

SATIE Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Énergie



Séance technique : 8 octobre 2020
Altération des pierres du patrimoine bâti
 Comité Français de Mécanique des Roches (CFMR)
 Comité Français de Géologie de l'Ingénieur (CFG)

Suivi non destructif de l'altération de marbres par méthodes acoustiques
 Nicolas Wilkie-Chancellor, PU SATIE, CYU






LabEx Patrima

Stone Ageing Monitoring and Imaging by Acoustics
 (PhD M. El Boudani)

école normale supérieure paris-saclay

CNRS

le cnam Conservatoire national des arts et métiers

cy UNIVERSITÉ

ES MOSES

Université Gustave Eiffel

université PARIS-SACLAY

1

Domaine du Patrimonial



EQUIPEX PATRIMEX
 Études et thématiques de recherche sur la connaissance et la conservation des matériaux du Patrimoine

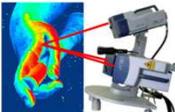


Plate-forme Laser

Etude fondamentale des mécanismes
Spectroscopie
Interaction Laser/Matière

Techniques de spectroscopie de terrain

Plate-forme Mobile

*Libs Lif Roman portable, catholuminescence
Microlib, fluo x- drx portable
Camera hyperspectrale, nettoyage laser*

Data H

PUMA

Tomographie et analyse laser couplée




école normale supérieure paris-saclay

CNRS

le cnam Conservatoire national des arts et métiers

cy UNIVERSITÉ

ES MOSES

Université Gustave Eiffel

université PARIS-SACLAY

2

Contexte et problématique



Plusieurs processus d'altération des pierres interfèrent au cours du temps (Selby 1993)



Dégradation chimique



Dégradation physique



Dégradation biologique



Quel système CND pour le suivi de l'altération des marbres ?

école normale supérieure paris-saclay

CITS

le cnam Conservatoire national des arts et métiers

cy UNIVERSITÉ

ES

Université Gustave Eiffel

université PARIS-SACLAY

3

Processus de dégradation des statues de Versailles

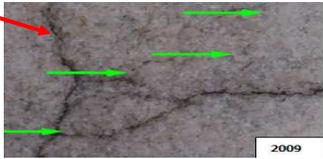
Majoritairement en marbre de Carrare

Dépôts



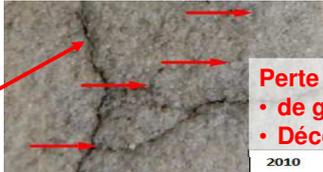
- Pollution
- Corrosion microorganismes

En surface



2009

➔ Désagréations ? ➔



2010

Perte

- de grains
- Décohesion en surface

Profondes



école normale supérieure paris-saclay

CITS

le cnam Conservatoire national des arts et métiers

cy UNIVERSITÉ

ES

Université Gustave Eiffel

université PARIS-SACLAY

4

L'érosion saccharoïde : un enjeu de détection préventive

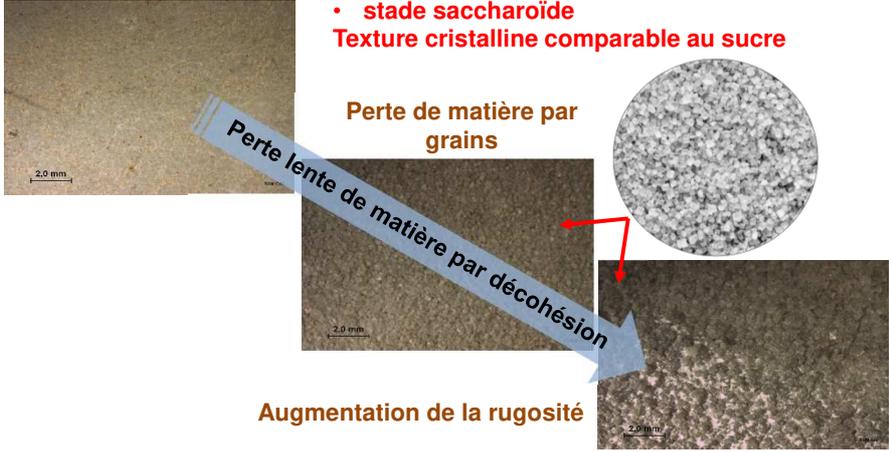
dissolution de la calcite à la surface du marbre

