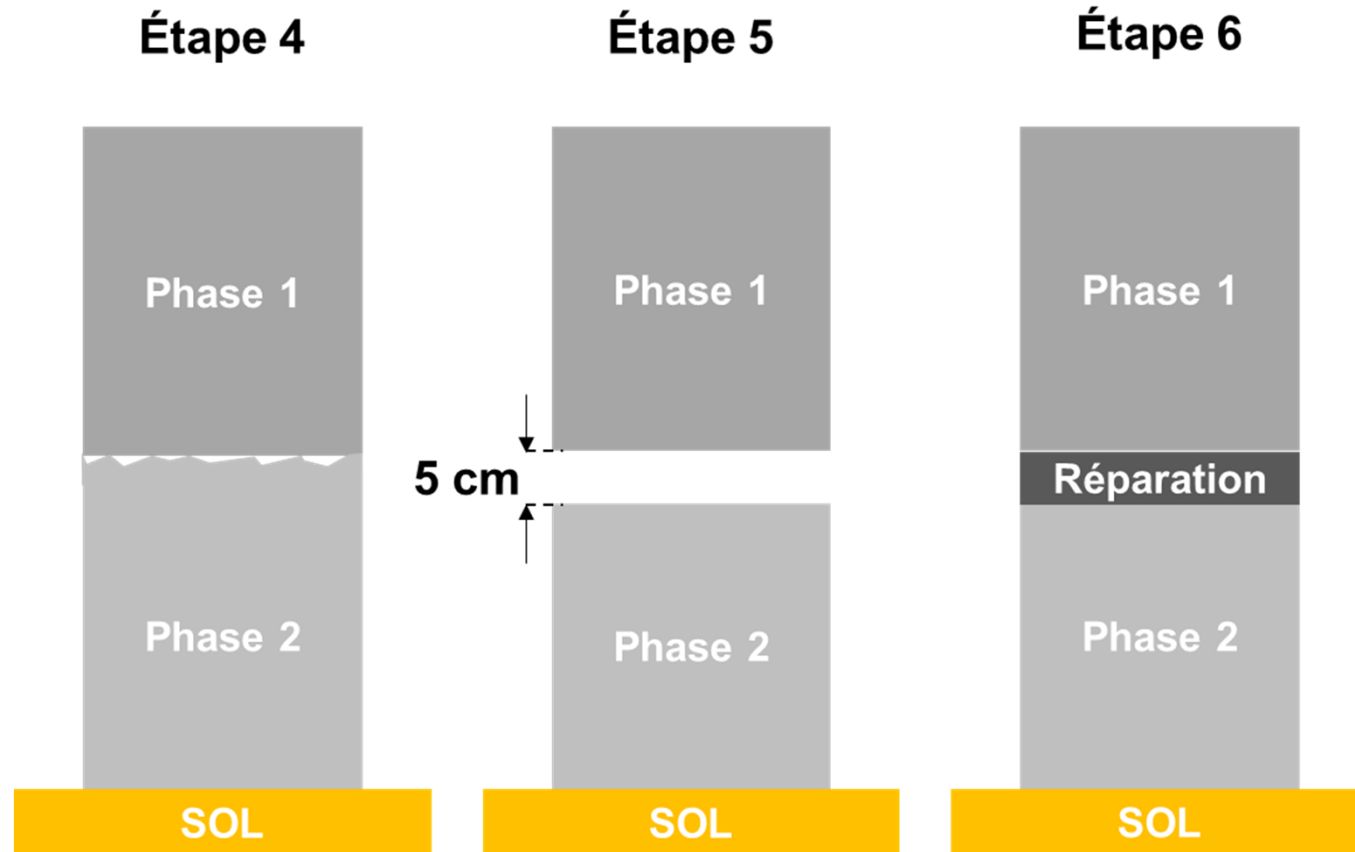


Phase 1 : béton vibré

Phase 2 : béton autoplaçant

Mise en oeuvre de BAP

Cas d'une construction souterraine

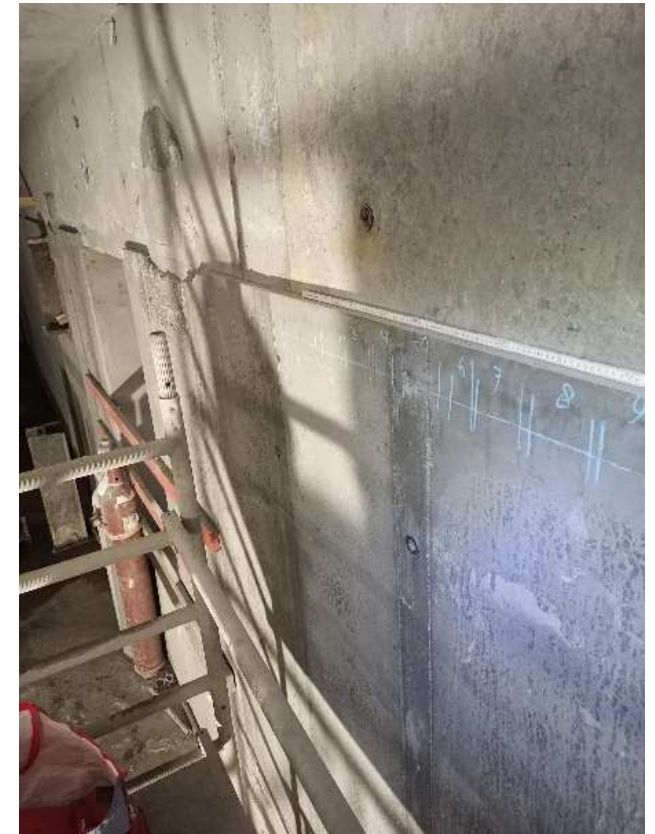


Formation de mousse à la jonction entre les deux phases de bétonnages

Hydrodémolition sur une épaisseur de 5 cm

Mise en oeuvre de BAP

Cas d'une construction souterraine



Mise en oeuvre de BAP

Suivi / Quantification : Tomographie par ultrason

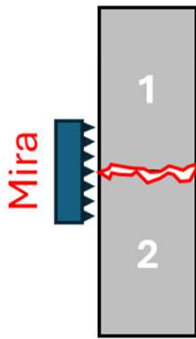
Haut - sans accès



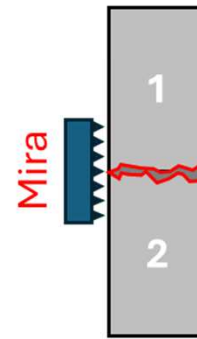
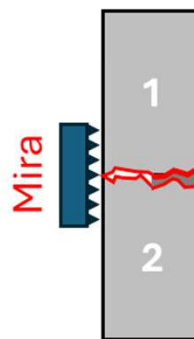
Bas - sans accès

Tomographie par ultrason - Non destructif

Etat initial



Après reparation ?



Sondage



Inspection visuelle

- Vides?
- Adhérence?

