



26^e

COLLOQUE

sur la progression
de la recherche québécoise
sur les ouvrages d'art

Utilisation de l'analyse d'images pour
l'évaluation de l'endommagement des
infrastructures et la caractérisation des
matériaux.

8 mai 2019

Par Mélissa Roy Tremblay, ing.jr

Direction des matériaux d'infrastructures - DGLC



UNIVERSITÉ
LAVAL



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE



Le génie pour l'industrie

POLYTECHNIQUE
MONTREAL



Québec 

Plan de la présentation

- 1. Introduction
 - 1.1 Problématiques
 - 1.2 Qu'est-ce que l'analyse d'images
- 2. Contrôle de la qualité
 - 2.1 Facteur d'espacement des bulles d'air (Béton)
- 3. Quantification de l'endommagement
 - 3.1 Sur le terrain
 - 3.2 En laboratoire
- 4. Caractérisation des matériaux
 - 4.1 Tomodensitométrie
 - 4.2 MicroCT
 - 4.3 La micro fluorescence des rayons X
- 5. Conclusion

Introduction

Contrôle

Endommagement

Caractérisation

Conclusion



1.1 Problématiques

- Dommages externes se reflètent-ils à l'intérieur de la structure?
- État actuel → Prédiction, évolution à travers le temps
- Outil de quantification et de diagnostic

Outils d'évaluation

Contrôle qualité

- Béton, enrobé etc...
- Essais destructifs
- Laboratoire ≠ ouvrages
- Essais longs à réaliser

- Chute des propriétés mécaniques
- Corrélation avec l'endommagement?
- Patron de fissuration

Fissurations

Caractérisation des matériaux

- Propriétés physiques
- Porosité
- Composition chimique
- Structure interne
- Orientation
- Inclusions / défauts
- Production – Utilisation - Réparation

Introduction

Contrôle

Endommagement

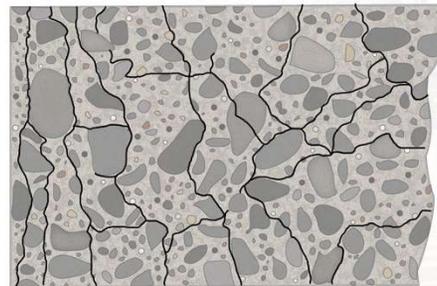
Caractérisation

Conclusion

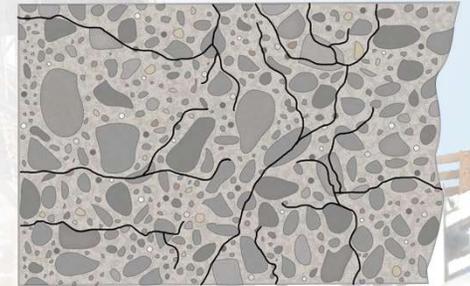
1.1 Problématiques

- Chute des propriétés mécaniques
- Corrélation avec l'endommagement?
- **Patron de fissuration**

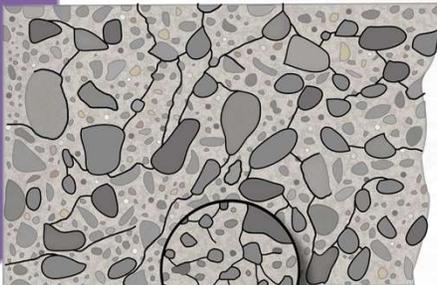
Fissurations



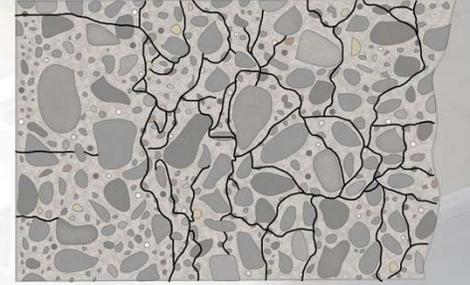
A) Gel-dégel



B) RAS (particules du gros granulat)



C) DEF



D) RAS (sable)

Adaptée de BCA, 1992

Introduction

Contrôle

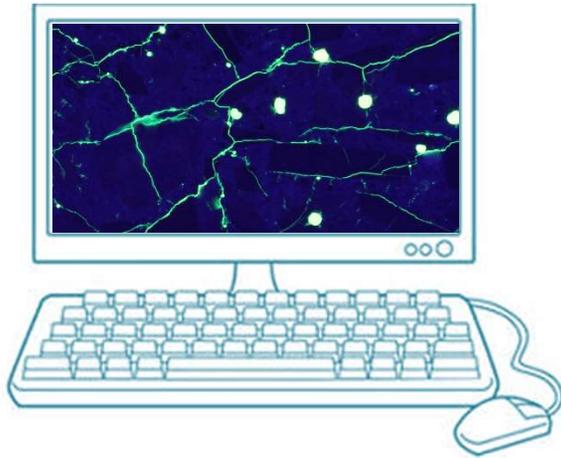
Endommagement

Caractérisation

Conclusion

1.2 Analyse d'images

- L'analyse d'images permet la **reconnaissance** d'éléments d'une image à l'aide d'une **série de routine informatique** dans le but d'en **extraire de l'information**.



- Morphologie (Plates et allongées)
- Densité
- Fissuration (orientation, longueur, épaisseur)
- Circularité
- Porosité
- Composition chimique

Les routines informatiques utilisent des **algorithmes** tels que la **squelettisation** et le **seuillage** pour **améliorer la qualité** de l'image ou pour effectuer une **segmentation** (classification) des éléments.

Plusieurs façons d'obtenir des images et beaucoup sont non destructives...

Introduction

Contrôle

Endommagement

Caractérisation

Conclusion

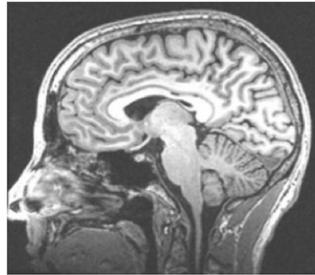
1.3 Essais non-destructifs

- Examen visuel – Endoscopie – Photographie – Stéréoscopie
- Acoustique
- Électromagnétique – Courants Foucault – Magnétoscopie – IRM
- Rayon X/Gamma/Neutron – Tomographie – Radiographie
- Ultrasons – Échographie – Sonars
- Thermographie infrarouge
- Laser – Cisaillographie – LiDAR
- Photogrammétrie
- Micro-ondes (Haute fréquences) – Géoradar

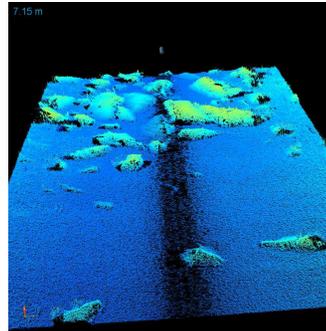
1.3 Essais non-destructifs



Stéréoscopie

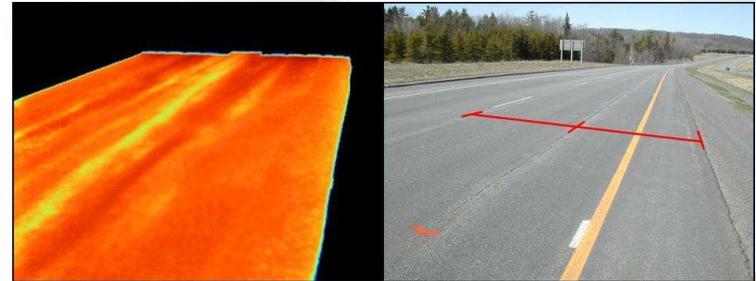


IRM



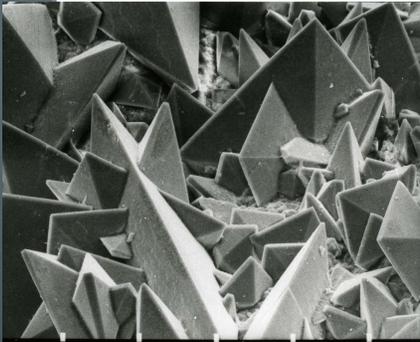
Sonars

(Échosondeur – Bathymétrie)

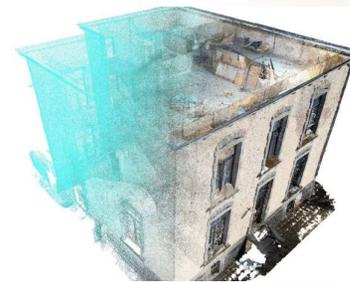
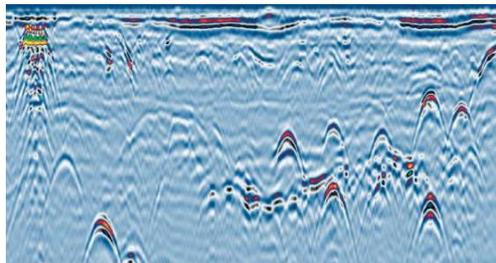


Thermographie infra-rouge

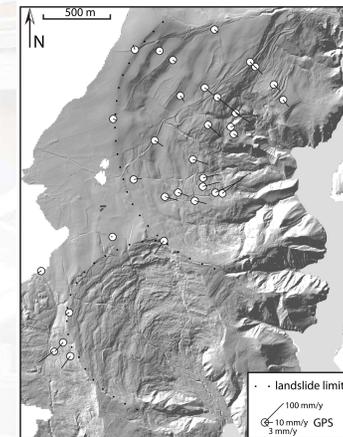
MEB



Géoradar



Photogrammétrie



LiDAR

Introduction

Contrôle

Endommagement

Caractérisation

Conclusion

1.3 Essais \pm destructifs

- Examen visuel – Endoscopie – Photographie – Stéréoscopie
- Acoustique
- Électromagnétique – Courants Foucault – Magnétoscopie – IRM
- - Microscope optique + caméra
- - Loupe binoculaire + caméra
- - Microscopie électronique à balayage
- - Thermographie infrarouge
- - Laser – Cisailographie – Lidar
- Photogrammétrie
- Micro-ondes (Haute fréquences) – Géoradar

2. Contrôle de la qualité

Introduction

Contrôle

Endommagement

Caractérisation

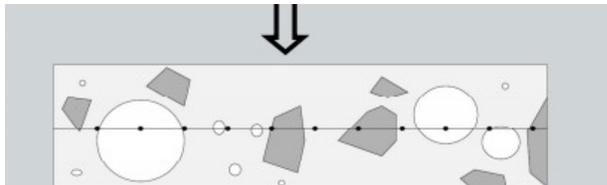
Conclusion



2.1 Facteur d'espacement des bulles d'air (Béton)

Méthodes conventionnelles → Procédure C: Analyse d'image

ASTM C457
Procédure A/B



Prends plusieurs heures!