• stade saccharoïde
Texture cristalline comparable au sucre

Perte de matière par grains

Perte lente de matière par décohésion

Augmentation de la rugosité





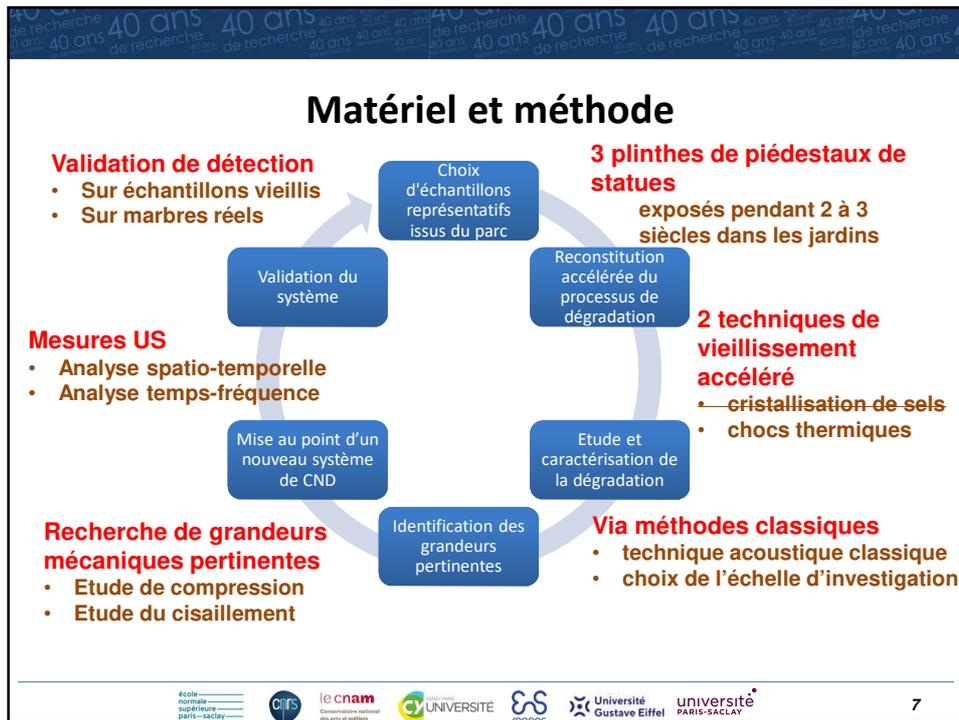
5

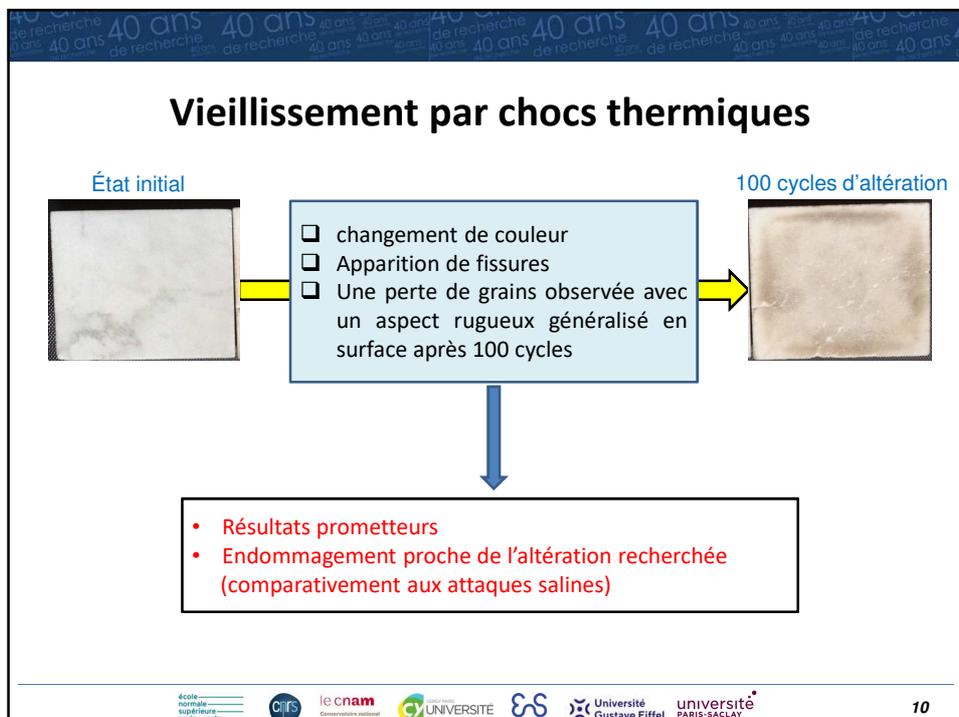
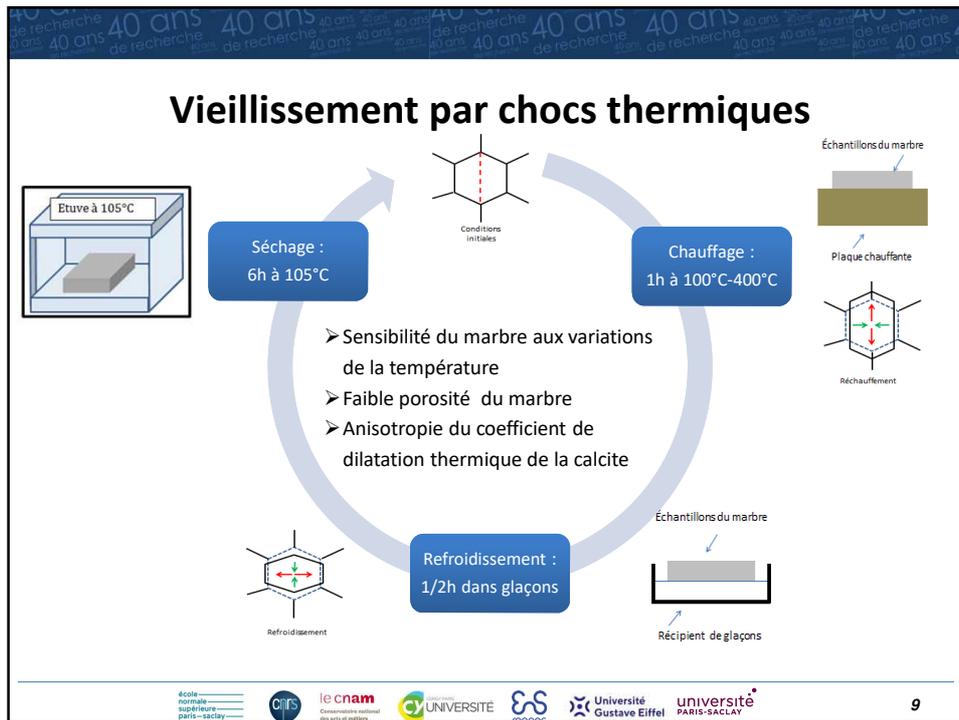
Plan de la présentation

