



Notre talent
défie le temps

I M G C

INDURA
Infrastructures Durables Rhône-Alpes



L'apport des méthodes d'essais non-destructifs et du laboratoire au diagnostic d'ouvrages pathologiques

Villeurbanne, le 23 novembre 2016

bernard.quenee@lerm.setec.fr





Qu'est-ce qu'un ouvrage d'art « pathologique » ?





Qu'est-ce qu'un ouvrage d'art « pathologique » ?

Structure ancienne ou dégradée, présentant des désordres, nécessitant un diagnostic d'état :

- corrosion, éclatements
- faïençage, fissuration
- flèche anormale, déformations
- défaillance
- ...

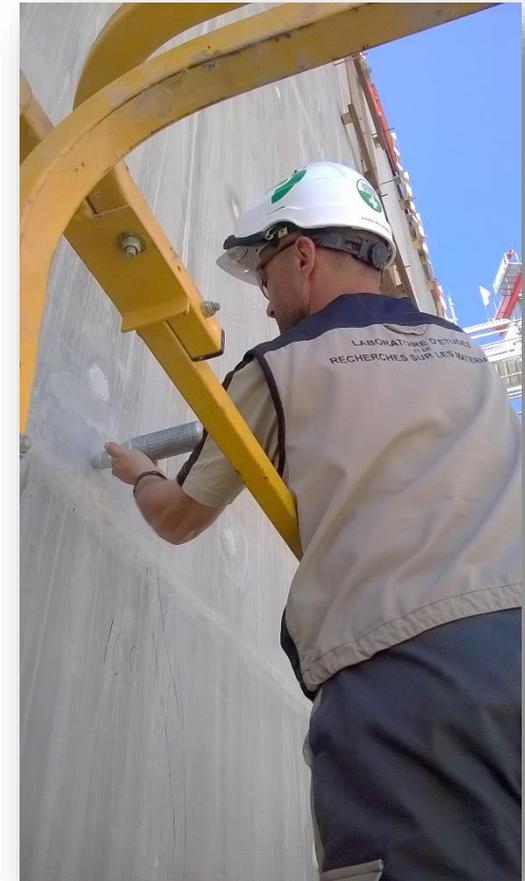
Les techniques d'essais non-destructifs



➤ Pourquoi des essais non-destructifs ?

Parce-que...

- Non-destructifs !
- Légèreté, facilité de mise en œuvre
- Economes
- Innovants, multi-paramètres
- Rapides et exportables
- Globalisants
- Implantent prélèvements
- Compléments au laboratoire

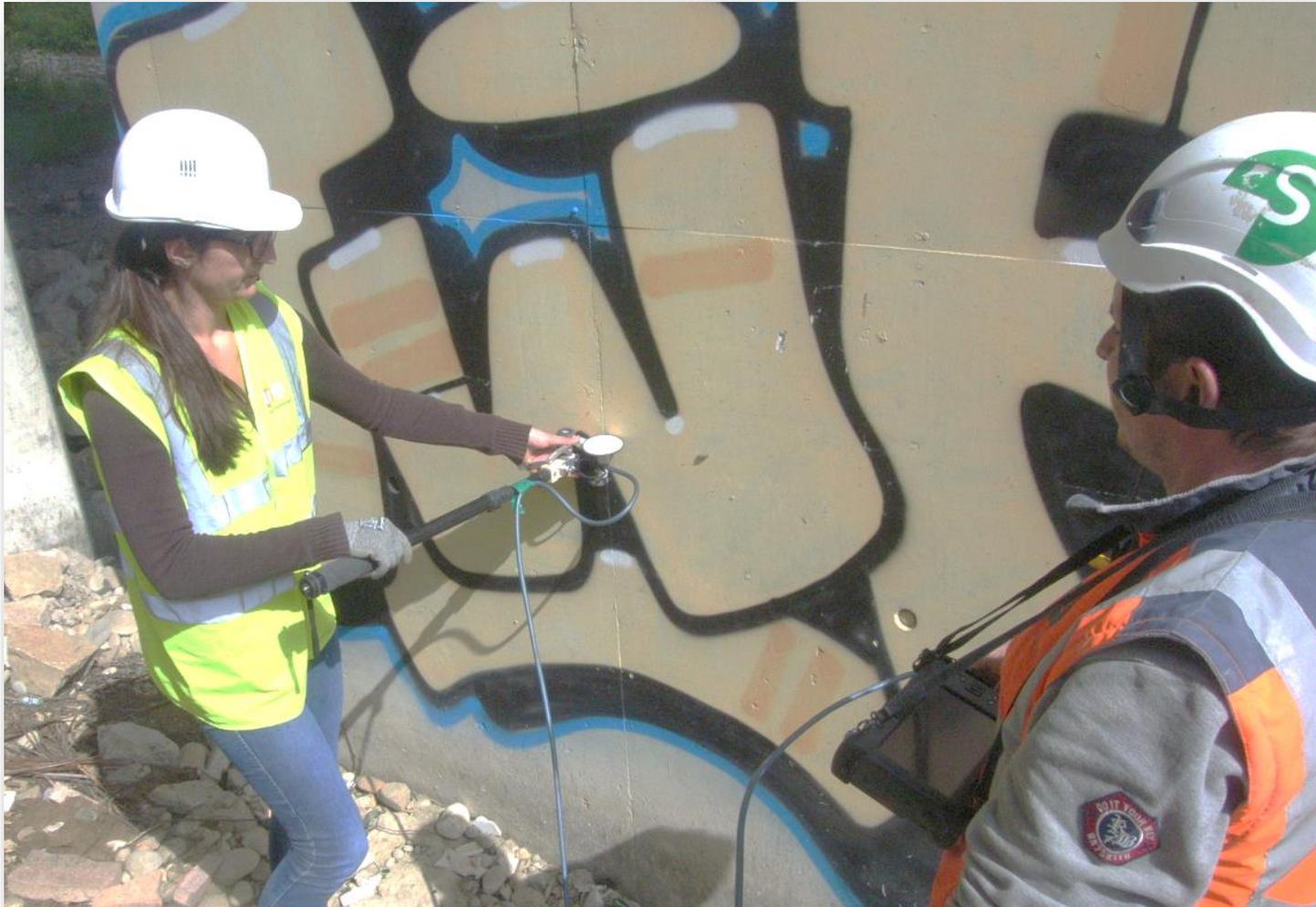


> Les techniques d'essais non-destructifs

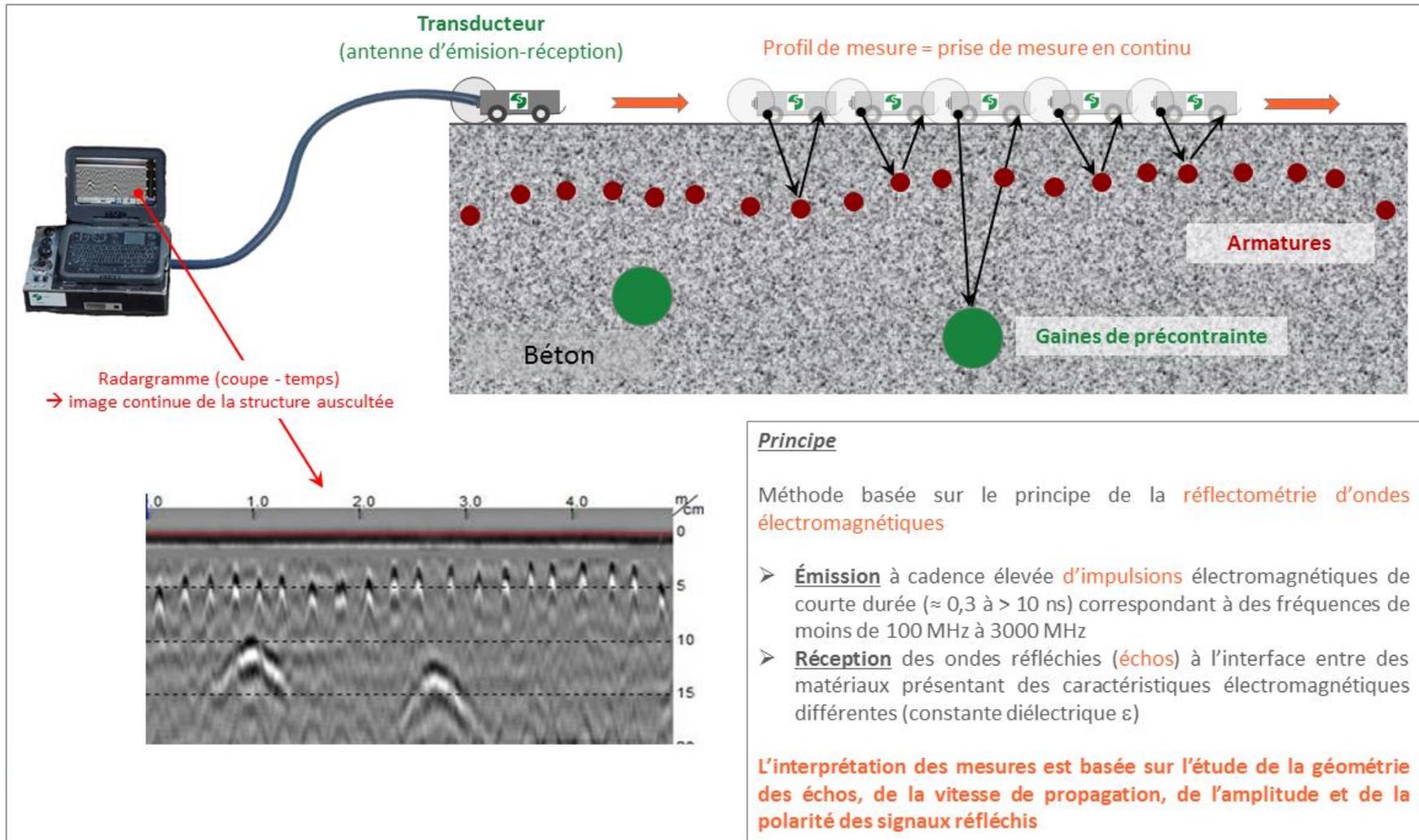
Les plus utilisés :