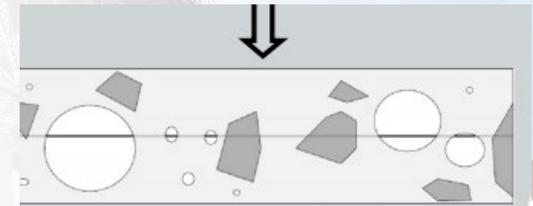
Crédit: Sébastien Bouteille

Loupe binoculaire
(Stéréomicroscope)



Avec une caméra
permettant
l'acquisition d'images

EN 480-11



RapidAir 457



Facteur d'espacement des bulles d'air (Béton)

	Méthode Manuelle		Analyse d'images			
Méthodes	ASTM C457 - Procédure A	ASTM C457 - Procédure B	ASTM C457 - Procédure C	EN 480-11	RapidAir 457 Allemande	Alternative Française
Principe	Longueur de traverse	Par point d'arrêt	Longueur de traverse	Longueur de traverse	Longueur de traverse (ASTM C457 - A ou EN-480-11)	EN 480-11 modifiée
Paramètres	Tt Ta N Tp	l St Sa Sp N	Tt Ta N P*	P N A ou α	A FE α	P N A
Désavantages	+ Destructif & Long formation préalable		- Teneur en pâte inconnue sauf théorique - Doit être fait à la fin (Encre)	Surface de pâte théorique (formule du béton = surestimation)	Boite noire	Deux acquisitions d'images :
Coloration/préparation	Standard (découpe + polissage)	Standard (découpe + polissage)	Standard + Encre permanente noire Poudre blanche	Standard + Encre permanente noire Alumine	Standard + Encre noire + chauffée à 55 °C + pâte de zinc ou BaSO4	Surface de pâte + bulles d'air Standard + Alumine + Encre noire (après l'acquisition de la surface de pâte)

Tt: Longueur totale traversée

Ta: longueur traversée dans les vides

N: nombre de vides d'air traversés par des lignes

Tp: longueur parcourue à travers la pâte

l: distance linéaire entre les arrêts le long de la traverse

St: le nombre total d'arrêts

Sa: le nombre d'arrêts dans les vides d'air

Sp: le nombre d'arrêts en pâte

N: nombre de vides d'air coupé par la ligne de traverse

P: proportion de surface de pâte

N: Nombre de bulles d'air

A: quantité d'air (ou surface spécifique α)

pour $P/A \leq 4,33$: P et N & pour $P/A \geq 4,33$: P, N et A

A: Teneur en air totale

FE: facteur d'espacement

α : surface spécifique

Introduction

Contrôle

Endommagement

Caractérisation

Conclusion

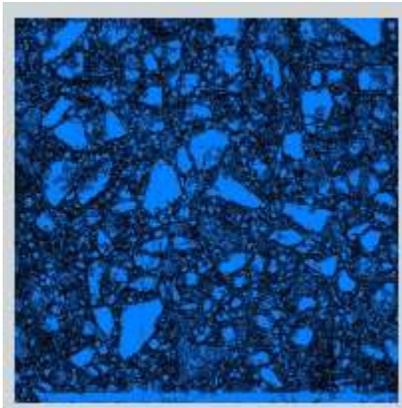
2.1 Facteur d'espacement des bulles d'air (Béton)

- Coupe + Polissage
- Augmenter le contraste:
 - Encre permanente noire
 - Poudre blanche
 - Sulfate de baryum, pâte de zinc, oxyde de silicium ou alumine
- Surface de pâte (théorique = surévaluation)

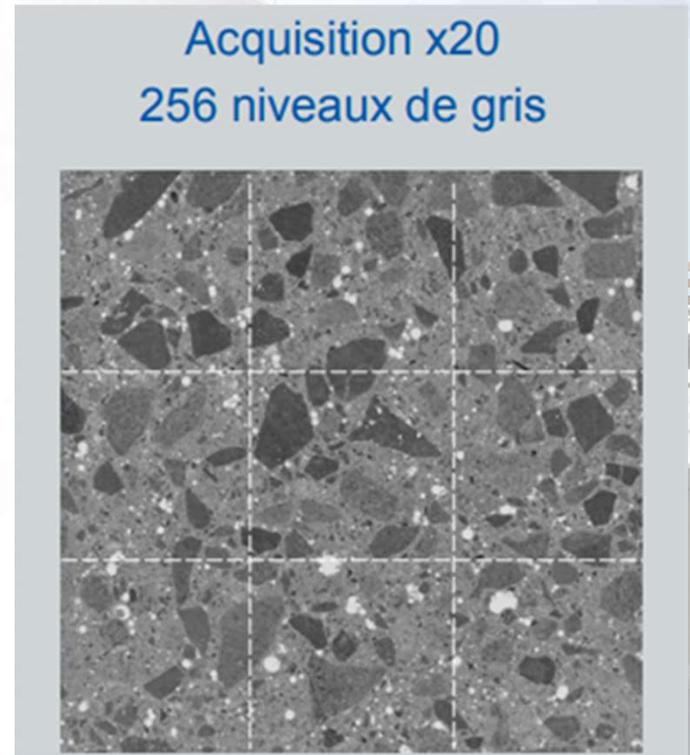


2.2 Facteur d'espacement des bulles d'air (Béton)

- Alternative française:
 - Surface de pâte testée par AI
- Segmentation (seuillage)



2 acquisitions



Crédit: Sébastien Bouteille / Lyon

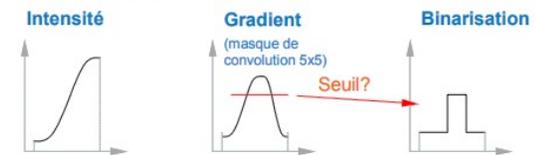
Facteur d'espacement des bulles d'air (Béton)

- 2 acquisitions: Surface de pâte et bulles d'air;
 - Recomposition d'image mosaïque par programmation;

Étape 1

Segmentation des granulats et vides d'air

Utilisation de l'opérateur gradient (Canny-Derriche)



	Caractéristiques des acquisitions	
	surface de pâte	réseau de bulles d'air
Éclairage	Annulaire incident	
Grossissement optique	X10	
Grossissement numérique	X2	X10
Type d'image	Intensité en 256 niveaux de gris	
Objets acquis	Surface de 90 mm x 90 mm	14 bandeaux de 0,88 mm x 89,30 mm espacés de 6 mm
Image	19373 pixels x 19373 pixels	14 x 4 x (960 pixels x 24320 pixels)
	Image fractionnée en 9 lors du traitement	Bandeaux fractionnés en 4 lors du traitement

Figure 2.1 Caractéristiques des acquisitions pour l'évaluation de la surface de pâte et la détermination du réseau de bulles d'air