- 1. Matériel et méthodes :**
 - Choix des échantillons
 - Méthodes d'altération
 - Méthodes de caractérisation classiques : enjeux et limites
- 2. Nouvelles méthodes de caractérisation pour le suivi de l'altération du marbre**
 - Altération en profondeur : ondes ultrasonores de volume
 - Altération superficielle : ondes ultrasonores de surface
- 3. Conclusions et perspectives**



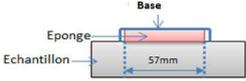
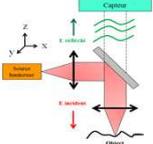
6





Méthodes de caractérisation classiques

- **Capillarité par la méthode de la goutte d'eau:**
 - Le temps d'absorption
 - L'étalement et/ou l'absorption d'une goutte d'eau déposée à la surface d'un matériau
- **Capillarité par le test de l'éponge:**
 - Facteur d'absorption W_a
 - le comportement de la tache mouillée
- **Rugosité**
 - Caractéristique de l'état de surface d'un matériau
 - Facteur R_a : écart de hauteur d'une surface par rapport à sa forme générale
- **Résistance au percement:**
 - mesurer la force nécessaire pour percer une pierre à une vitesse de rotation et taux de pénétration fixes.


école normale supérieure paris-saclay

CNRS

le cnam

UNIVERSITÉ

ES

Université Gustave Eiffel

université PARIS-SACLAY

11

Méthodes de caractérisation classiques

Avantages :

- + Pas coûteux en temps,
- + Simples à mettre en place dans la majorité,
- + Traitement lourd des données est non nécessaire

Inconvénients :

- Le volume du matériau est non accessible.
- Destructif pour quelques uns

Enjeux de caractérisation :

- Comprendre sans endommager
- Suivre l'altération au cours du temps

La suite de ce travail se focalisera sur des techniques de contrôle non destructif (CND)
basées sur des méthodes acoustiques

école normale supérieure paris-saclay

CNRS

le cnam

UNIVERSITÉ

ES

Université Gustave Eiffel

université PARIS-SACLAY

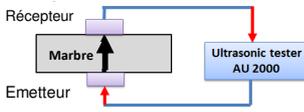
12

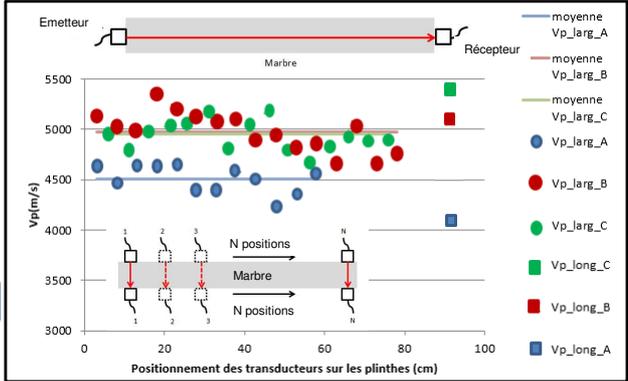
L'acoustique dans le patrimoine : une technique usuelle

o Majoritairement pour extraire le temps de vol

60 kHz







13

Enjeux de développement de nouvelles méthodes d'investigations

- **Echelle d'investigation pertinente** : augmenter la fréquence pour diminuer la longueur d'onde
- **Identification de nouveaux paramètres** physiques pour le suivi de l'altération en profondeur
- **Suivi de l'altération superficielle**
 - Protocole expérimental (détection sans contact par vibrométrie laser)
 - Développement traitement de signal dédié
 - Mesure locale et compréhension des phénomènes de dégradation