- Auscultations radar
- Mesures de corrosion
- Mesures d'humidité
- Mesures de la vitesse du son
- Thermographie Infrarouge
- Scléromètre
- Vidéo-endoscope
- Essai à l'arbalète
- ...
- (l'instrumentation)
- La courburemétrie
- ...

Le radar à impulsions



Le radar à impulsions



Le radar à impulsions



**Profondeur d'investigation ~ 50 cm
dans le béton / plusieurs mètres
dans la pierre**

Fréquences antennes
800 MHz à 4 GHz

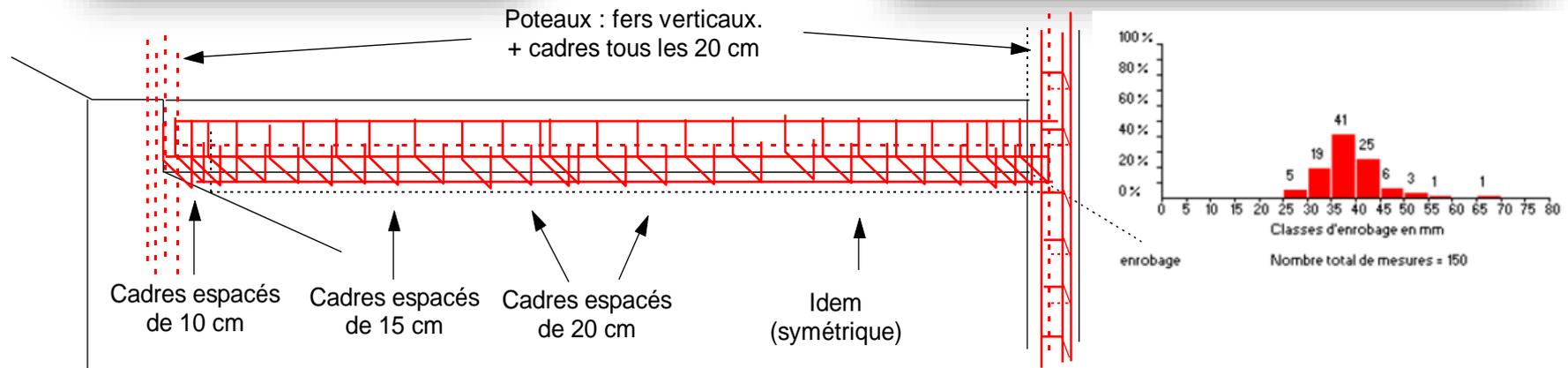
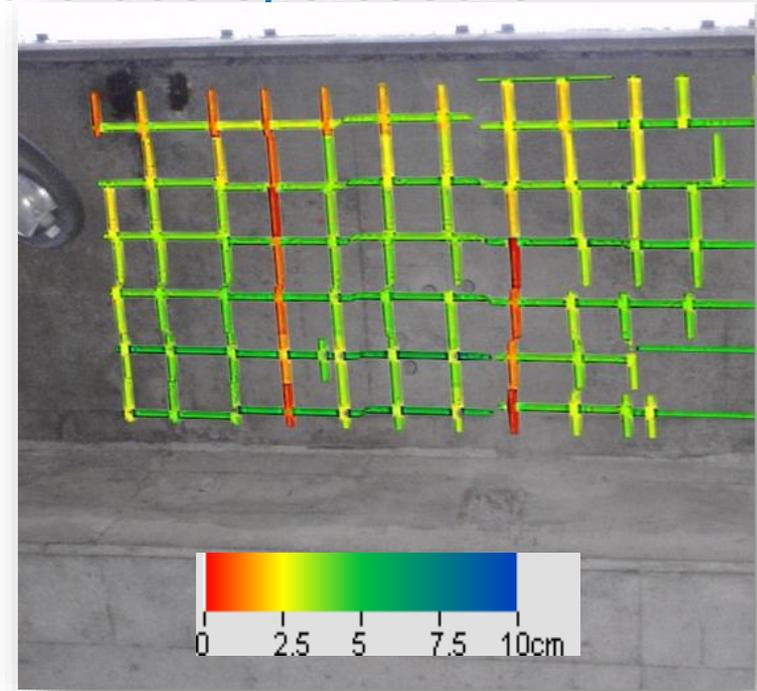
Le radar à impulsions