on

Conclusion

2.2 Facteur d'espacement des bulles d'air (Béton)

- Réseau de bulles d'air

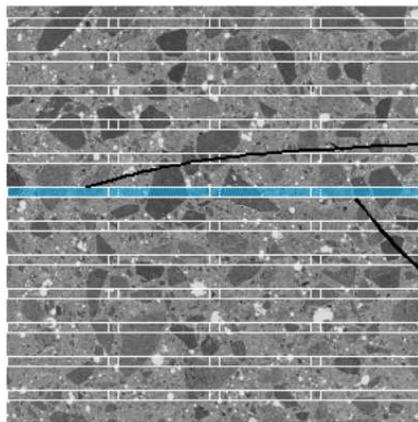
Encre et
Aluminé



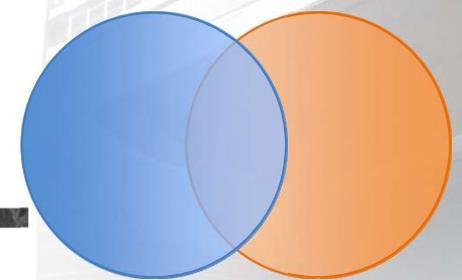
Seuil 55



14 bandeaux 0,8x90 mm²
Résolution 1 pixel = 0,918 mm²



Bandeau découpé en 4 images,
24320 x 960 pixels²



Introduction

Contrôle

Endommagement

Caractérisation

Conclusion

3. Quantification de l'endommagement

Introduction

Contrôle

Endommagement

Caractérisation

Conclusion

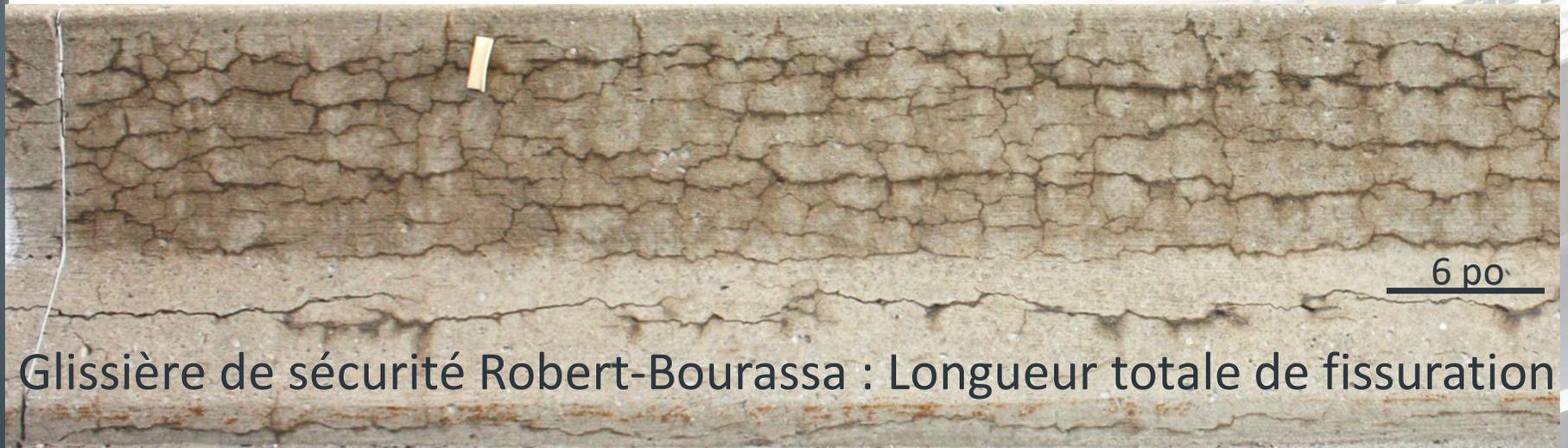


3.1 Quantification de l'endommagement

- Appareil photo numérique haute résolution

Sur le terrain

- Suivi de l'endommagement;
- Traçage semi-automatique des fissures et quantification.



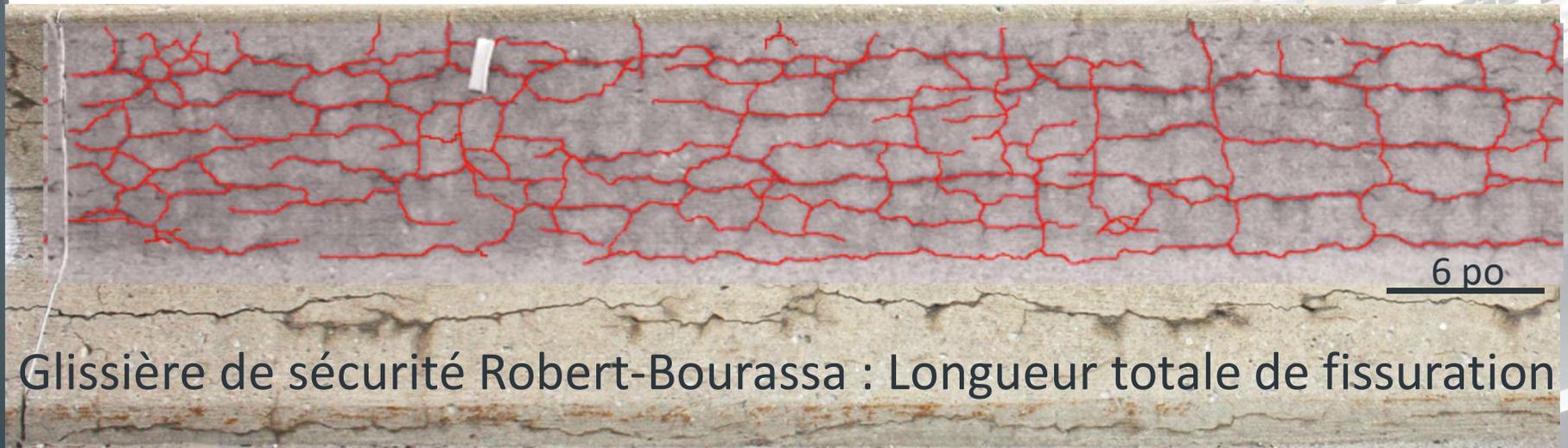
Glissière de sécurité Robert-Bourassa : Longueur totale de fissuration

3.1 Quantification de l'endommagement

- Appareil photo numérique haute résolution

Sur le terrain

- Suivi de l'endommagement;
- Traçage semi-automatique des fissures et quantification.



Glissière de sécurité Robert-Bourassa : Longueur totale de fissuration

3.2 Quantification de l'endommagement

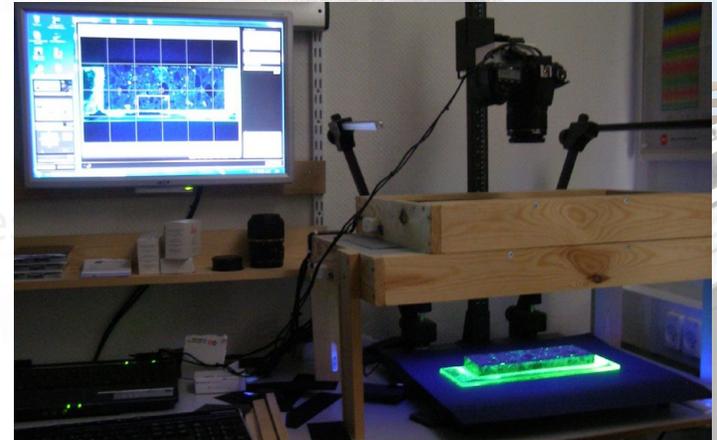
- Appareil photo numérique haute résolution

Sur le terrain

- Suivi de l'endommagement;
- Traçage semi-automatique des fissures

En laboratoire

- En laboratoire, fixé à un montage:
- Photographie numérique de prisme ou de carotte
- Requiers une certaine préparation des échantillons.



Introduction

Contrôle

Endommagement

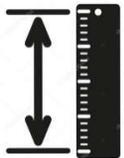
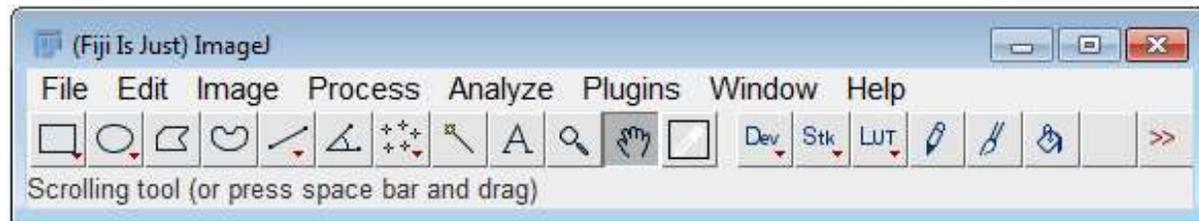
Caractérisation

Conclusion

3.2 Quantification de l'endommagement

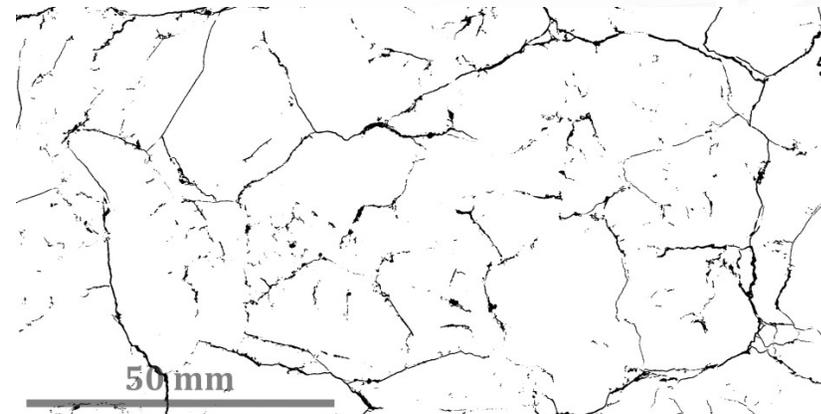
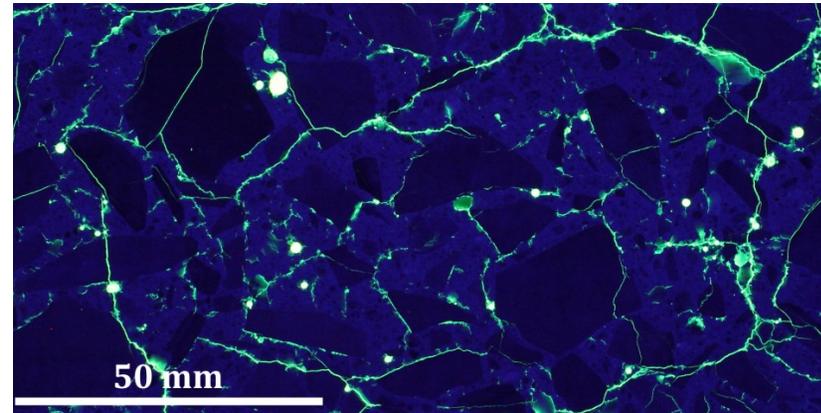
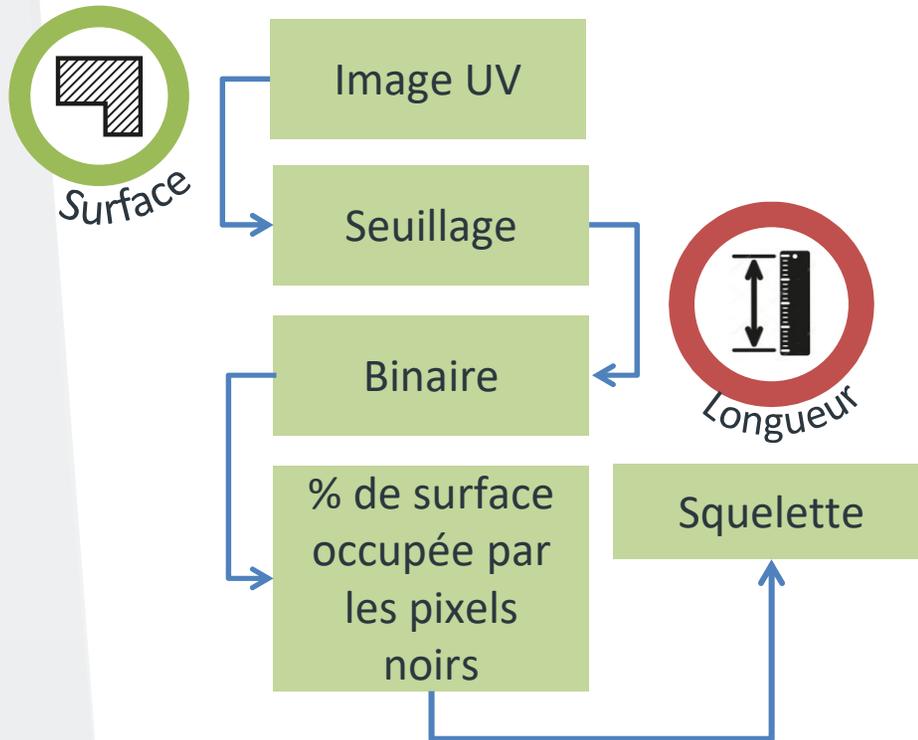