14

2. Nouvelles méthodes de caractérisation pour le suivi de l'altération du marbre

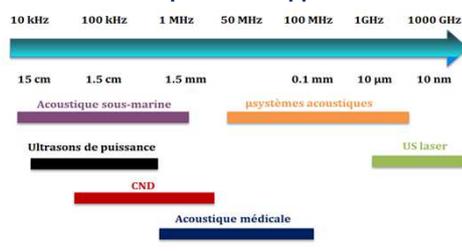
Objectifs:

- ✓ Altération en profondeur : ondes ultrasonores de volume
- ✓ Altération superficielle : ondes ultrasonores de surface

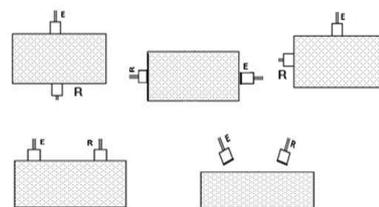
Contrôle Non Destructif (CND) par ondes acoustiques

Le but du CND est de déterminer des propriétés physiques caractéristiques des matériaux sans toucher à leur intégrité.

Domaine fréquentiel et applications



Configurations d'investigations



Différents types d'ondes

Ondes de Volume

Ondes de compression, ou ondes P

Sens de propagation de l'onde

milieu normal

Ondes de cisaillement, ou ondes S

Sens de propagation de l'onde

milieu normal

Ondes de surface

Ondes de Rayleigh

Ondes de Rayleigh

Détection de défauts

école normale supérieure paris-saclay

le cnam

UNIVERSITÉ

Université Gustave Eiffel

université PARIS-SACLAY

17

SATIE Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Energie UMR CNRS- 8029

EVNS CACHAN CNRS

Paramètres mécaniques pour la caractérisation

Compression

Cisaillement

Module de cisaillement G

E_{dyn}

Module de compressibilité dynamique

Rigidité, élasticité

Viscoélasticité

Vitesses V_p et V_s liées aux propriétés dynamiques des roches

➔ Corrélation entre ($V, f, t...$) et la structure du matériau liée au vieillissement