Détection de ferrillages



Le radar à impulsions

Détection de ferrailage et mesure des épaisseurs d'enrobage dans le béton





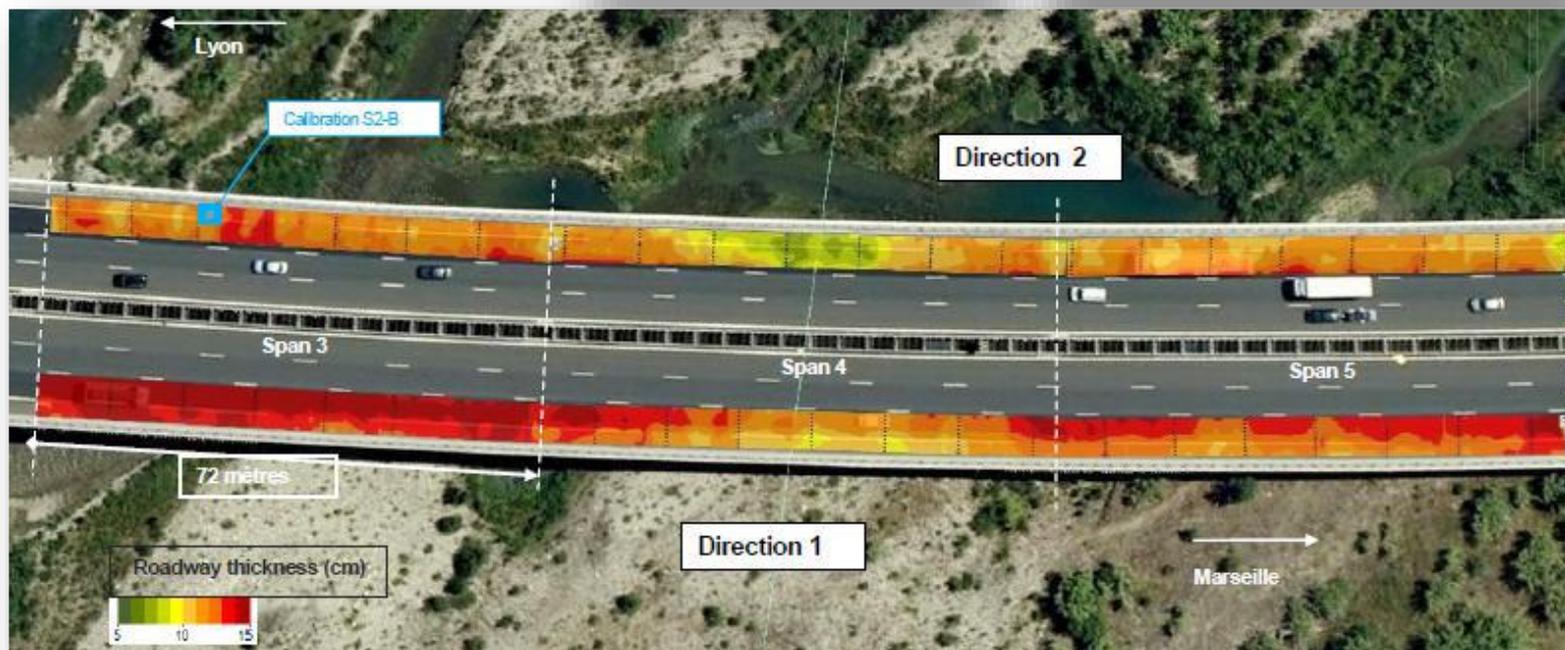
Le radar à impulsions

Cartographie d'enrobages des armatures



Le radar à impulsions

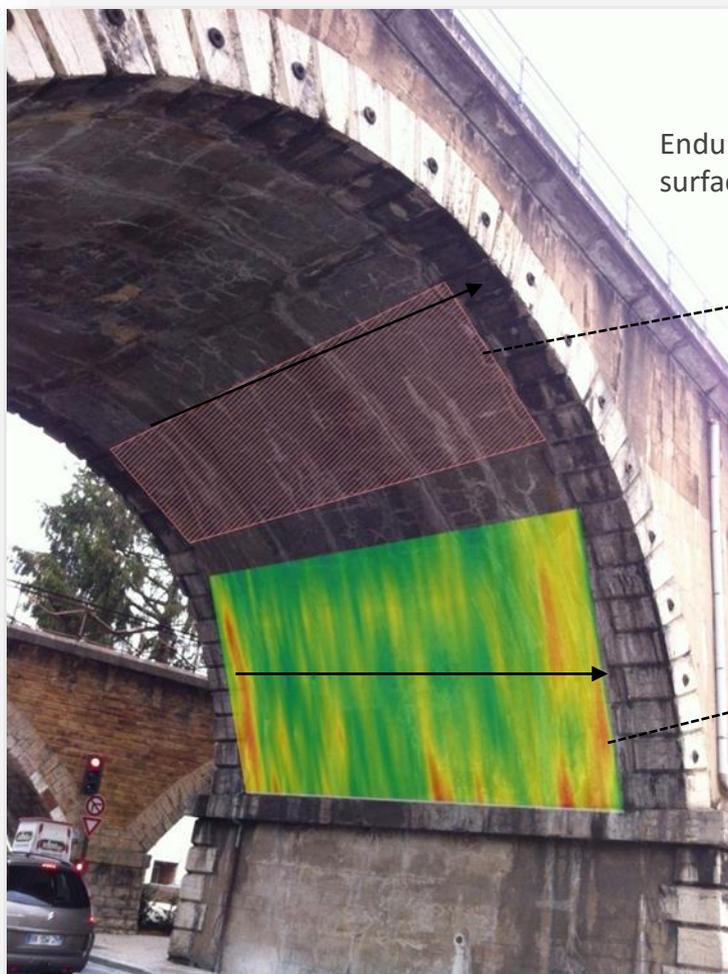
Mesure d'épaisseur de la couche d'enrobé pour recalculs de surcharge



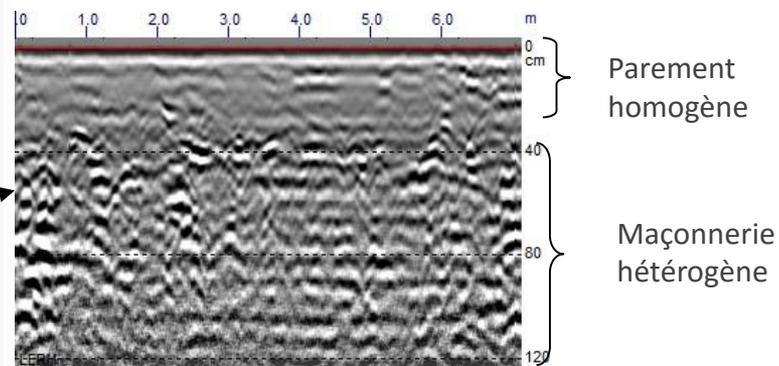
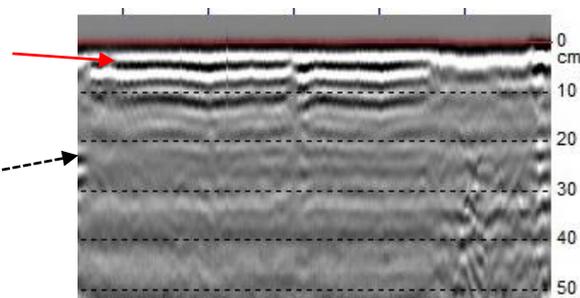


Le radar à impulsions

Reconnaitances géométriques et structurales d'ouvrages en maçonnerie

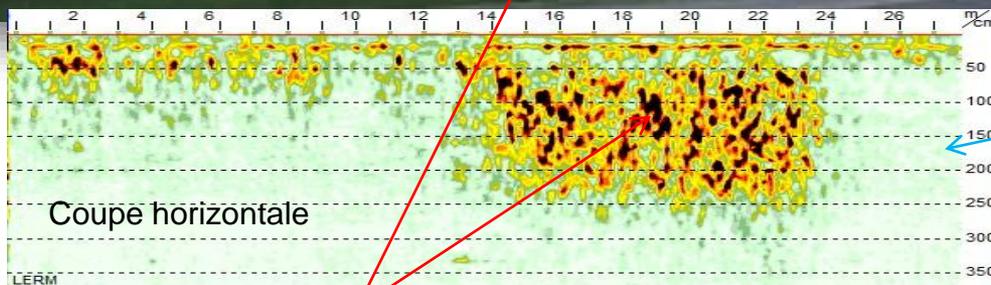
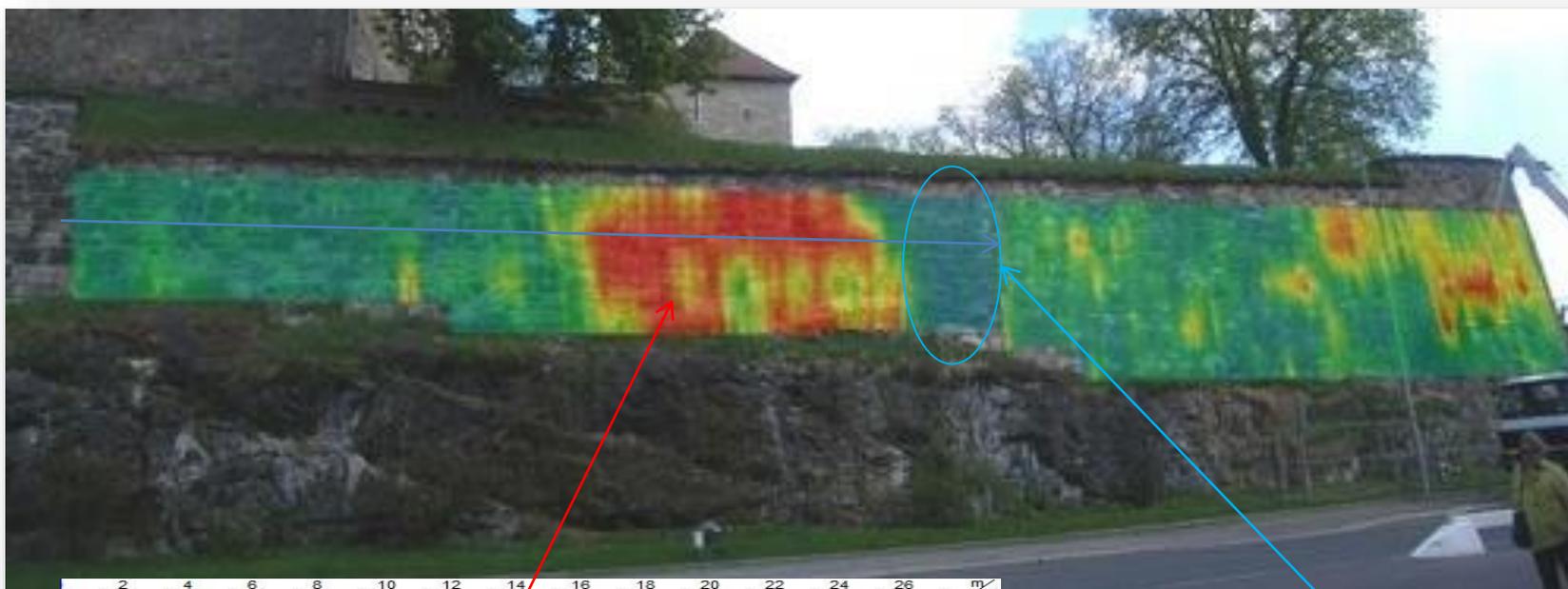