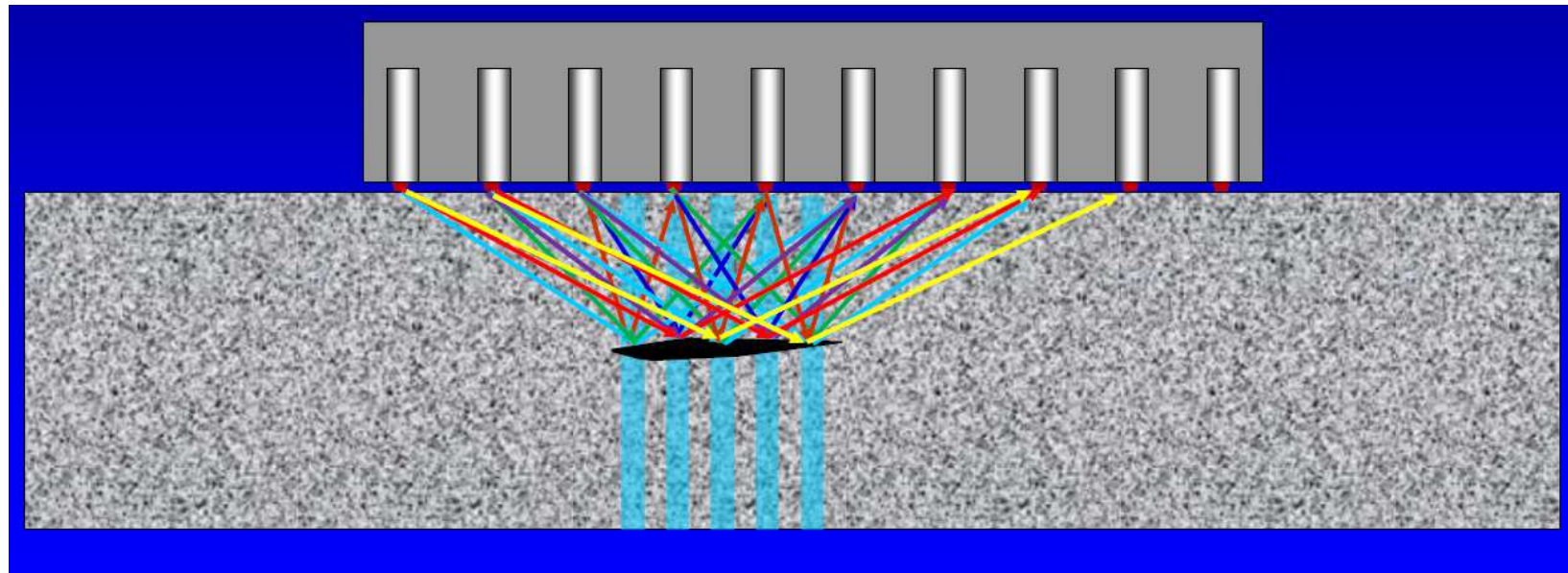
Mise en oeuvre de BAP

Tomographie par ultrason



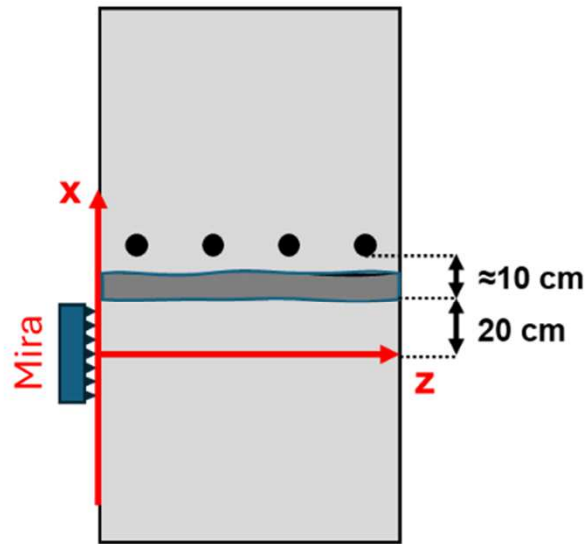
Applications ...

- Mesure jusqu'à 2 mètres de profondeur
- Détection de vide ou de nid de gravier
- Détection de vide dans des câbles de précontrainte
- Vérification de la qualité d'une réparation
- Détection de décollement
- Béton fibré

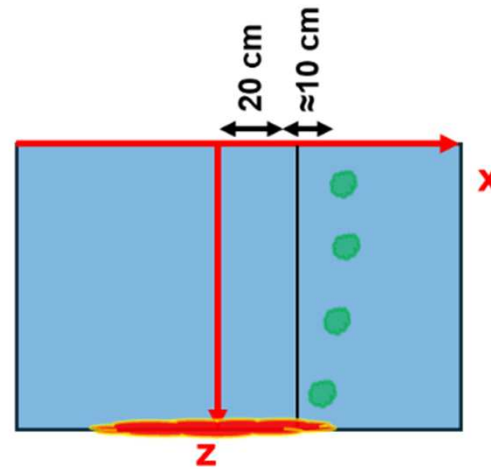


Mise en oeuvre de BAP

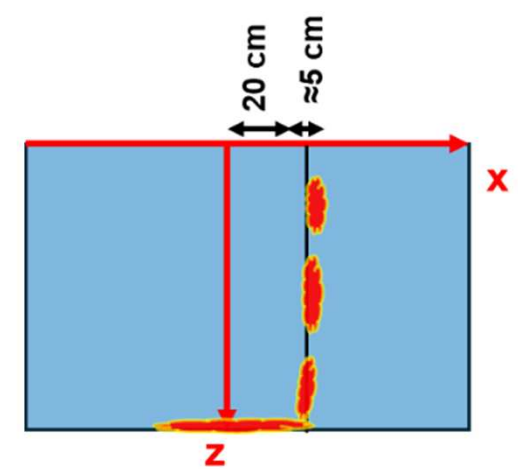
Suivi / Quantification : Tomographie par ultrason