Coefficient de poisson

$$v = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

Module de compressibilité dynamique

$$E_{dyn} = \rho V_p^2 (1 + v) \frac{1 - 2v}{1 - v}$$

Module de cisaillement

$$G = \rho v_s^2$$

école normale supérieure paris-saclay

le cnam

UNIVERSITÉ

Université Gustave Eiffel

université PARIS-SACLAY

18

Techniques d'investigations par ondes de volume

➤ La technique de transmission

➤ La technique d'écho

École normale supérieure Paris-Saclay

CNRS

le cnam Conservatoire national des arts et métiers

UNIVERSITÉ

ES

Université Gustave Eiffel

université PARIS-SACLAY

19

Paramètres de mesures

Vitesse de propagation

$V_{vol} = L/t_{vol}$

Atténuation

École normale supérieure Paris-Saclay

CNRS

le cnam Conservatoire national des arts et métiers

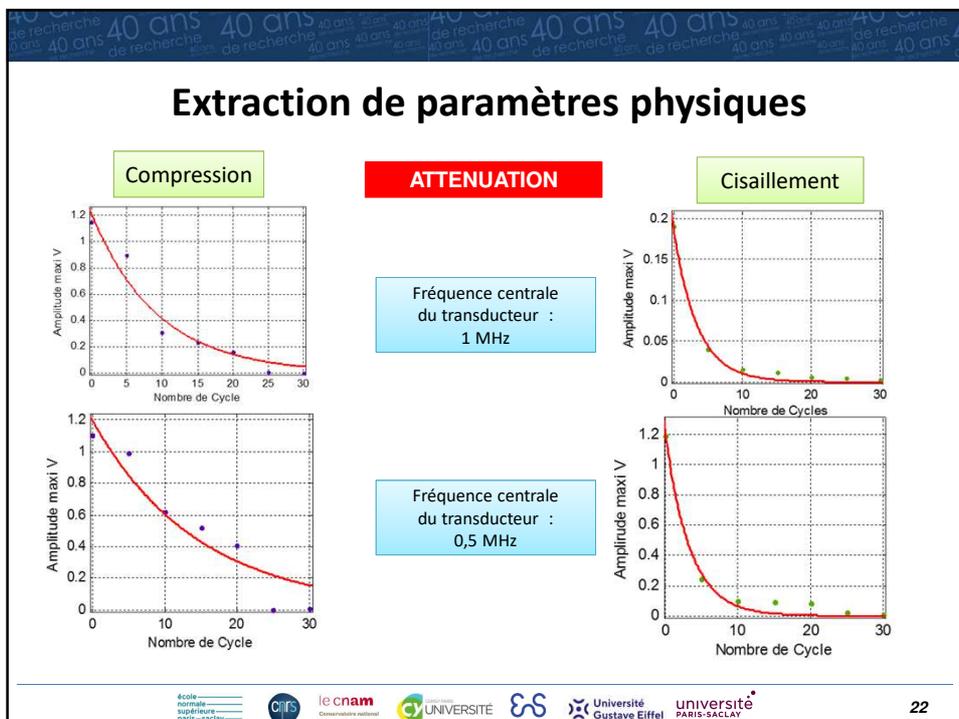
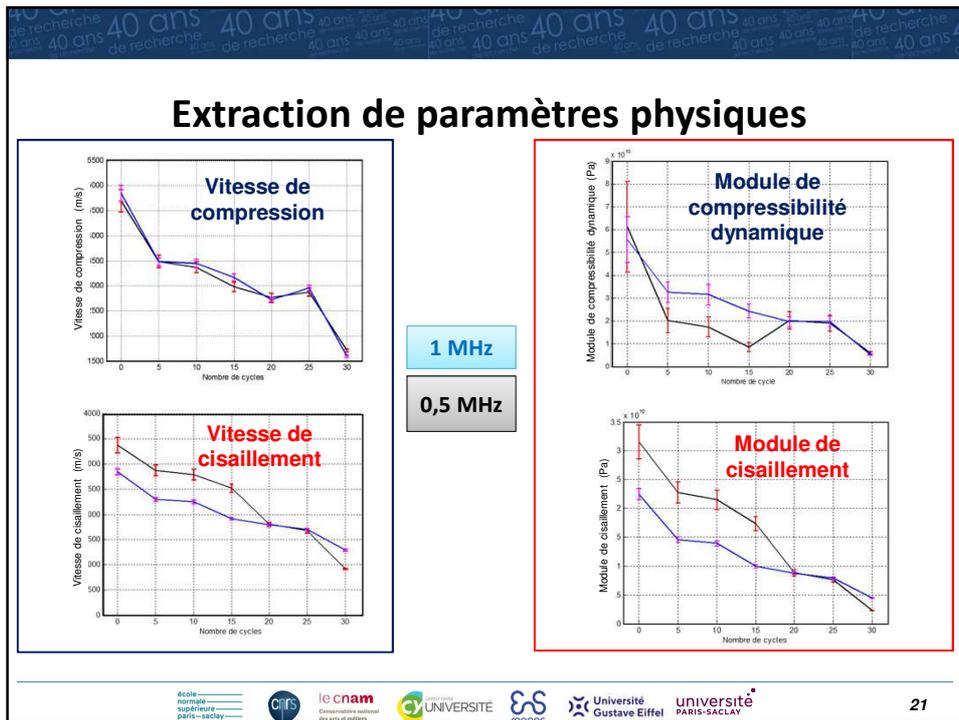
UNIVERSITÉ