Enduit armé en surface



Le radar à impulsions

Evaluation des variations d'humidité d'ouvrages en maçonnerie

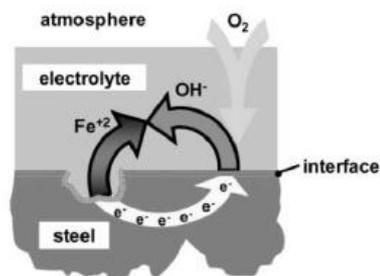


Maçonnerie humide
(signal très atténué)

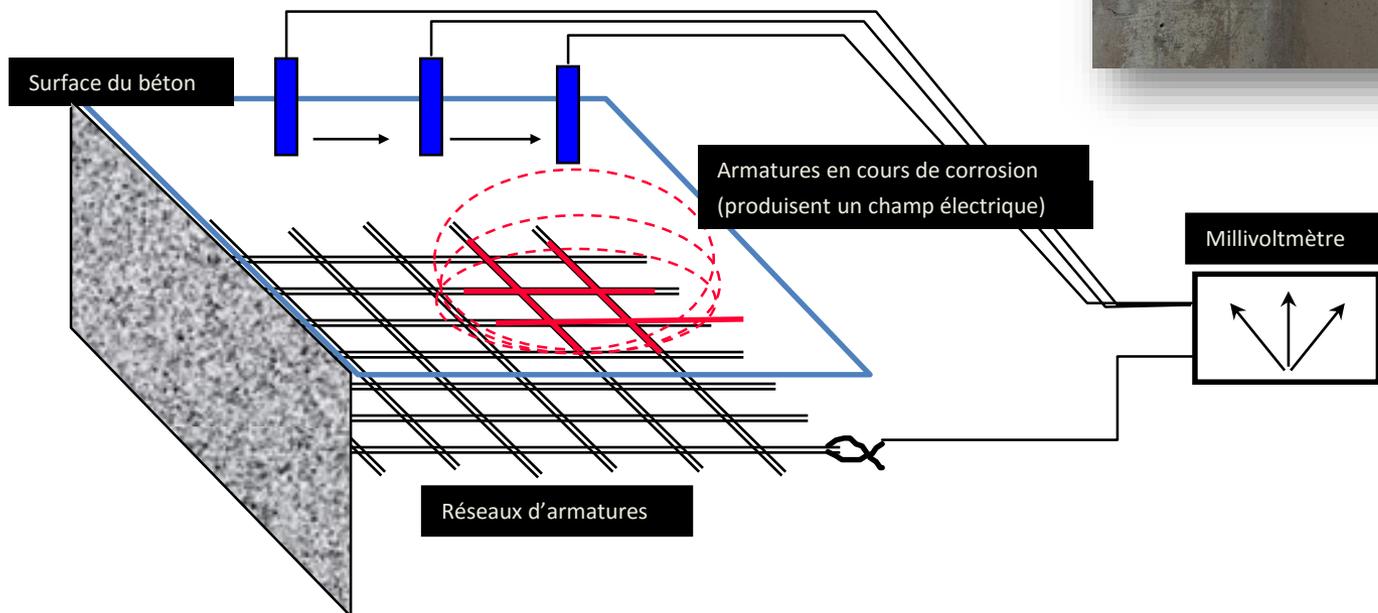
Maçonnerie très hétérogène



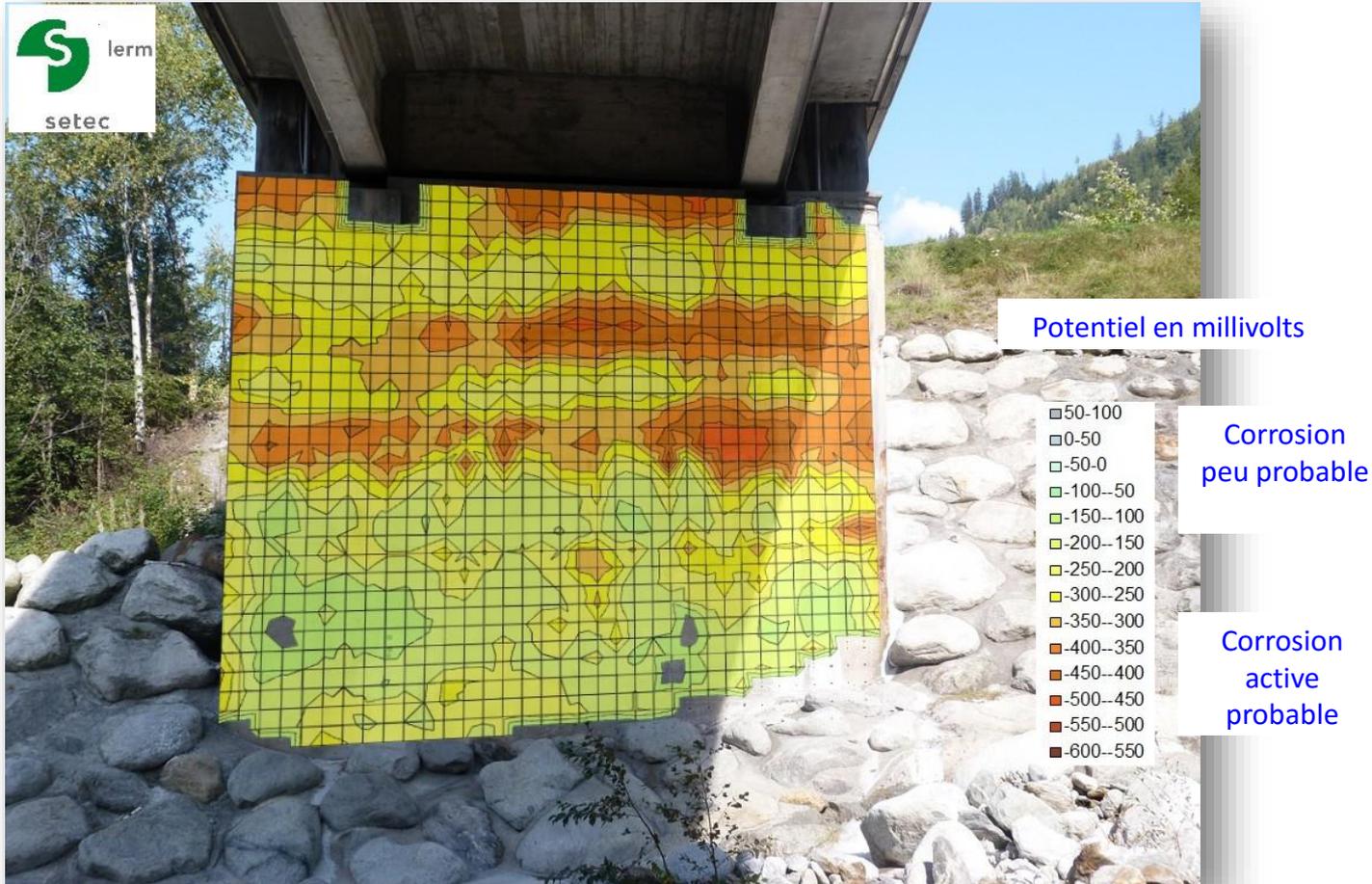
Evaluation de la corrosion des aciers dans un béton par mesure du potentiel d'électrode



Schematic representation of steel corrosion process in the basic environment (Gulikers, 2005).