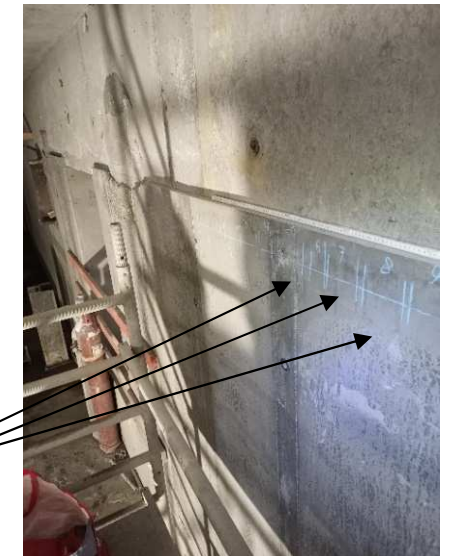
Sans vide



Avec vide

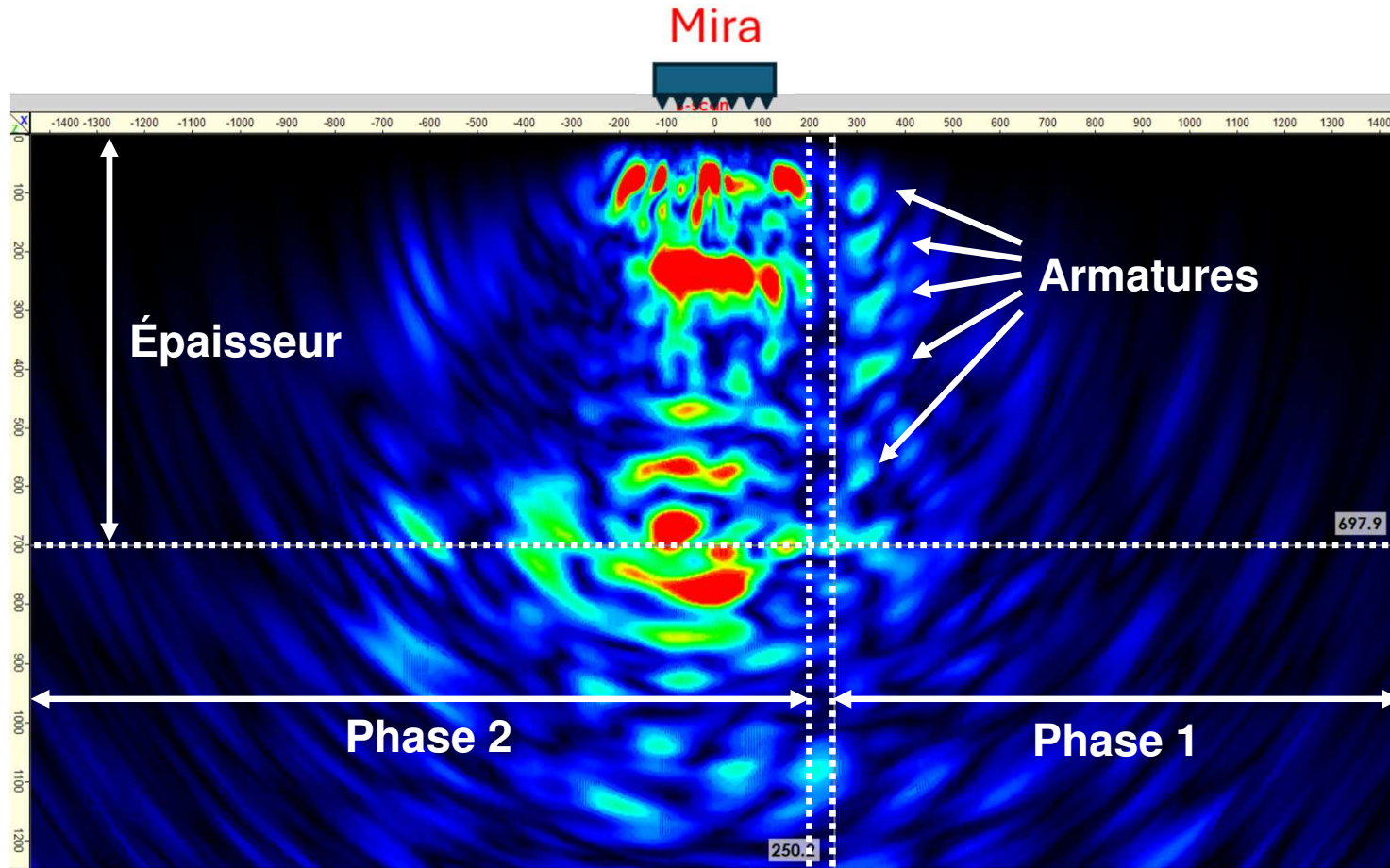


Ferrailage très dense