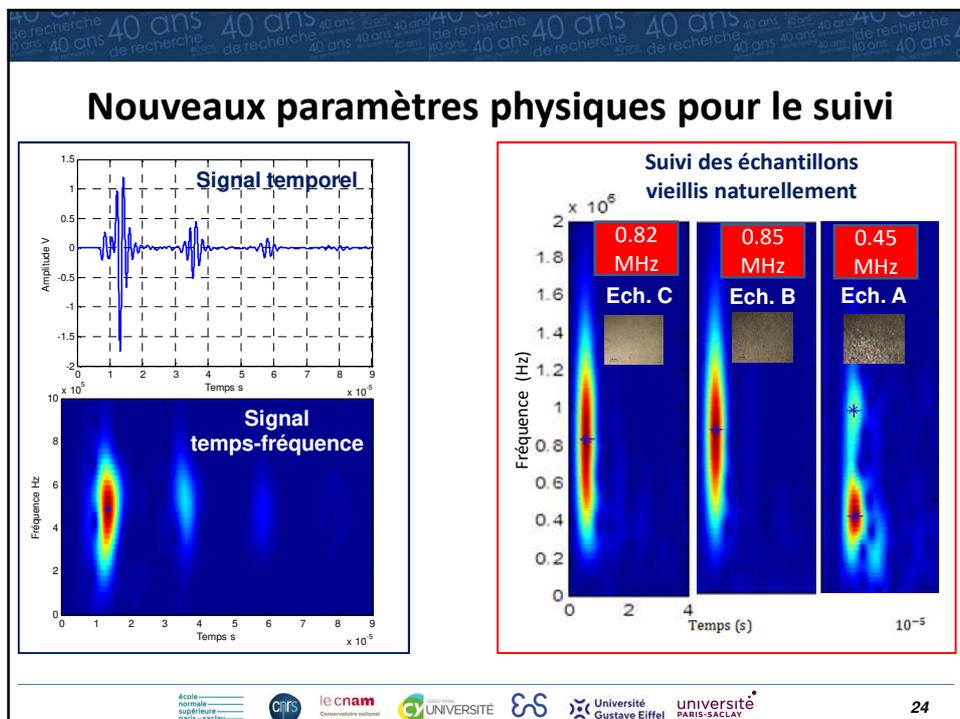
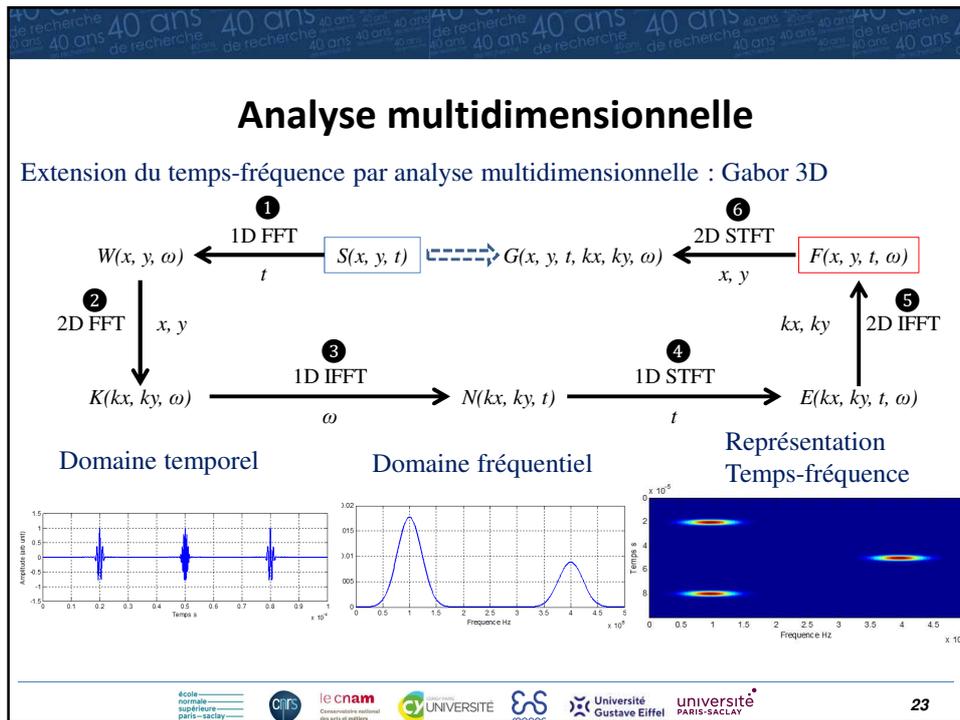
ES

Université Gustave Eiffel

université PARIS-SACLAY

20





Nouveaux paramètres physiques pour le suivi

Suivi des échantillons vieilliss artificiellement

Variation des composantes temporelle et fréquentielle

- augmentation du temps de vol
- baisse de fréquence centrale transmise
- modification de la bande passante fréquentielle
- forte atténuation de l'onde de cisaillement par rapport à celle de compression

Compression

Cisaillement

école normale supérieure paris-saclay

CNRS

le cnam Conservatoire national des arts et métiers

CY UNIVERSITÉ

ES

Université Gustave Eiffel

université PARIS-SACLAY

25

Conclusion partielle

- Protocole expérimental pour l'altération accélérée et contrôlée
- Confirmation de paramètres déjà connus pour le suivi de l'altération dans le volume : vitesse de propagation V_p et V_s
- Nouveaux paramètres physiques identifiés pour le suivi d'altération dans le volume : atténuation, fréquence centrale, bande passante

Besoins

Nécessité de suivre de l'altération superficielle :

➔ mise en place d'une méthode de suivi par ondes de surface

école normale supérieure paris-saclay

CNRS

le cnam Conservatoire national des arts et métiers

CY UNIVERSITÉ

ES

Université Gustave Eiffel

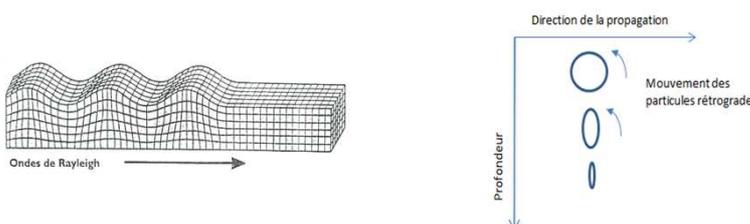
université PARIS-SACLAY

26

Pourquoi l'onde de Rayleigh

Caractéristiques de cette onde de surface :

- l'énergie acoustique se concentre principalement à la surface
- mouvement elliptique
- l'amplitude du mouvement diminue à mesure que l'on s'éloigne de l'interface