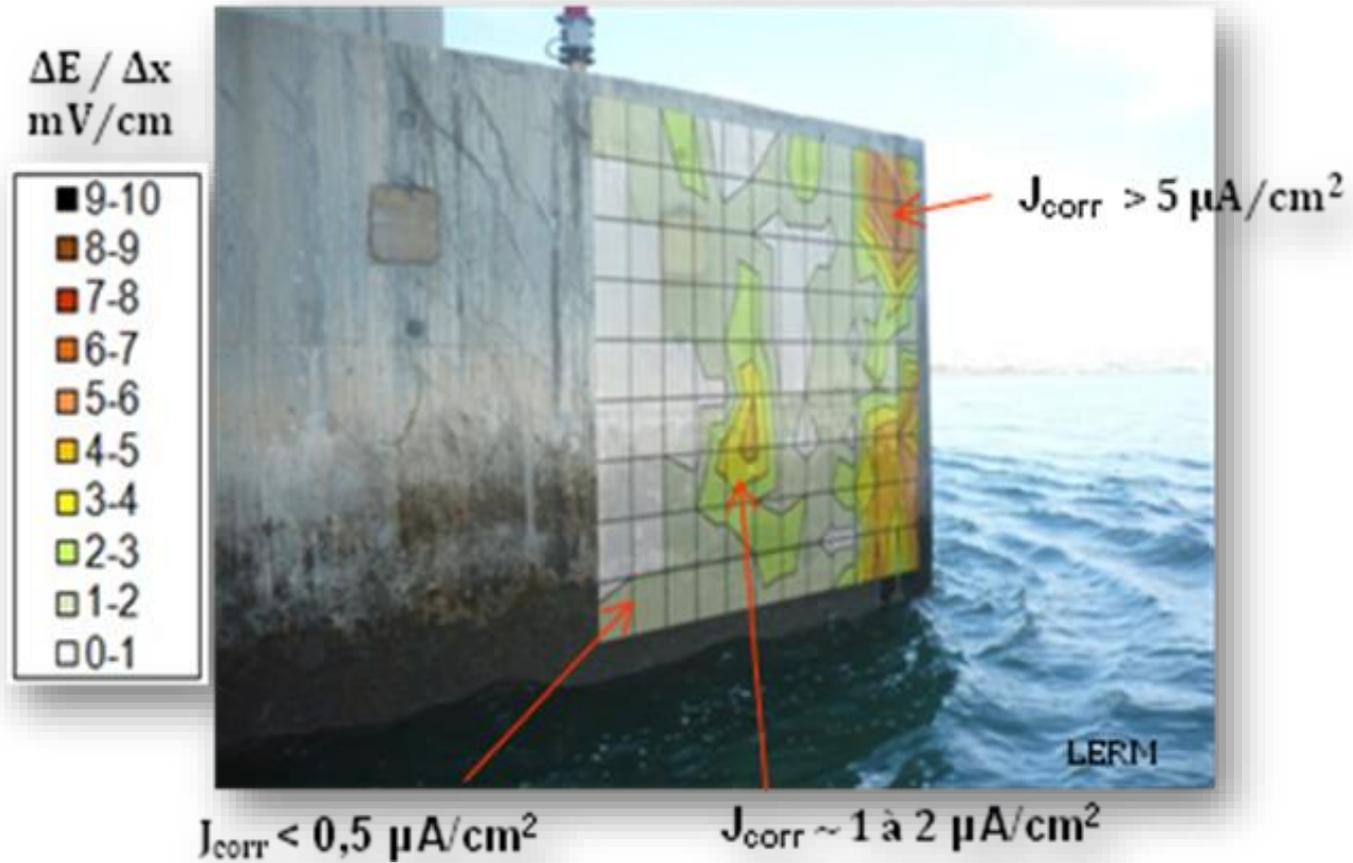


Exemple de résultats de mesure de corrosion



Exemple de carte de gradients de potentiels

Gradient de surface de potentiel de corrosion





Observations au vidéoendoscope

Observations de vides résiduels (gaines de précontrainte, espaces arrière de parements etc.)

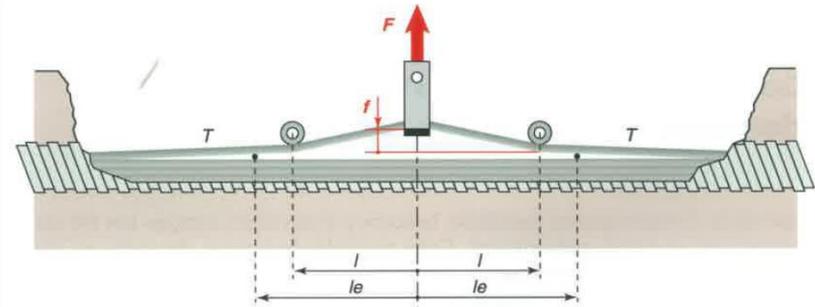


Réalisation d'une vidéo-endoscopie

Vidéo-endoscope
fibre 4 mm de
diamètre



Les mesures de précontrainte résiduelle par essai à l'arbalète



Encadré par le guide technique du LCPC
« Mesure de la tension des armatures de
précontrainte à l'aide de l'arbalète » de
novembre 2009

Les mesures de précontrainte résiduelle par essai à l'arbalète



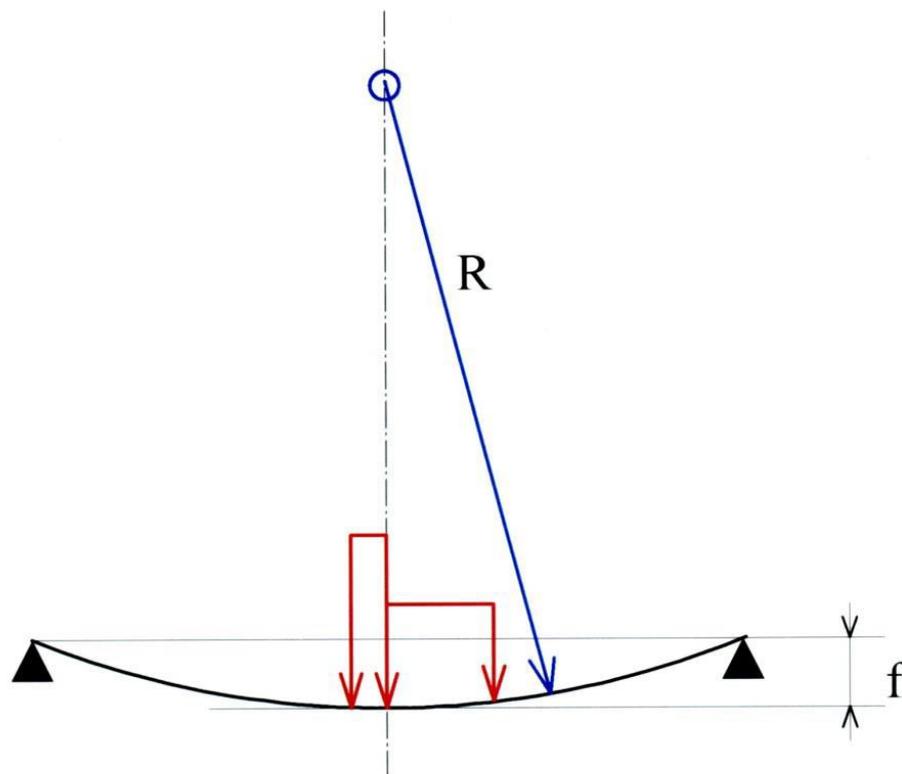
Repérage des armatures passives (en bleu)
et des câbles de précontrainte (en rouge) par radar

Les mesures de précontrainte résiduelle par essai à l'arbalète



Les mesures de courbure d'ouvrages précontraints (courburemétrie)

Mesures de courbure d'un ouvrage sous chargement maîtrisé ou sous trafic normal => surveillance de l'évolution à long terme de la précontrainte.



f, flèche,
R, rayon de courbure,
C, courbure,

$$C(10^{-6} \text{ m}^{-1}) = 1/R$$



Les mesures de courbure d'ouvrages précontraints (courburemétrie)



Encadré par le guide technique n° 82 de l'Ifsttar

Les prélèvements

Des carottages...



... aux poudres



L'apport des essais en laboratoire





Les essais en laboratoire : pour quels besoins ?



Ouvrages en béton :

- **Caractérisation physique** : ferrailage, porosité, R_c , R_t , $E...$
=> dimensionnement, recalcul
- **Caractérisation constituants** : type et dosage ciment, E/C, additions, granulats
- **Potentiel durabilité** : enrobage armatures, porosité, carbonatation, type et dosage ciment, coeff. diffusion Cl^- , perméabilité $O_2...$
- **Bilan pathologique** : pH, carbonatation, $[Cl^-]$, $[SO_3^-]$, examens MEB (néoformations minérales...), etc.



Les essais en laboratoire : pour quels besoins ?