% Surface fissurée imprégnée d'époxy fluorescente

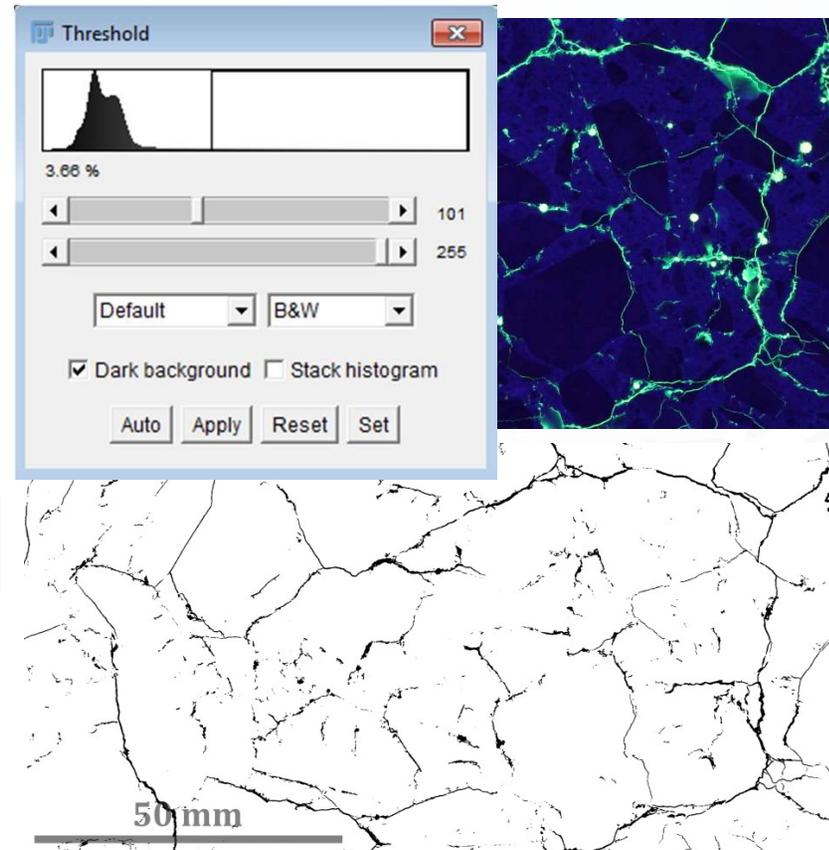
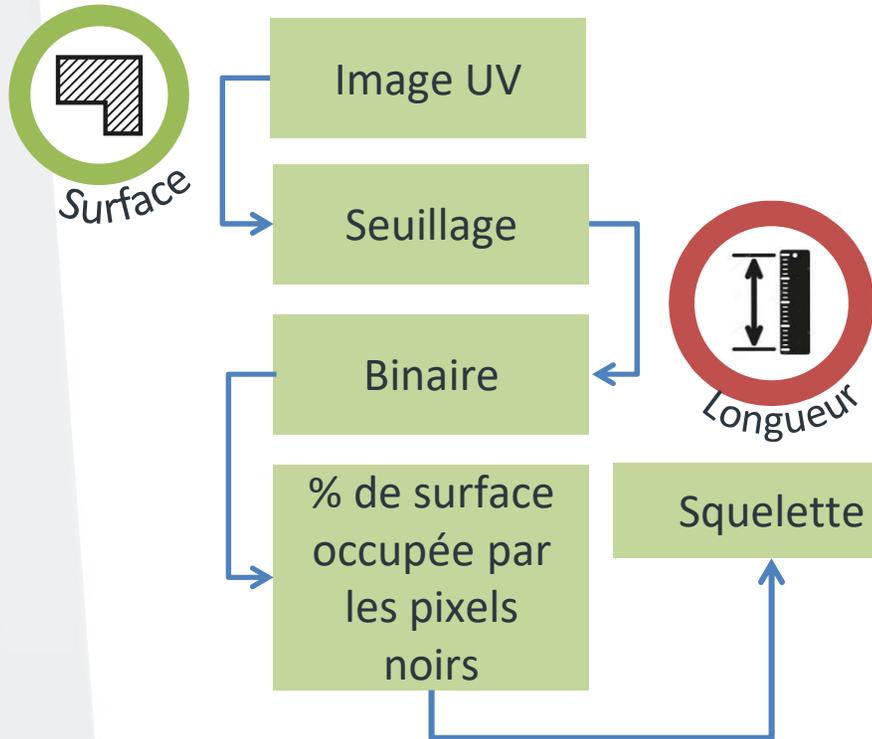


Longueur totale des fissures par unité de surface

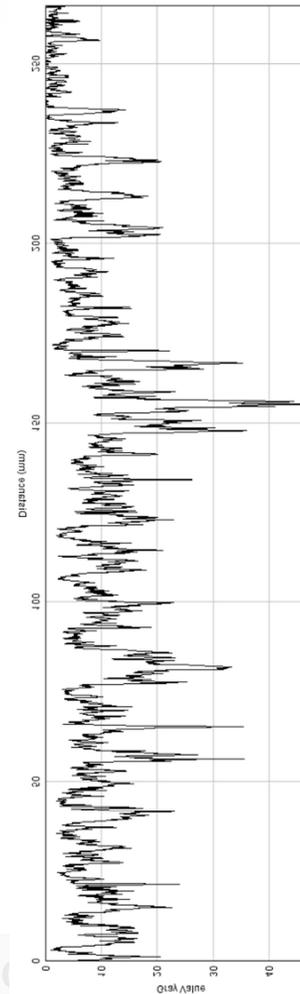
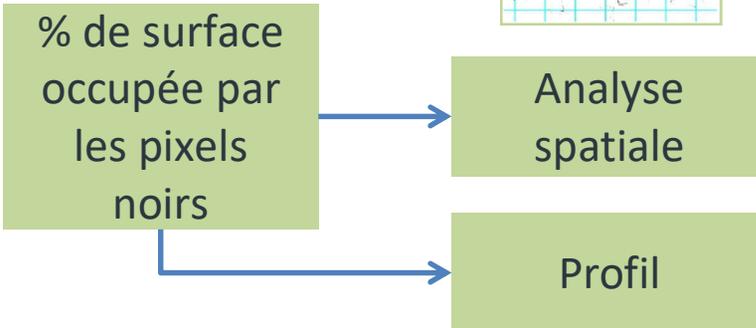
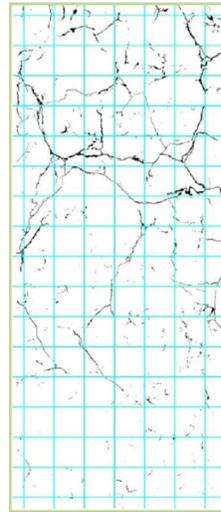
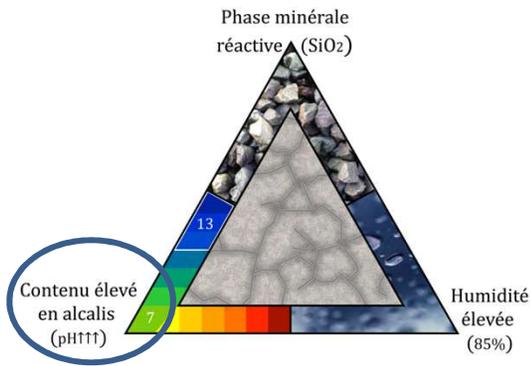
3.2.1 Quantification