école normale supérieure paris-saclay

CNRS

le cnam Conservatoire national des arts et métiers

CY UNIVERSITÉ

ES MOSES

Université Gustave Eiffel

université PARIS-SACLAY

27

La vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh : nouveau paramètre physique pour le suivi

$\sigma_{zz} = 0$

Vide

→ x

$\sigma_{xz} = 0$

Solide

↓ z

Loi de Hooke ,décomposition d'Helmholtz
décomposition et les conditions aux bords:

$$R = \begin{pmatrix} k^2 + p_T^2 & -2ikp_T \\ 2ikp_L & k^2 + p_T^2 \end{pmatrix}$$

det(R) = 0

$$k^4 + 2k^2p_T^2 + p_T^4 - 4k^2p_Lp_T = 0$$

$$v_R^4 - 4v_R^2v_T^2 - 4v_T^4 \sqrt{1 - \frac{v_R^2}{v_T^2}} \sqrt{1 - \frac{v_R^2}{v_L^2}} + 4v_T^4 = 0$$

$v_R = \frac{\omega}{k}$

école normale supérieure paris-saclay

CNRS

le cnam Conservatoire national des arts et métiers

CY UNIVERSITÉ

ES MOSES

Université Gustave Eiffel

université PARIS-SACLAY

28

Description du banc expérimental

Suivi de l'altération en surface

Estimation de la profondeur d'altération

école normale supérieure paris-saclay

CNRS

le cnam

UNIVERSITÉ

Université Gustave Eiffel

université PARIS-SACLAY

29

Suivi des échantillons vieilliss artificiellement

Plaque saine : propagation de l'onde ultrasonore au cours du temps

Représentation spatio-temporelle

école normale supérieure paris-saclay

CNRS

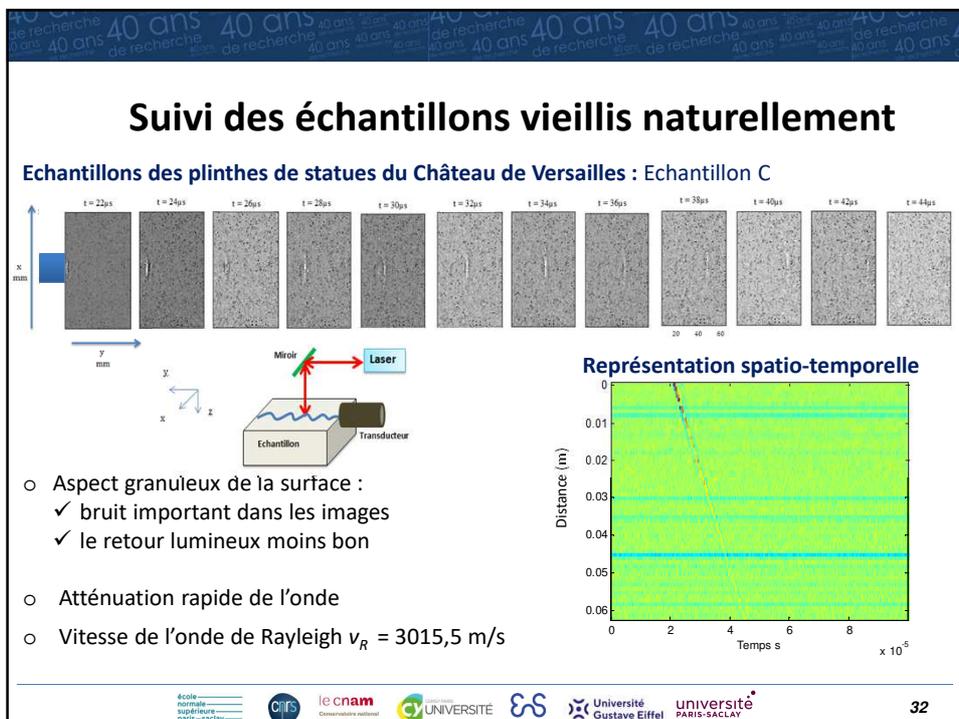
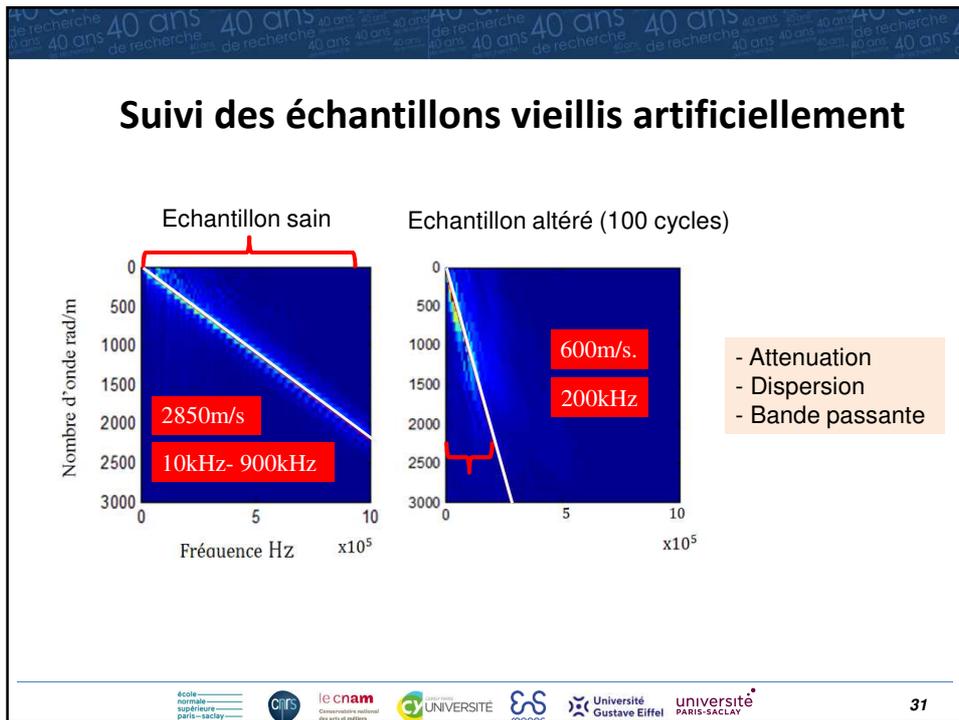
le cnam