Mise en oeuvre de BAP

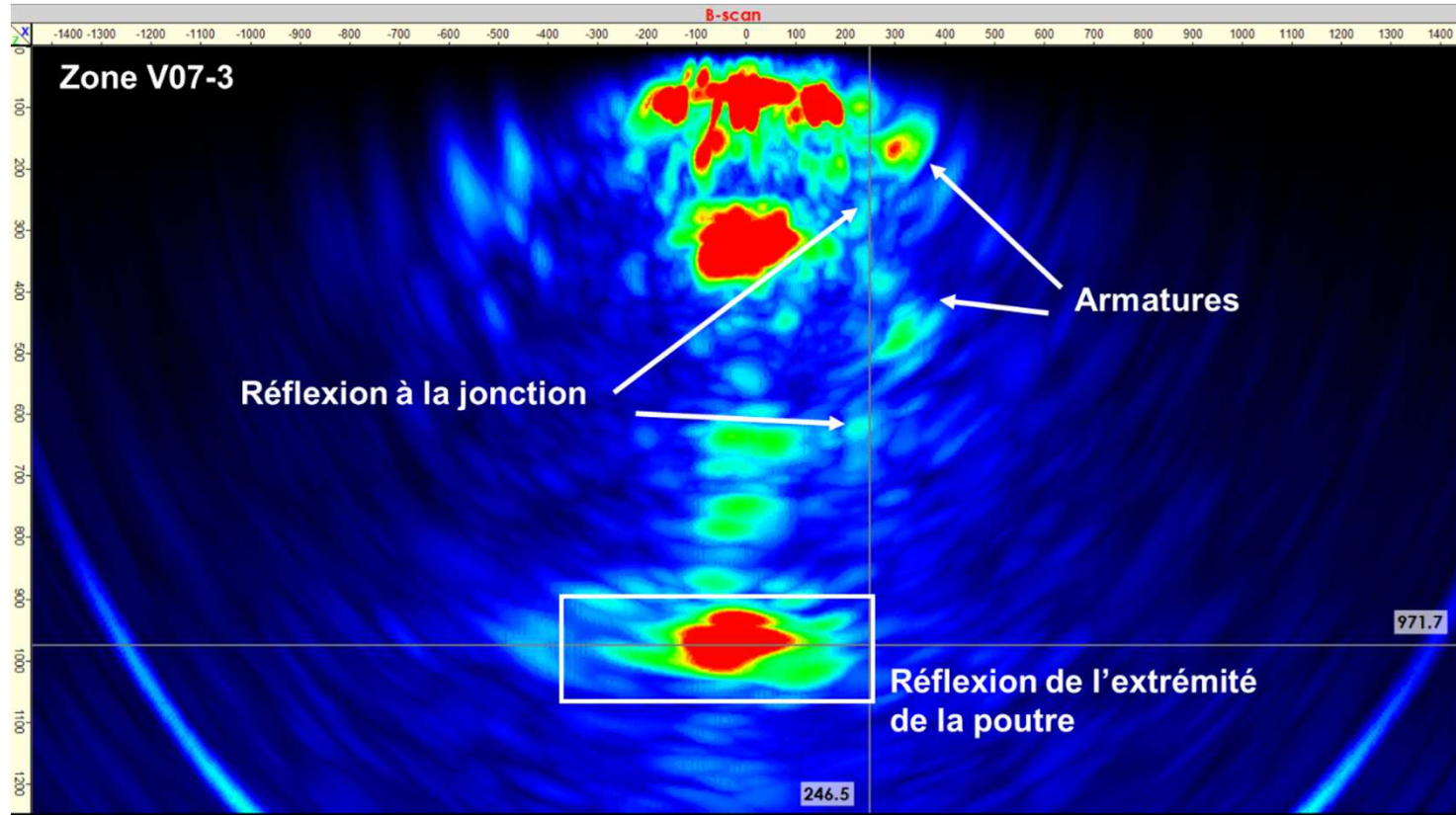
Suivi / Quantification : Tomographie par ultrason