Ouvrages en maçonnerie :

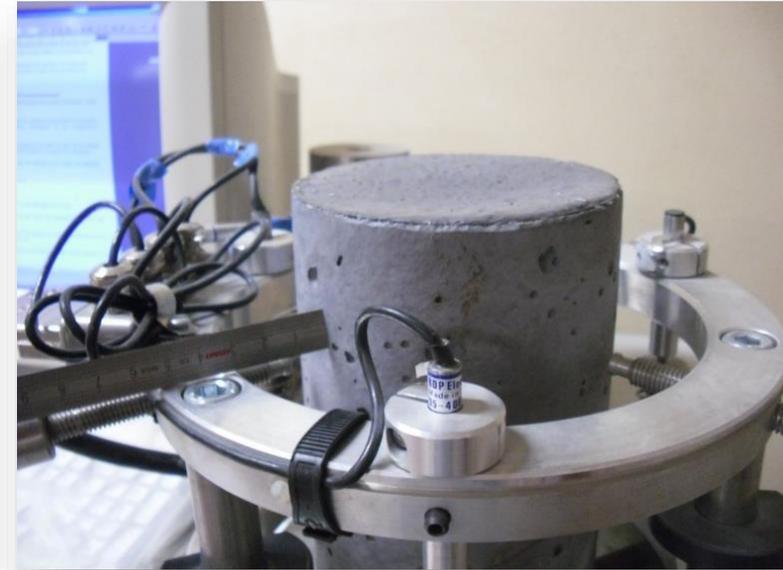
- **Caractérisation minéralogique pierres** : pétrographie, faciès, gisement...
- **Caractérisation physique pierres (et mortiers)** : porosité, capillarité, vitesse du son, R_c , E , ...
=> dimensionnement, recalcul
- **Potentiel durabilité** : recherches vides internes (radar), nature pétrographique, porosité, tenue au gel...
- **Bilan pathologique** : teneur en sels, transformations minéralogiques...



Essais physiques



Presse pour essais de résistance (R_c , R_t)



Mesure du module



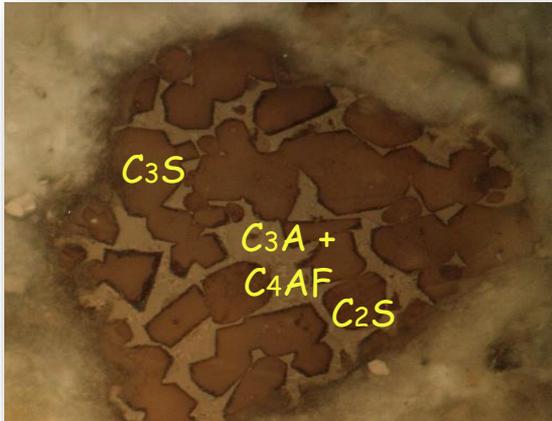
Essai brésilien par fendage

Mesures de masse volumique, porosité, perméabilité à l'eau...



Caractérisation des constituants

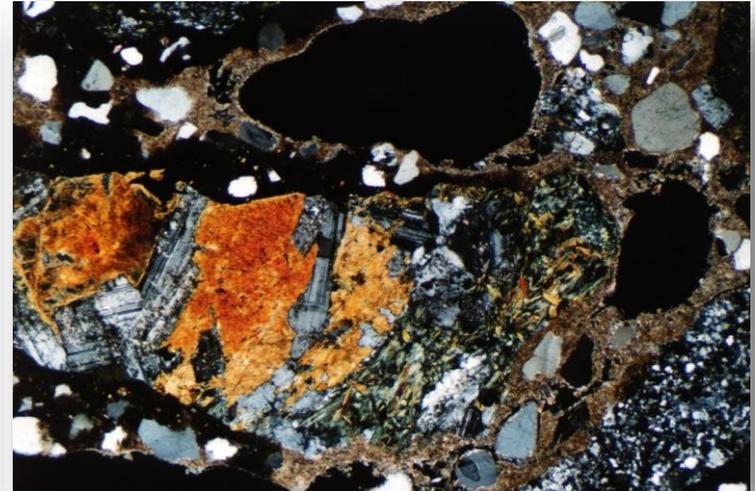
L'identification du liant sur section polie observée par microscopie optique sous lumière réfléchi



Détail d'un grain de clinker

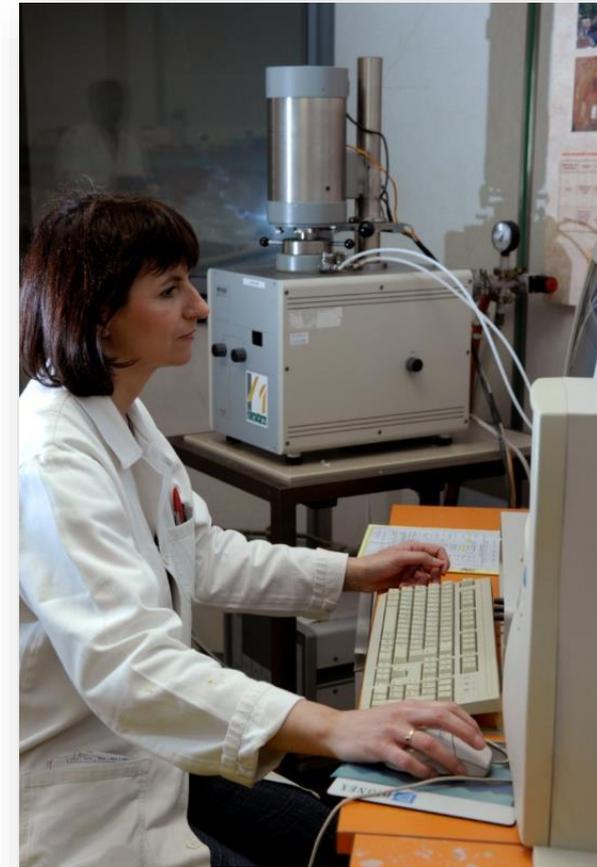


L'identification des granulats par observation de lames minces par microscopie optique en lumière transmise polarisée



> Analyse des bétons

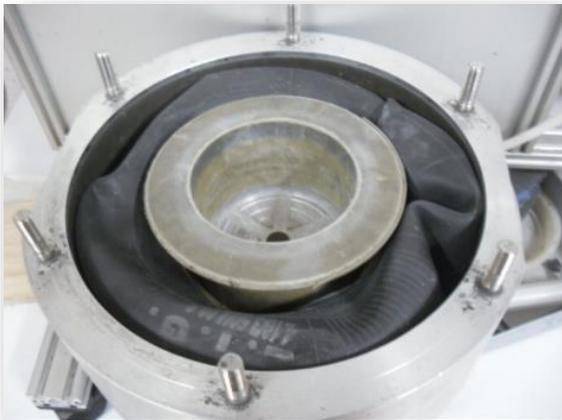
Spectromètre d'émission plasma à couplage inductif (ICP) Dosage de la silice soluble, éléments majeurs et mineurs



Analyses thermiques - ATG – ATD - DSC
Mesure de la teneur en eau liée
des bétons (rapport E/C)

Indicateurs de durabilité

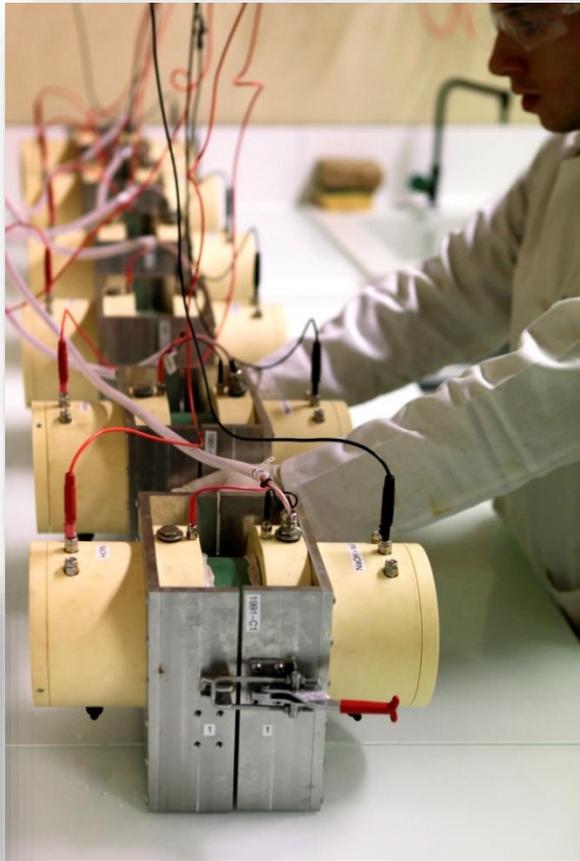
Mesure de la perméabilité à l'oxygène (selon NF P 18-463)