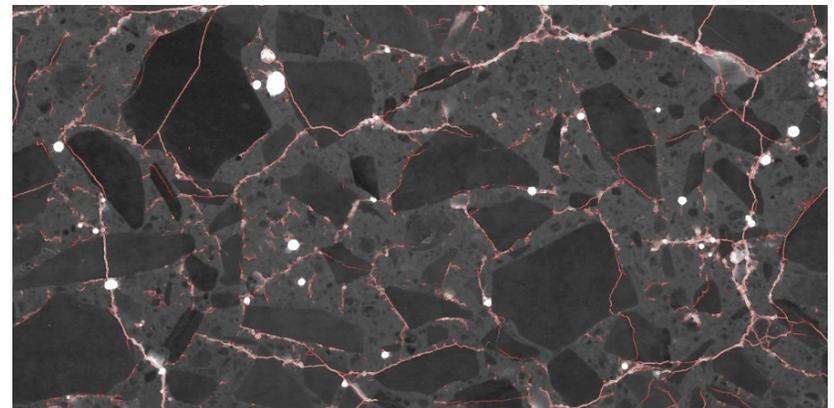
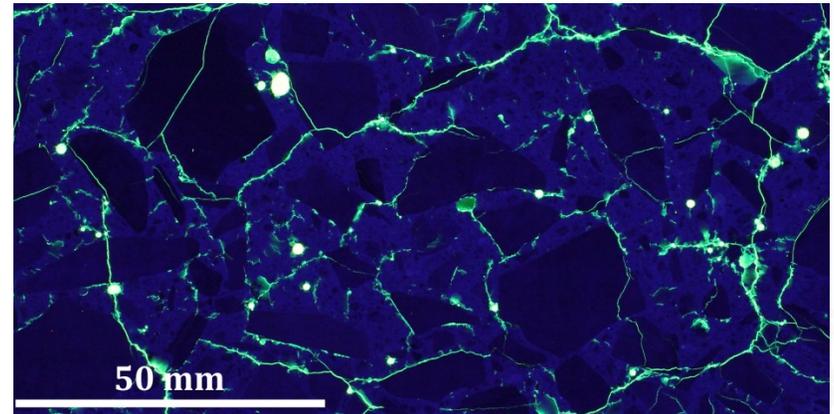
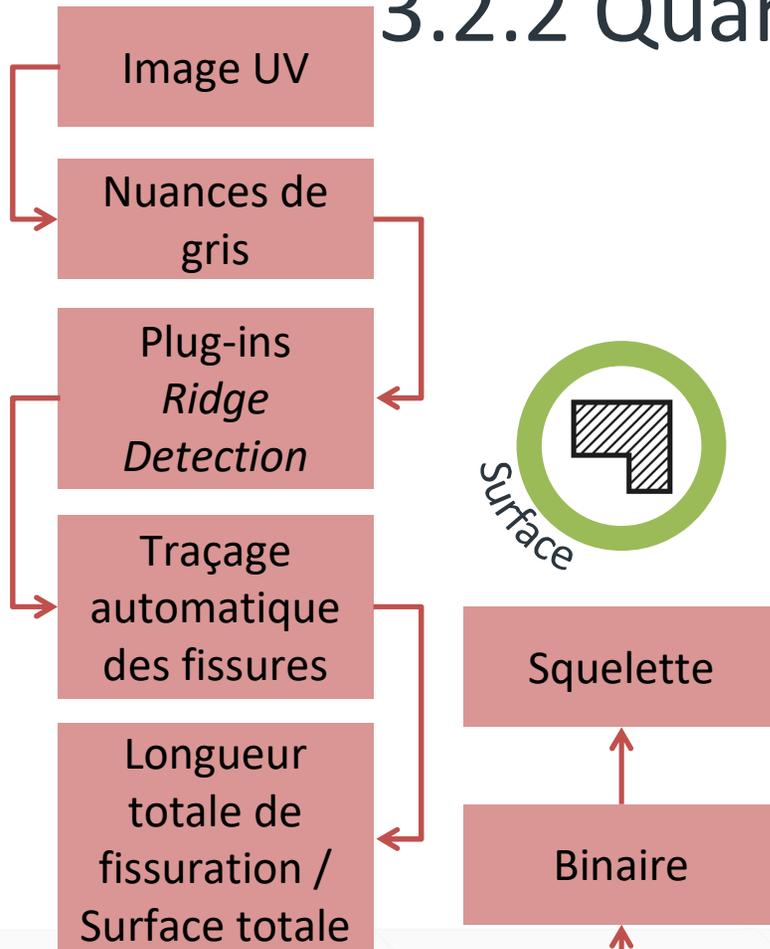
3.2.1 Quantification



3.2.1 Analyse spatiale



3.2.2 Quantification



3.2.2 Quantification

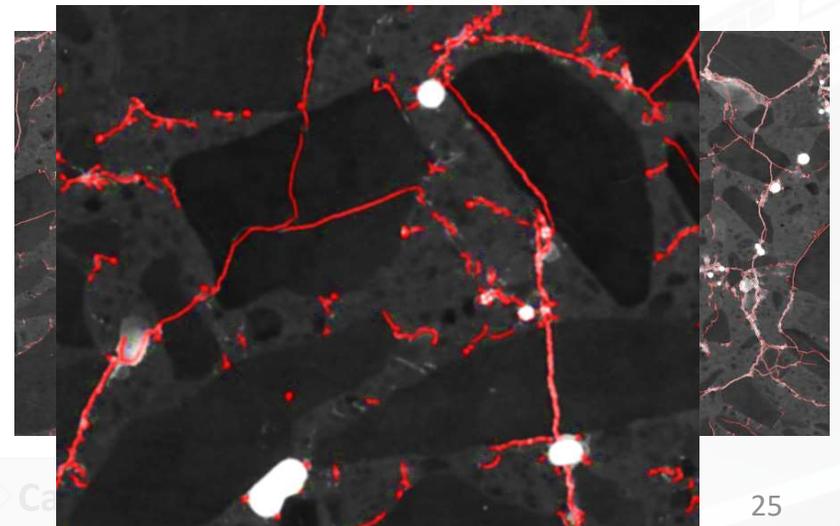
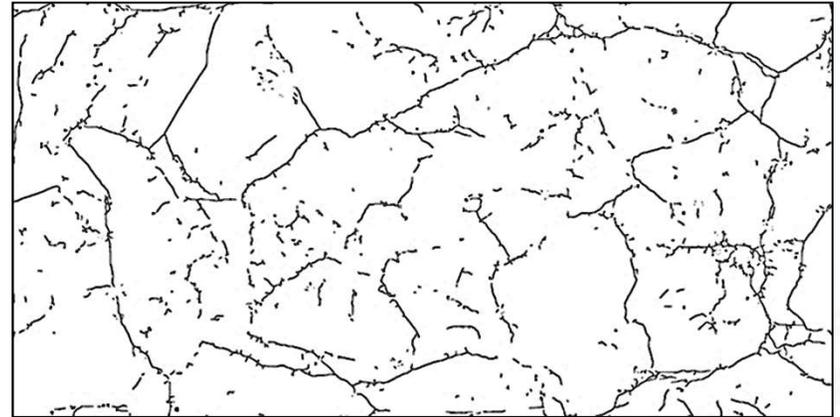
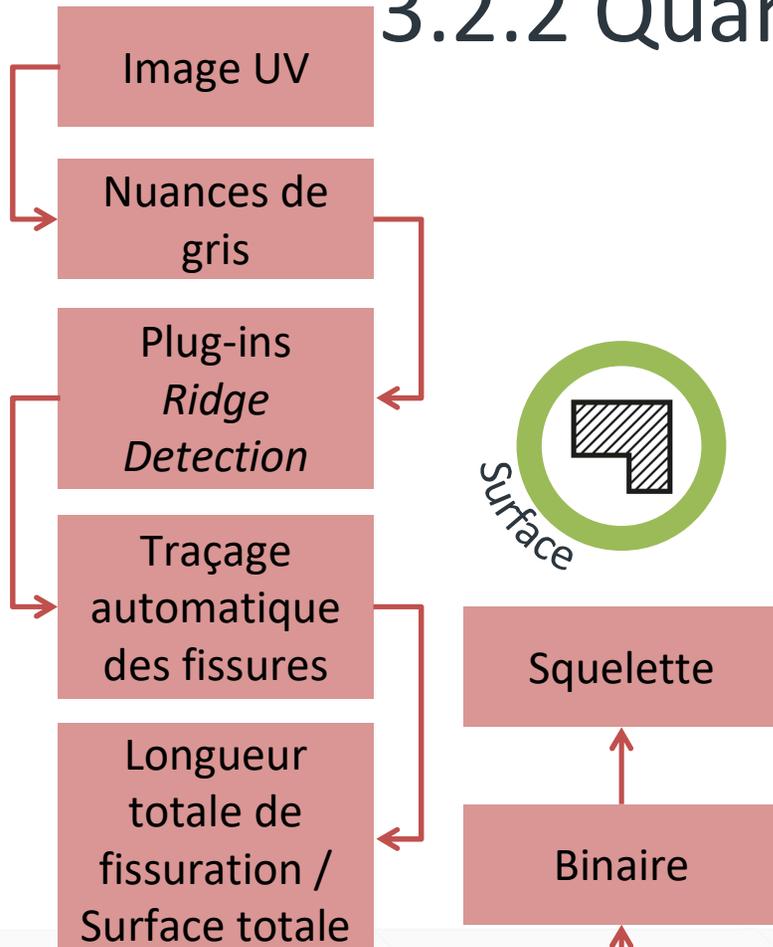




Image UV

Nuances de gris

Plug-ins
*Ridge
Detection*

Traçage
automatique
des fissures

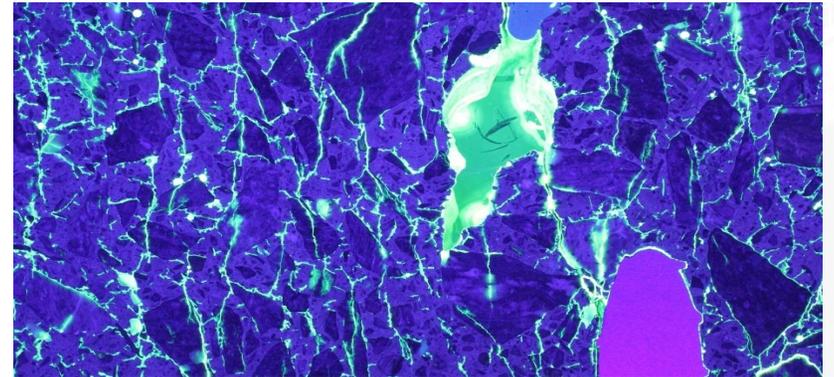
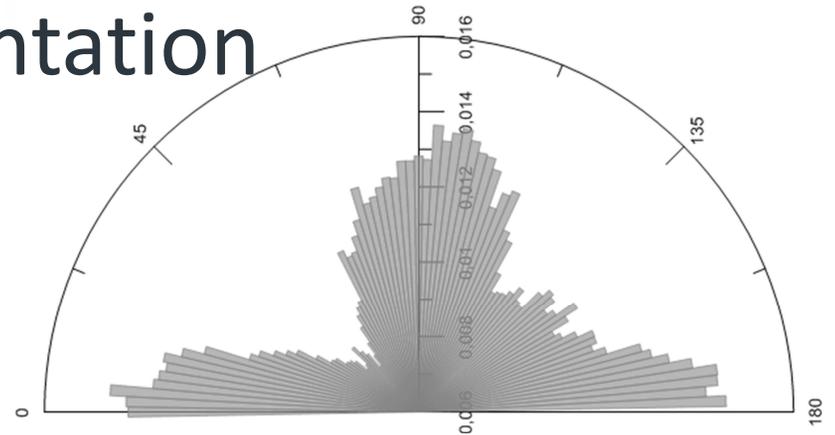
Longueur
totale de
fissuration /
Surface totale

3.2.2 Orientation



Squelette

Binaire



Orientation
des fissures

Plug-ins
Directionality

Introduction

Contrôle

Endommagement

Ca

Conclu

26

4. Caractérisation des matériaux

Introduction

Contrôle

Endommagement

Caractérisation

Conclusion



4. Tomodensitométrie (Tomographie)

- Technique d'imagerie non destructive qui mesure l'absorption de rayons X des matériaux et transforme ce coefficient en valeur de radiodensité (HU).