Aucune bulle d'air détectée

Mise en oeuvre de BAP

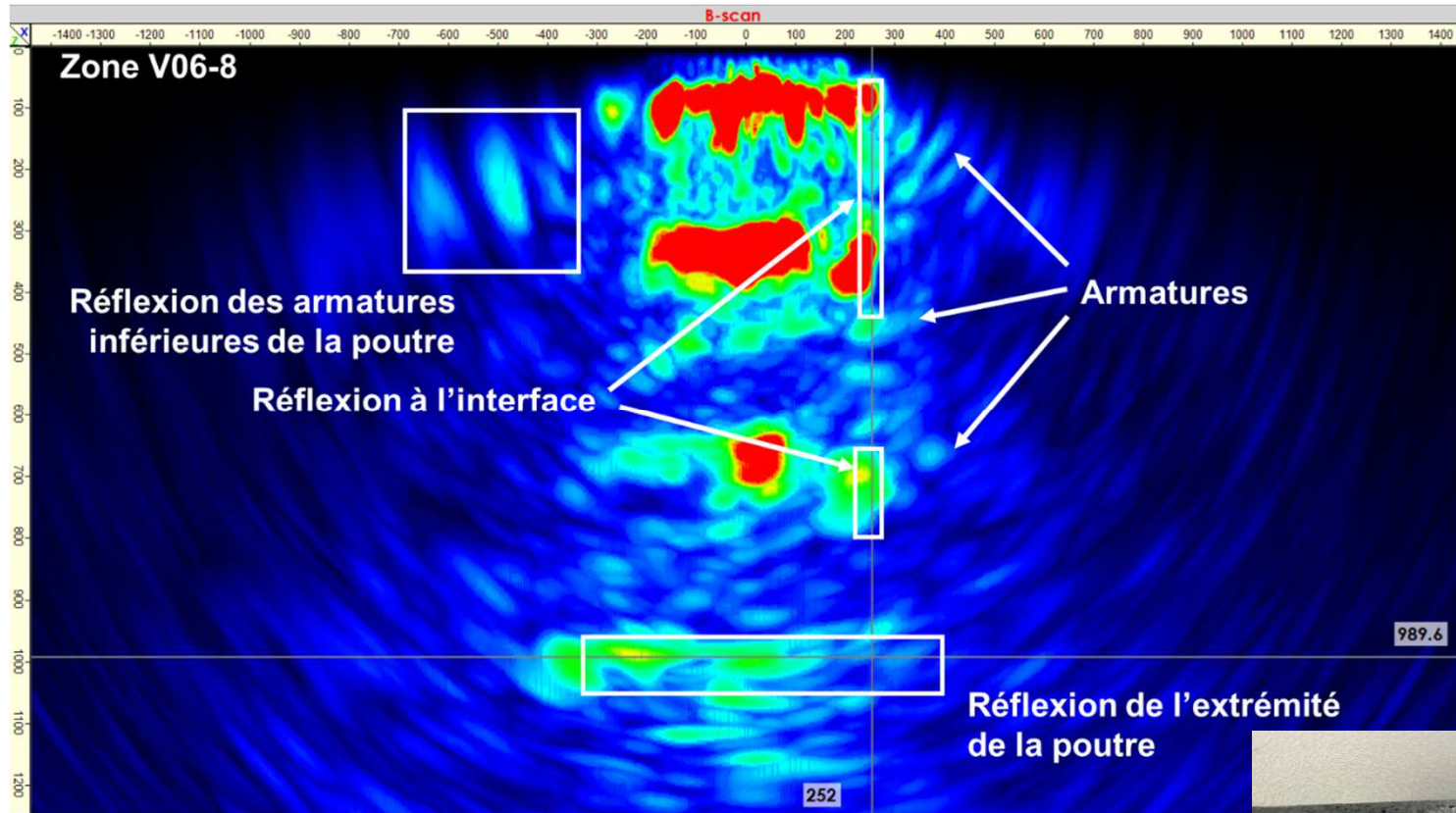
Suivi / Quantification : Tomographie par ultrason



Petite bulle d'air à la jonction.

Mise en oeuvre de BAP

Suivi / Quantification : Tomographie par ultrason



Vide important



Mise en oeuvre de BAP

Solution

La tomographie par ultrason a permis de cartographier les vides le long de la jonction et de guider l'entrepreneur sur les réparations.

Démarche future potentielle

Contrôle qualité du BAP à l'état frais
Réalisation d'une pièce d'épreuve

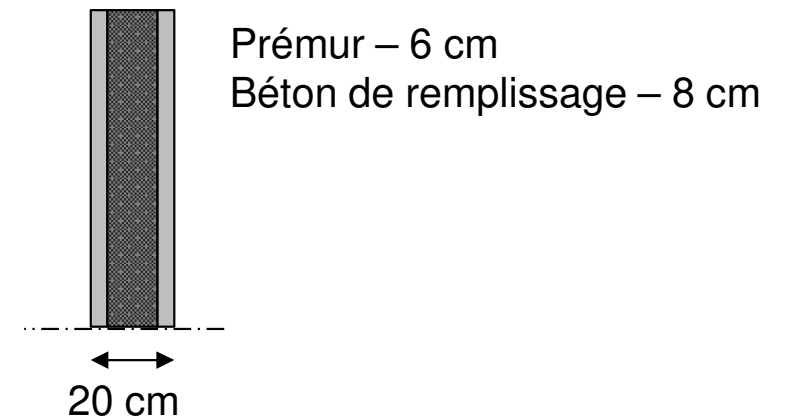
Prémurs : coulage du béton de remplissage

Exécution – NIT 285 § 10.7.2

Vitesse de remplissage, humidification des parois, coulage uniforme, granulométrie