Indicateurs de durabilité

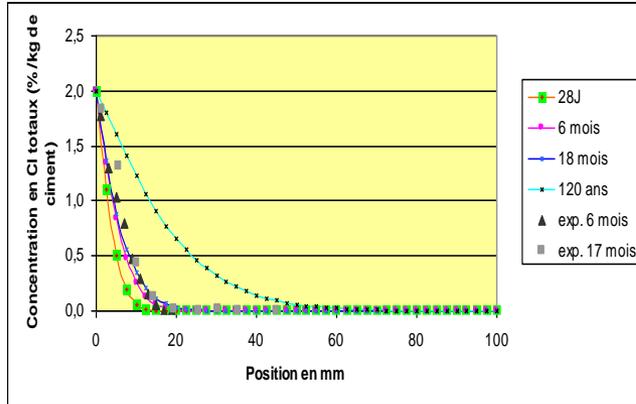
Mesure du coefficient de diffusion des ions chlorures
(selon XP P18-462)



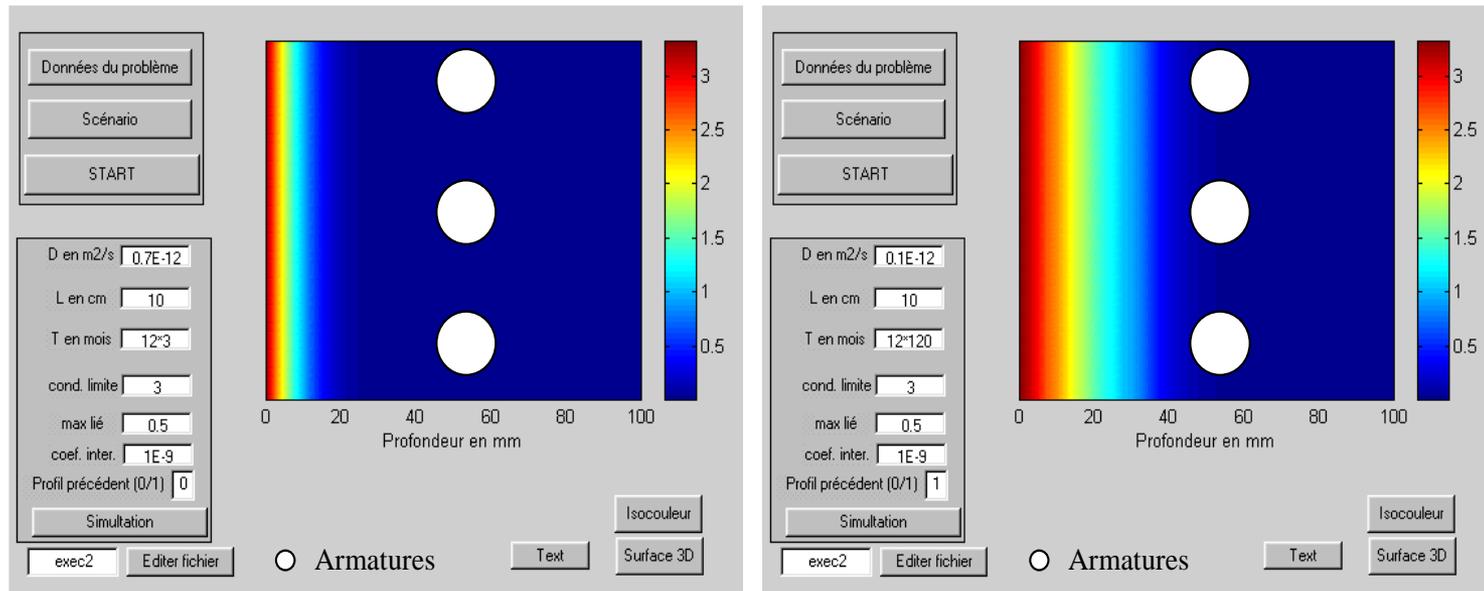
Mesure du front de
pénétration
des ions Cl⁻



Modèle prédictif du LERM de durée de vie des ouvrages



Simulation numérique de profils en chlorures totaux avec le modèle du LERM et comparaison avec les prélèvements effectués en zone de marnage sur le Pont Vasco de Gama à Lisbonne (Portugal)



Simulation numérique à 3 ans (à gauche) et à 120 ans (à droite)
Isocouleurs exprimées en % par rapport à la masse de ciment.

> Le diagnostic pathologique



Mesure de la profondeur de carbonatation par une solution alcoolique de phénolphtaléine

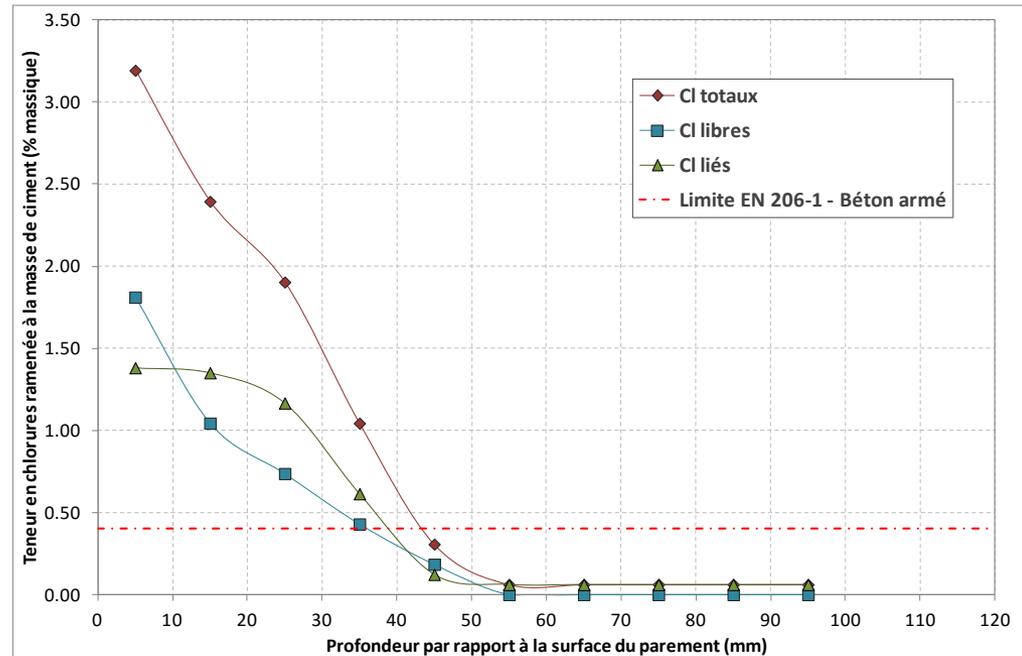
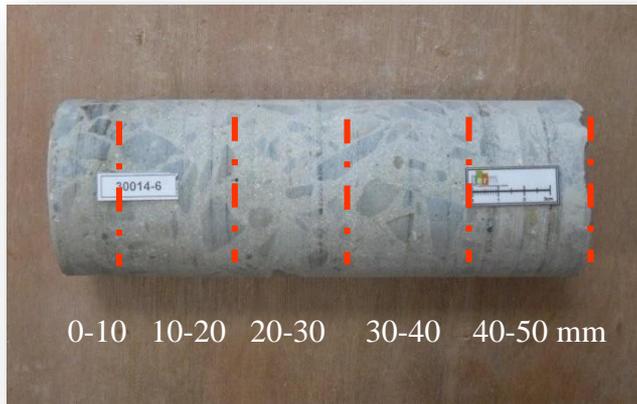