Tomodensitomètre de l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS)

Résolution:
97 μm x 97 μm x 400 μm

INRS
UNIVERSITÉ DE RECHERCHE



Lab CT Scan

Laboratoire multidisciplinaire de tomodensitométrie
pour les ressources naturelles et le génie civil

Introduction

Contrôle

Endommagement

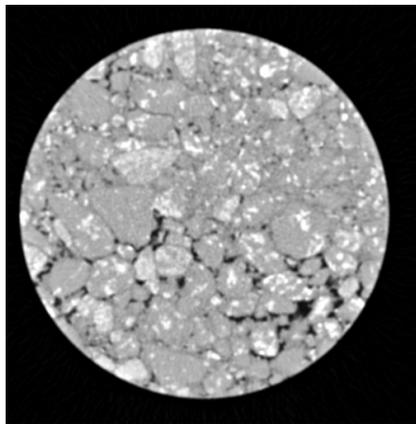
Caractérisation

Conclusion

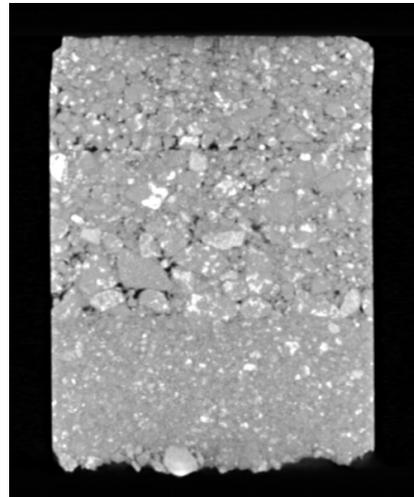
4.1 Tomodensitométrie (Tomographie)

- Permet d'obtenir des vues en coupe selon trois plans

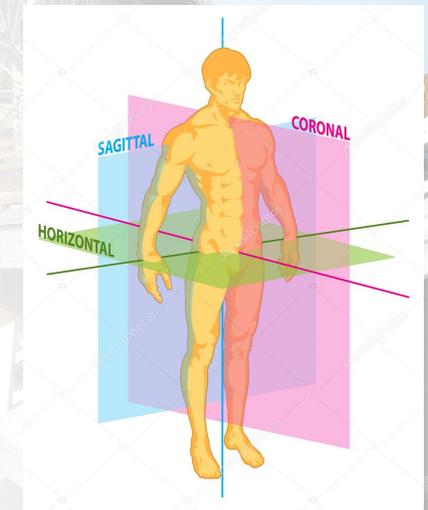
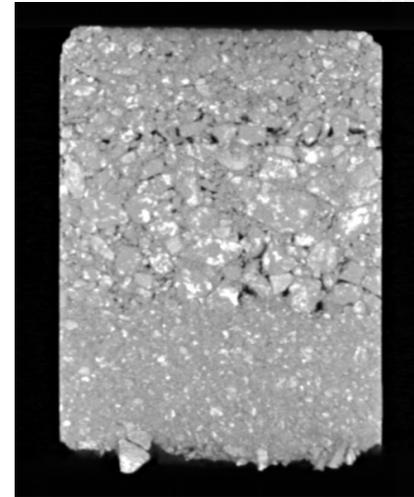
Axial (Horizontal)



Coronal



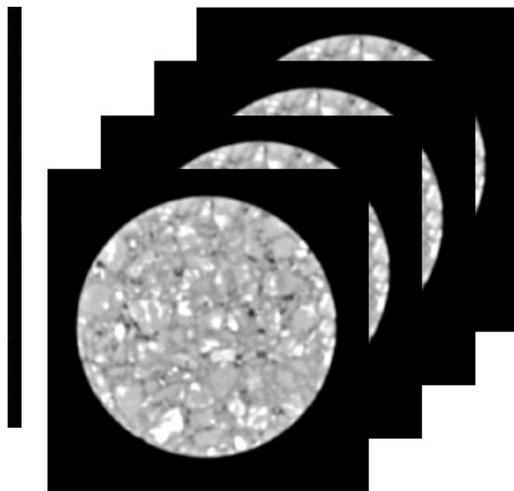
Sagittal



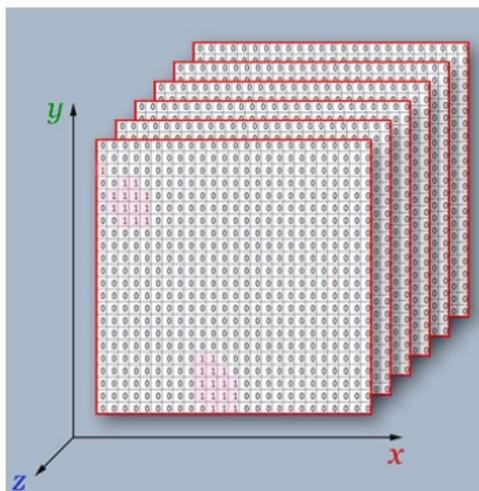
4.1 Tomodensitométrie (Tomographie)

- Permet d'obtenir des vues en coupe selon trois plans

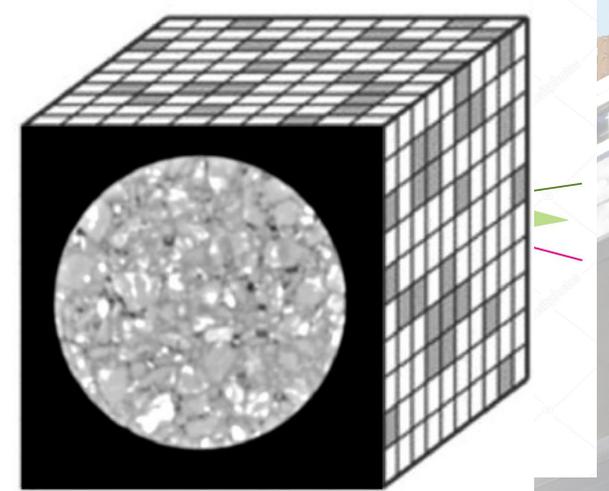
Série d'images DICOM



Contient des mesures de densités



Assemblé en matrice 3D



- Chaque coupe mesure 0.6 mm d'épaisseur

Introduction

Contrôle

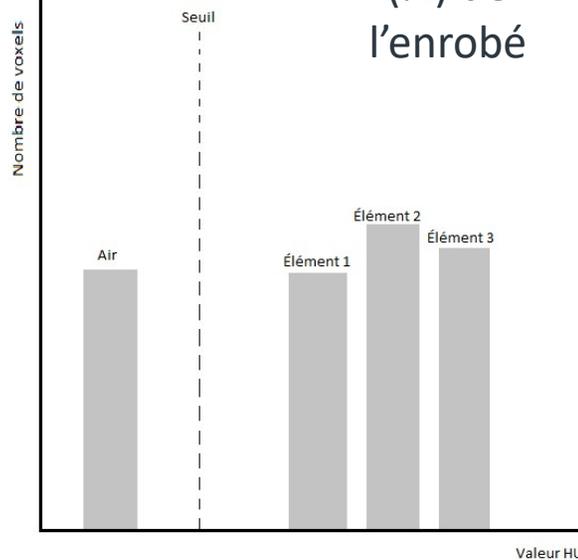
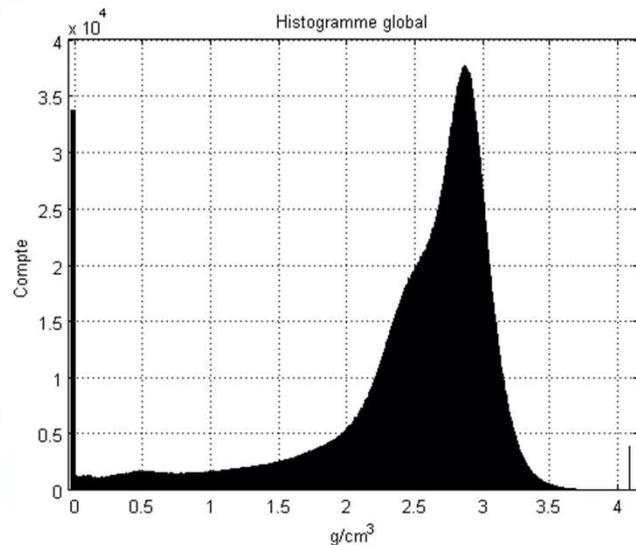
Endommagement