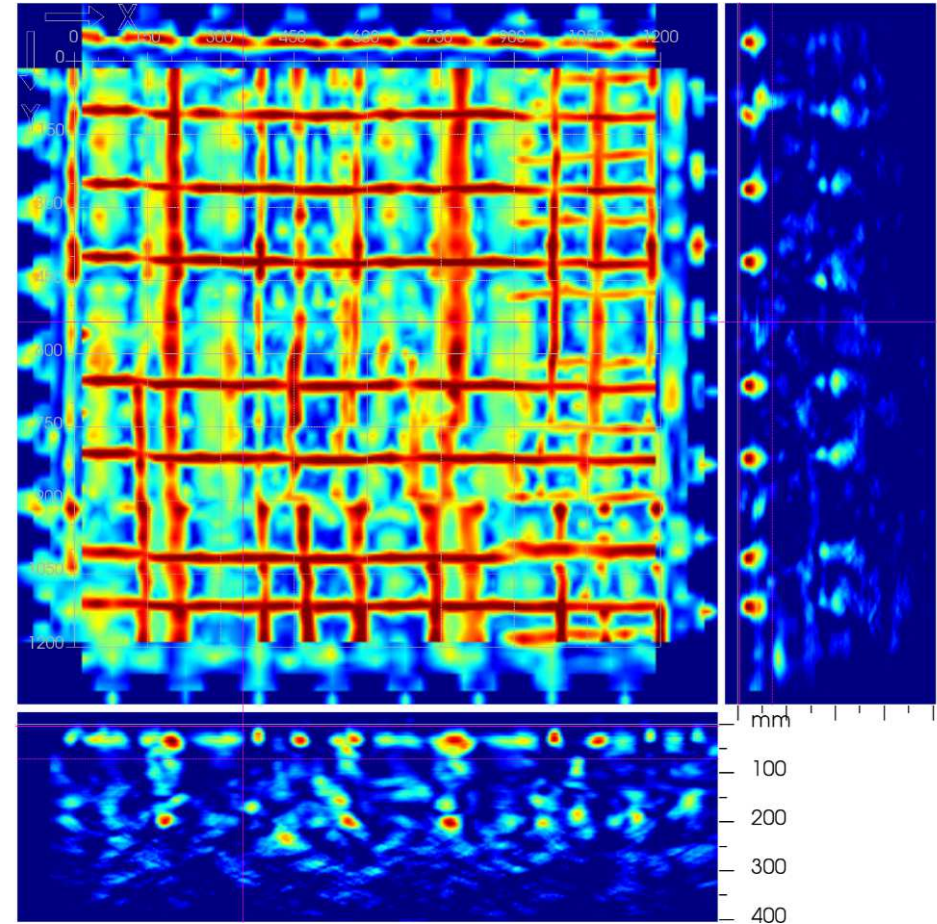
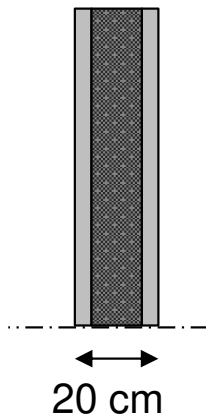
Situation

Différentes équipes, changement de méthode d'exécution



Prémurs : coulage du béton de remplissage

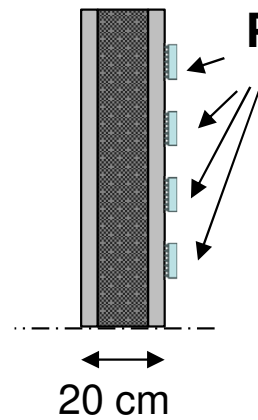
Suivi / Quantification : radar



Mesure de la position des armatures
Réflexion observées... mais difficile à analyser.

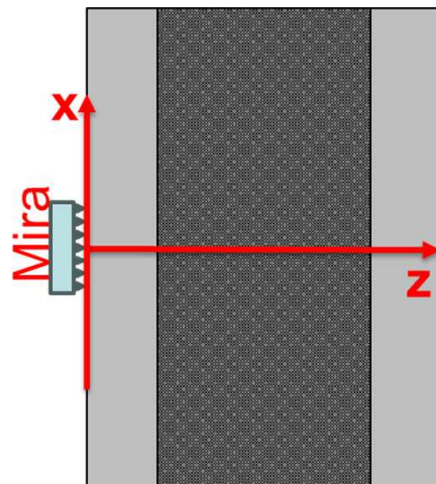
Prémurs : coulage du béton de remplissage