Béton carbonaté

Béton non carbonaté

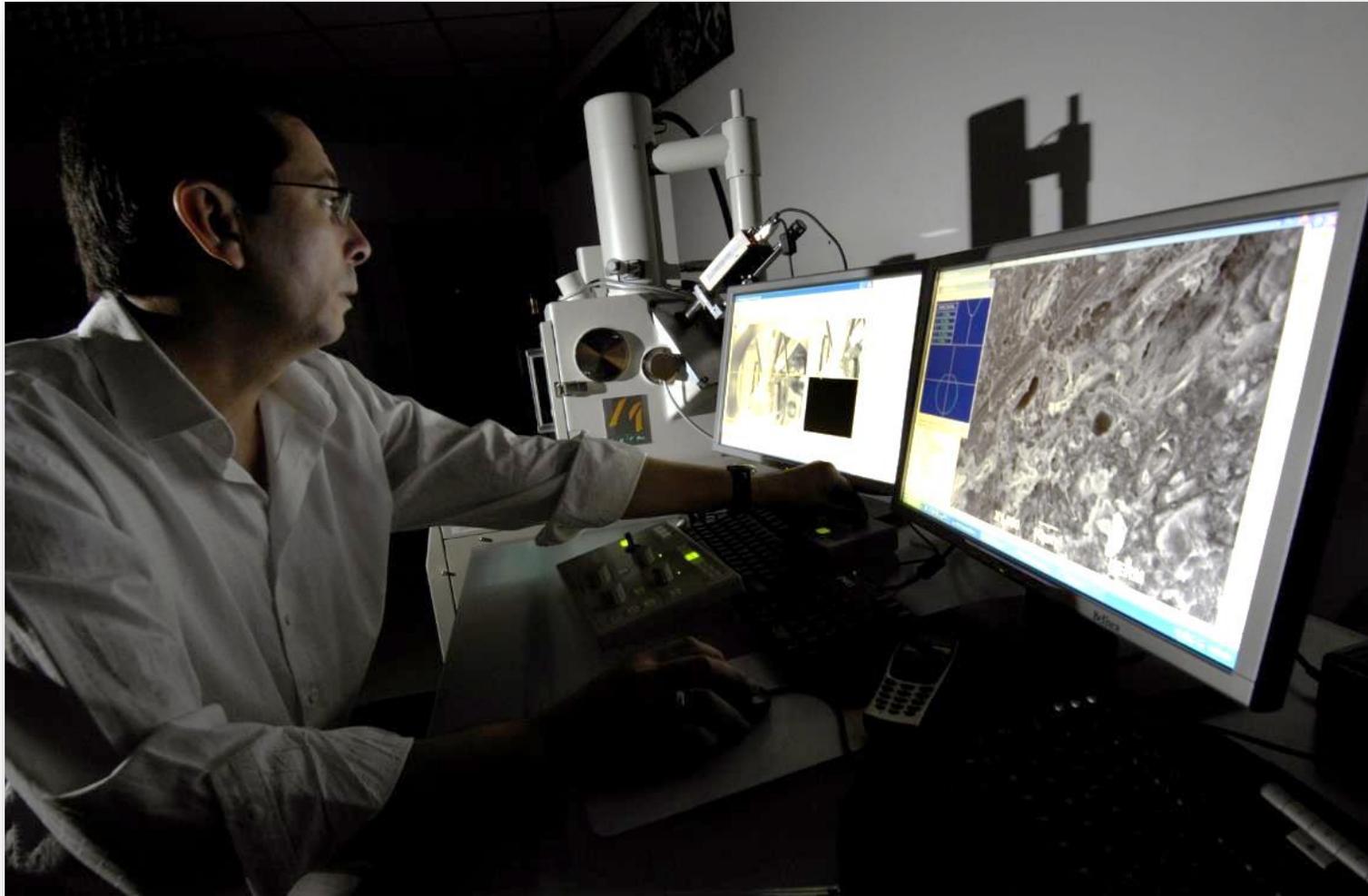


Mesure d'un gradient de concentration en ions chlorures



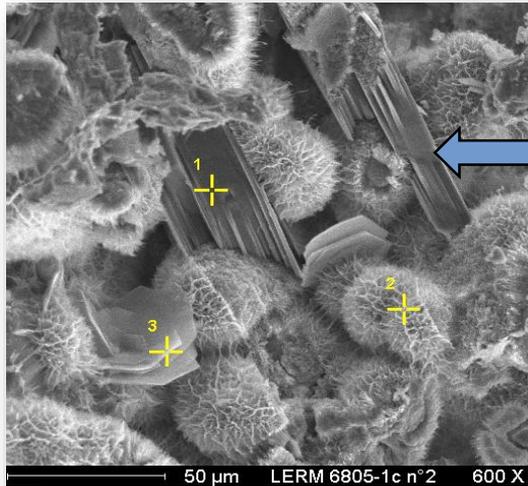
Titrateur potentiométrique

Le microscope électronique à balayage (MEB)

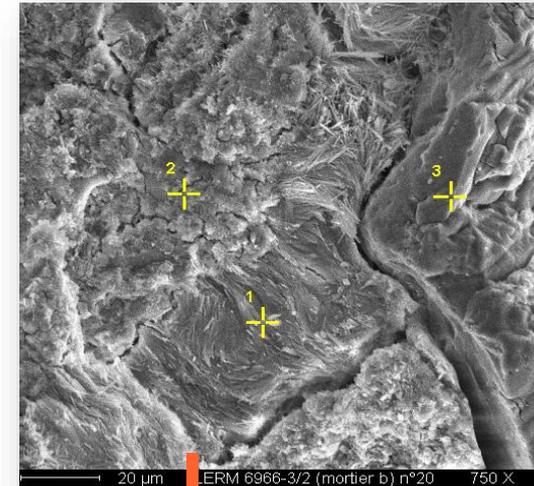




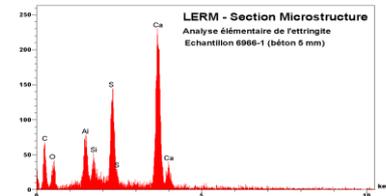
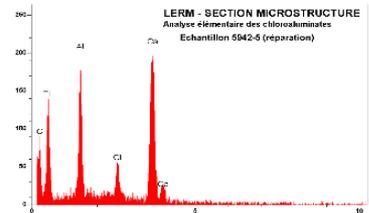
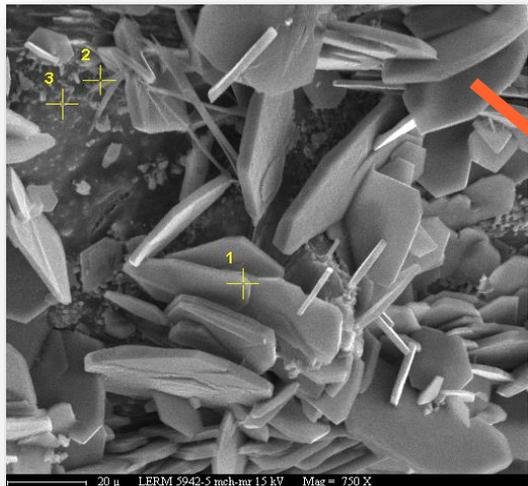
Pathologies : observations au MEB



Faciès des hydrates



Attaque sulfatique :
ettringite massive
gonflement



Analyses EDS

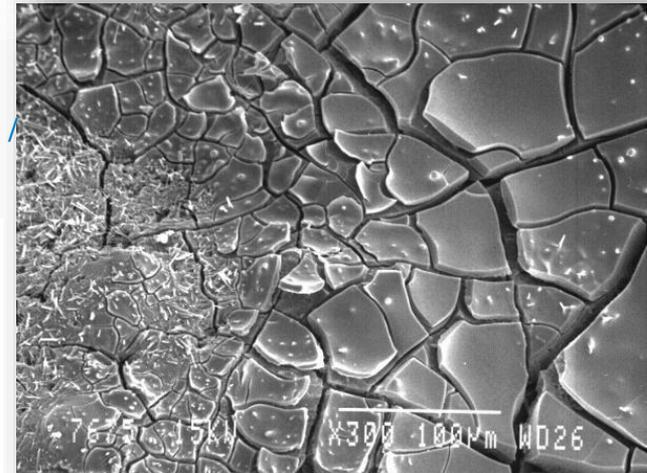
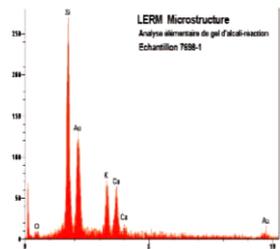
Diffusion des chlorures : corrosion
armatures

Diagnostic pathologique de réaction alcali-granulats (RAG)



Recherche de gels d'alcali-réaction par fluorescence des ions uranyl
Méthode LPC n° 36

Caractérisation au MEB / EDS de gels d'alcali-réaction



> En conclusion...



➤ Apports d'une campagne d'essais non-destructifs et en laboratoire

- recensement pathologies en présence
- évaluation étendue et gravité des désordres
- recherche causes et origine des désordres
- statut sur évolution désordres
- définition des méthodes de réparation et traitement
- aide au préchiffrage de travaux
- aide au recalcul d'ouvrages
- assistance technique MOA / MOE





Merci de votre attention