Caractérisation

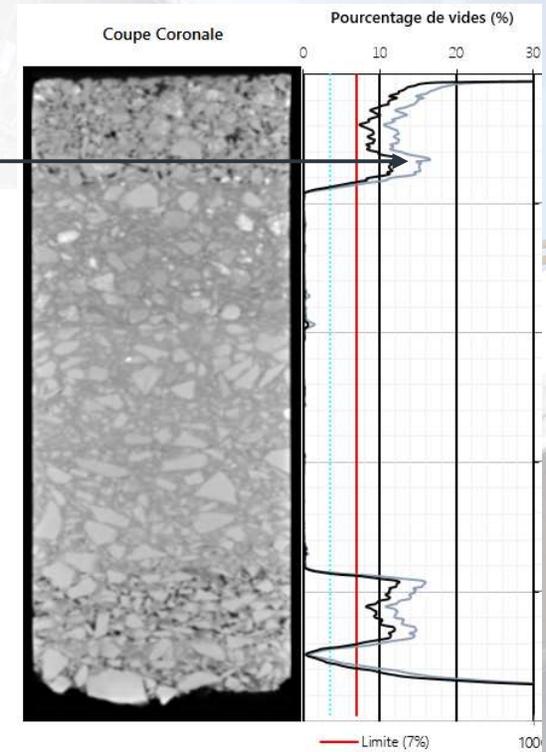
Conclusion

4.1 Tomodensitométrie : Types d'analyse

- Vue en coupe et distribution des vides
- Histogramme de densité



Porosité
(%) de
l'enrobé



Introduction

Contrôle

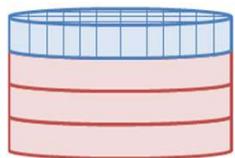
Endommagement

Caractérisation

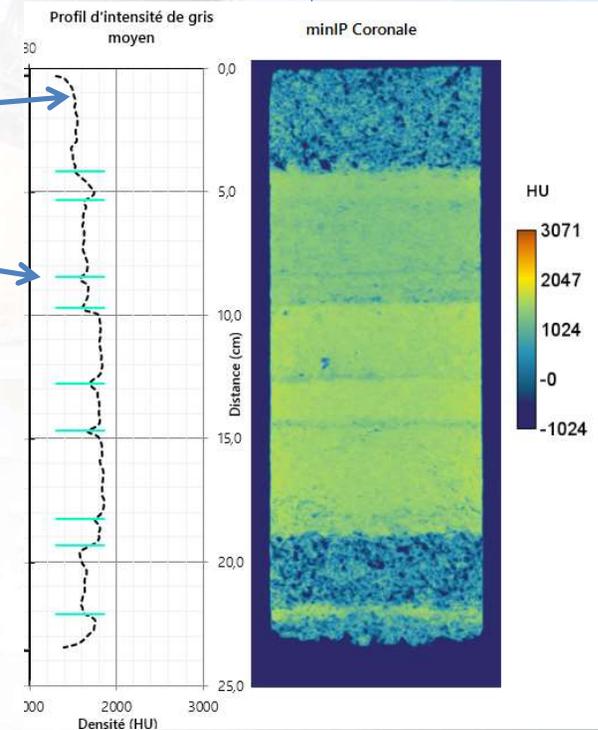
Conclusion

4.1 Tomodensitométrie : Types d'analyse

- Projection de la densité minimale
 - Profil d'intensité moyen des densités (HU)
 - Détection des couches



0,6 mm } Moyenne des voxels =
1 point dans le
graphique.



Introduction

Contrôle

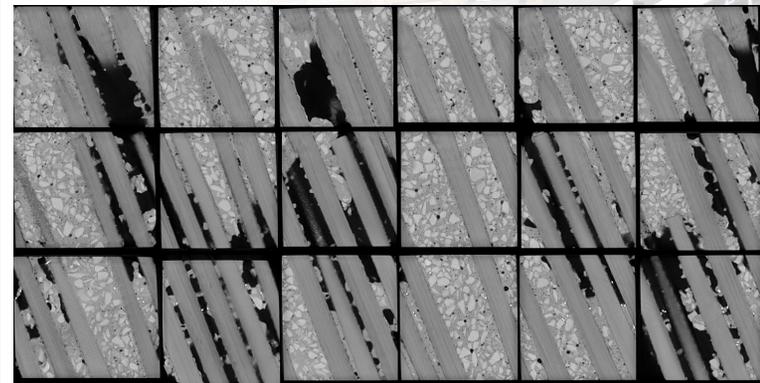
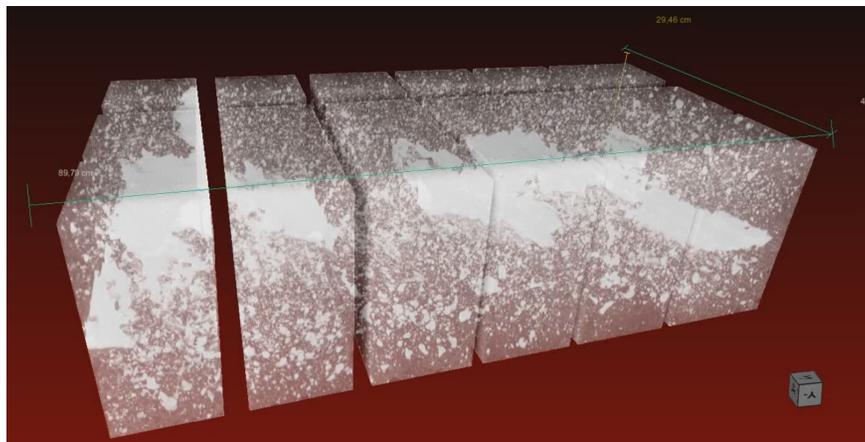
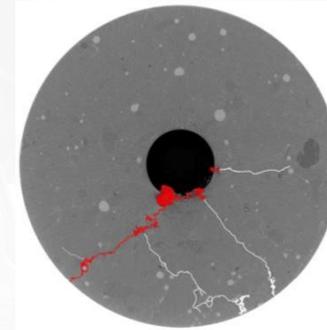
Endommagement

Caractérisation

Conclusion

4.1.1 Tomodensitométrie

- Autres applications (Béton):
 - Évolution de la corrosion des barres d'armatures;
 - Visualiser les défauts d'enrobages des barres;



Introduction

Contrôle

Endommagement

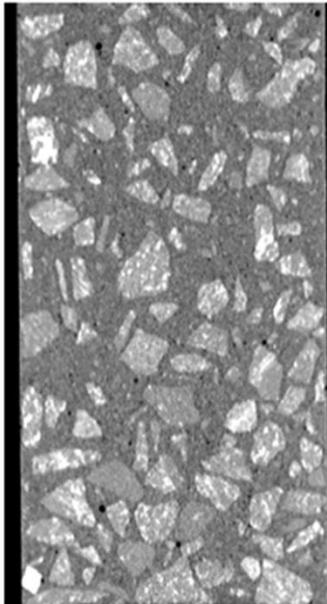
Caractérisation

Conclusion

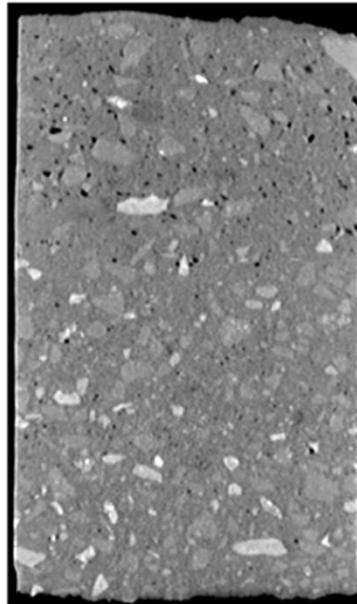
4.1.1 Tomodensitométrie

- Autres applications (Béton):

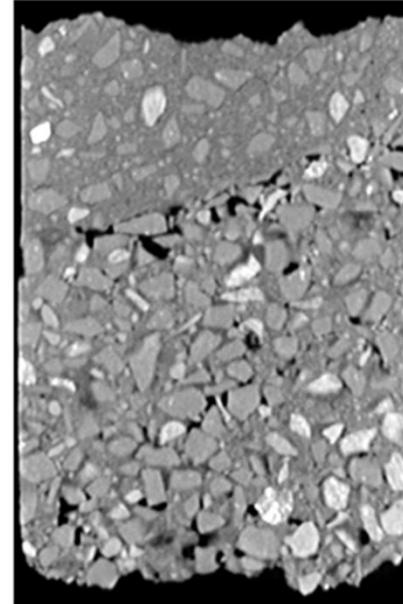
Ségrégation du à la vibration



Distribution des vides et des granules



Réparation de béton ligne de joint visible



Introduction

Contrôle

Endommagement

Caractérisation

Conclusion

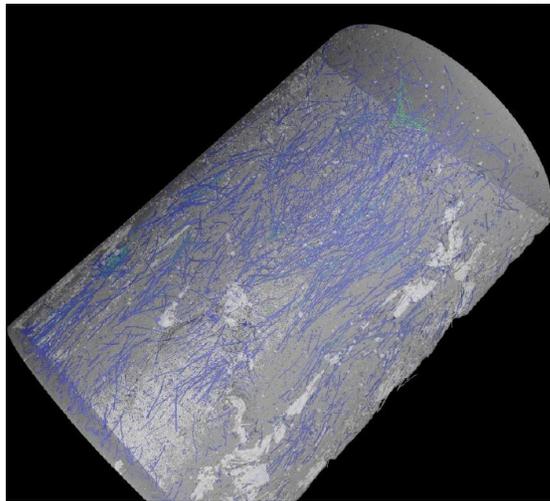
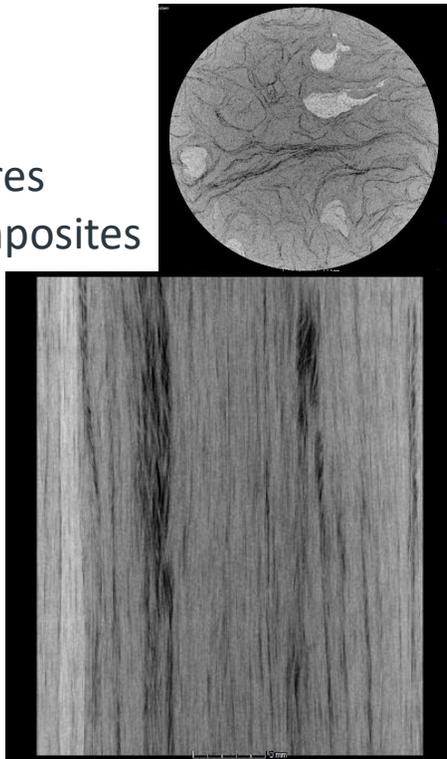
4.2 MicroCT (μ -tomographie)