Suivi / Quantification : Tomographie par ultrason

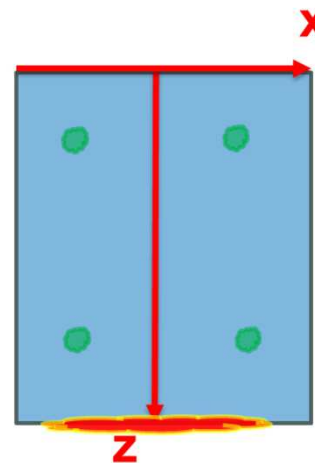


Plusieurs mesures sur la hauteur

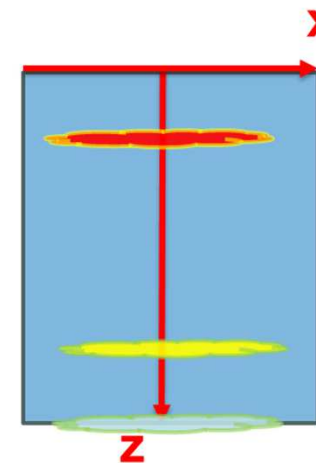
Détection des armatures



Sans vide

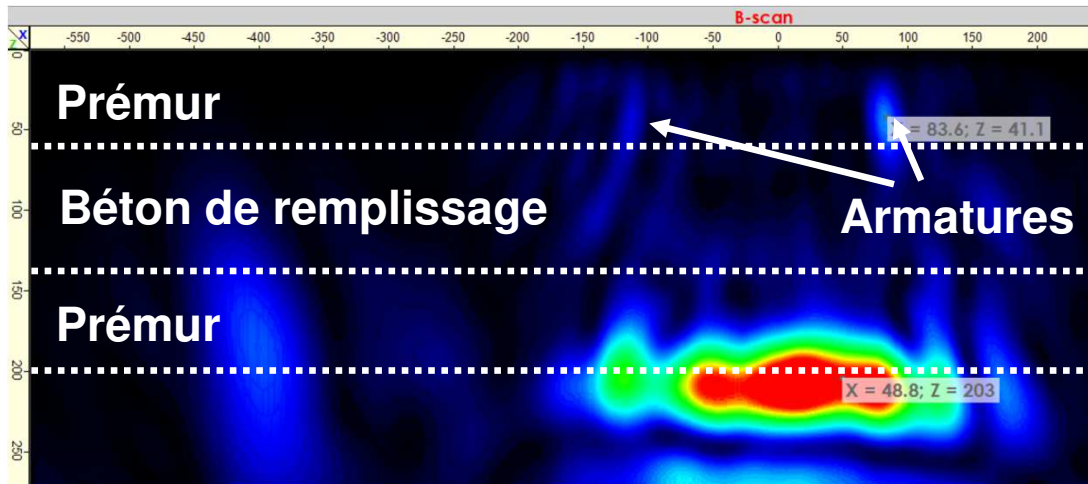


Avec vide



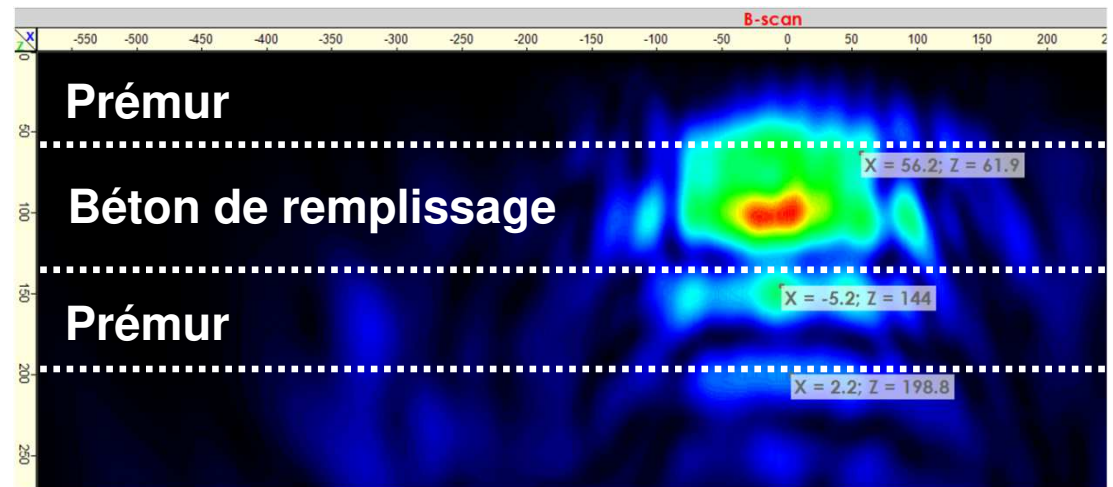
Prémurs : coulage du béton de remplissage

Suivi / Quantification : Tomographie par ultrason



Réflexion de la face opposée, aucun vide détecté

Réflexion à l'interface entre le prémur et le béton coulé sur site



Ces résultats doivent être confrontés à une inspection visuelle directe

Prémurs : coulage du béton de remplissage

Solution

La tomographie par ultrason a permis d'identifier clairement les vides à l'interface entre le prémur et le béton de remplissage. Les zones identifiées devront être réparées.

Démarche future potentielle

Adaptation et validation du procédé d'exécution par tomographie.
Vérification et validation des réparations par tomographie.

Merci pour votre attention !