- Résolution 10X plus fine (3 à 8 μm);
- Échantillons de 150 mm de diamètre par 150 mm de long;
 - **Granulométrie** virtuelle;
 - Indice de **ségrégation** des gros granulats;
 - Calcul de la **teneur en bitume**;
 - Analyse de l'**orientation** et de la forme des granulats, des fibres et des fissures;
 - Caractérisation du volume et de l'interconnexion des **vides**;



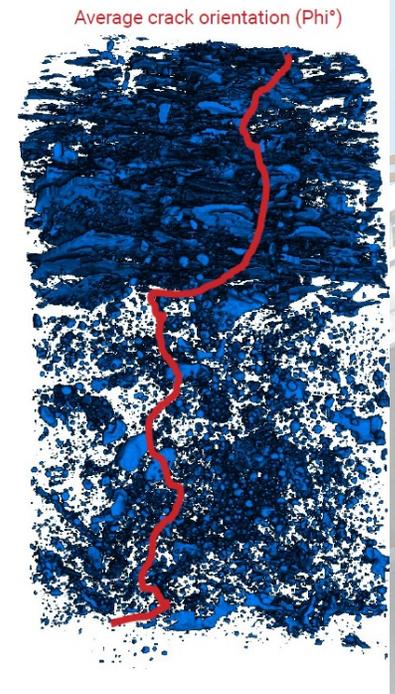
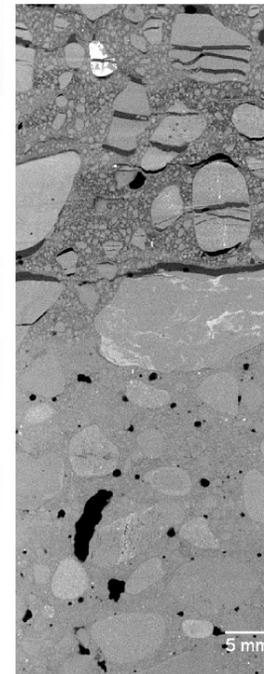
4.2 MicroCT (Exemples)

Barres composites

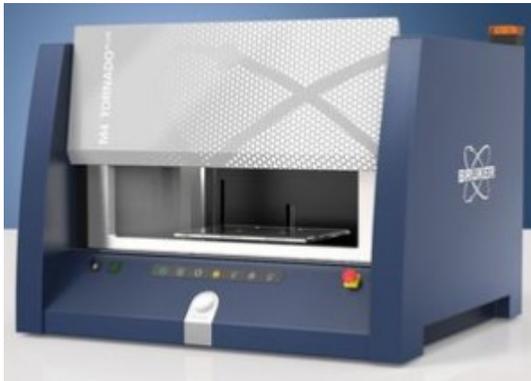


BFUP

Fissures béton



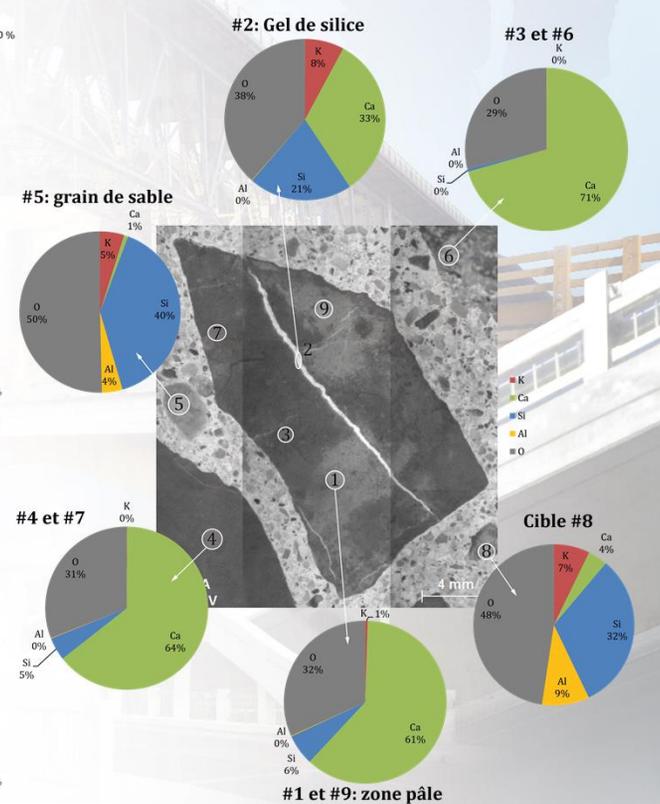
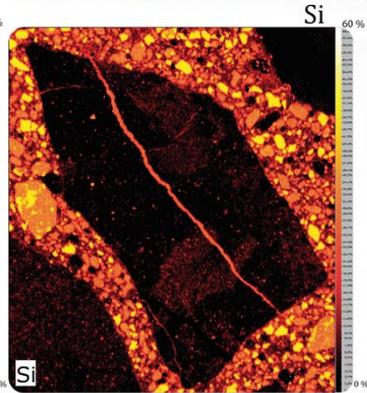
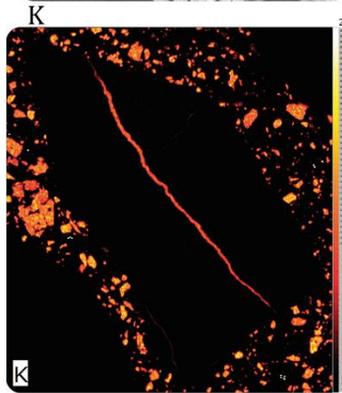
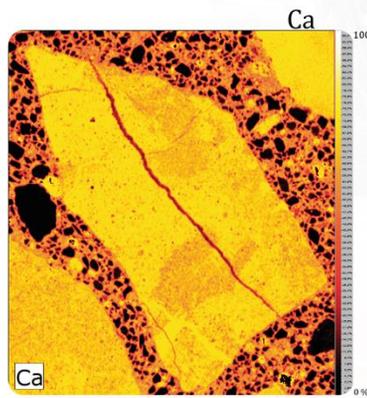
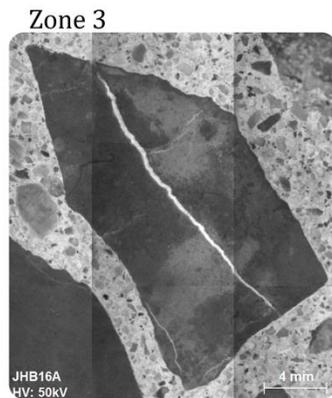
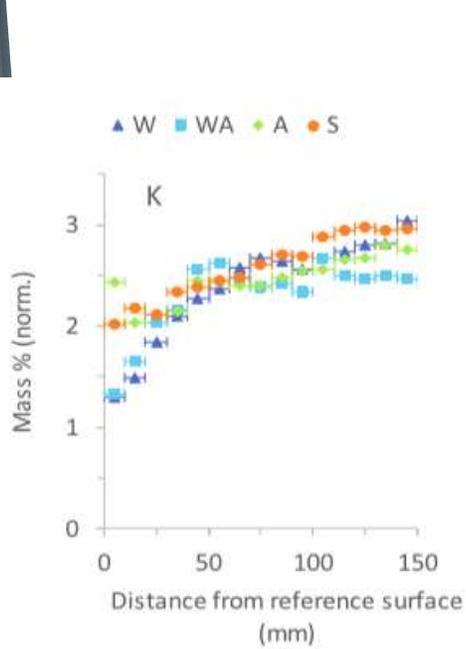
4.3 μ -XRF (Micro fluorescence des rayons X)



M4 Tornado - Bruker

- Analyse sensible et **non destructive** des éléments;
- Peu ou **pas de préparation** d'échantillons;
- Analyse qualitative et **quantitative** des éléments;
- **Classification** des minéraux;
- Identification des **pics** et **cartographie** de la distribution des éléments;

4.3 μ -XRF (Exemple)



Introduction

Contrôle

Endommagement

Caractérisation

Conclusion

5. Conclusion

- Nouvelles technologies = Nouvelles possibilités
- Beaucoup d'applications selon les appareils
- L'analyse d'images de plus en plus utilisée au Ministère
- Méthode plus rapide, moins variable et plus objective que les méthodes conventionnelles
- D'autres techniques d'imagerie: LiDAR, MEB, Thermographie, Sonars, Géoradar, IRM, photogrammétrie...

Merci de votre attention!



Mélissa Roy Tremblay ing.jr ^{Transports} Québec 
Chargée de projets, MTQ
Secteur Matériaux synthétiques et essais spéciaux,
Direction des matériaux d'infrastructures
melissa.roy-tremblay@transports.gouv.qc.ca

Étudiante à la maîtrise en Sciences de la Terre

Directeur:

Benoît Fournier

Co-directrice:

Josée Duchesne

Collaborateurs:

- Jan Lindgård – SINTEF - Norvège
- Mathieu Champagne, ing.jr – Université Laval
- Jean-François Lalonde – LVSN – Université Laval
- Christian Dupuis – Géophysique - Université Laval
- Mathieu Des Roches, ing.jr - INRS
- Louis-Frédéric Daigle - INRS