UNIVERSITÉ

Université Gustave Eiffel

université PARIS-SACLAY

30



Estimation de la profondeur d'altération : Nouvelle méthode d'investigation

Objectif à terme :
Accès aux informations de profondeur grâce aux signaux détectés en surface

Adaptation d'une méthodologie de mesure mise en œuvre en géophysique

Prospection géophysique en profondeur

Estimation altération en profondeur

école normale supérieure paris-saclay

CNRS

le cnam

UNIVERSITÉ

ES

Université Gustave Eiffel

université PARIS-SACLAY

33

Estimation de la profondeur d'altération : Principe de la transformée de Slant-Stack

Principe de la Transformée de Slant-Stack :

- Cas particulier de la transformée de Radon
- Représentation plane dans l'espace (τ, p)
- Résoudre le problème de la séparation d'ondes primaires aux multiples réflexions.

Illustration sur signaux simulés

Signal temporel

Slant-Stack temporel

Slant-Stack fréquentiel

école normale supérieure paris-saclay

CNRS

le cnam

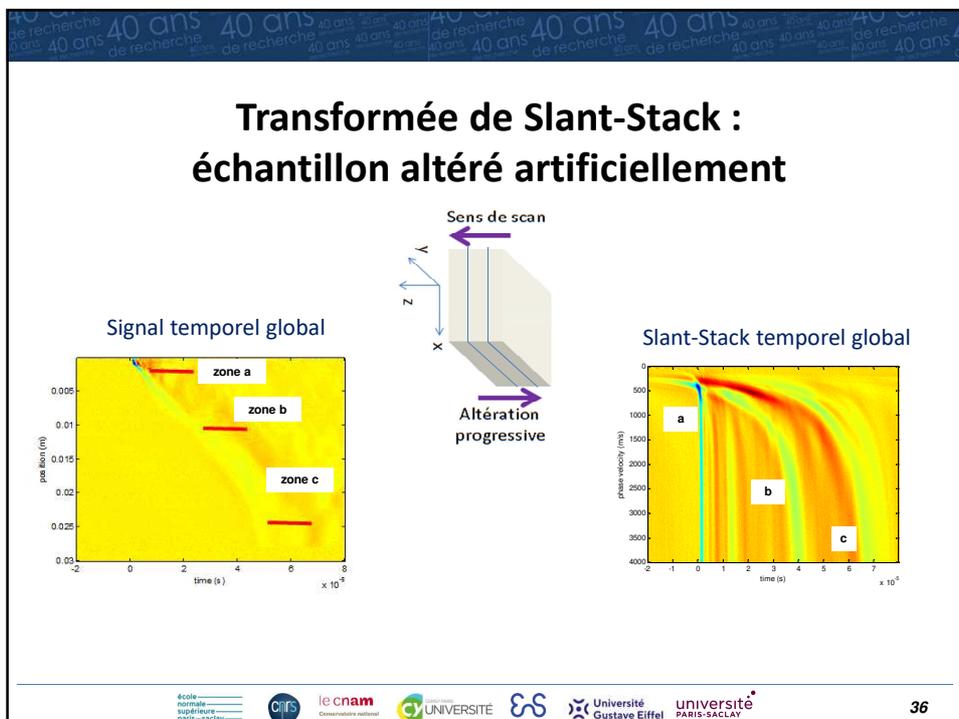
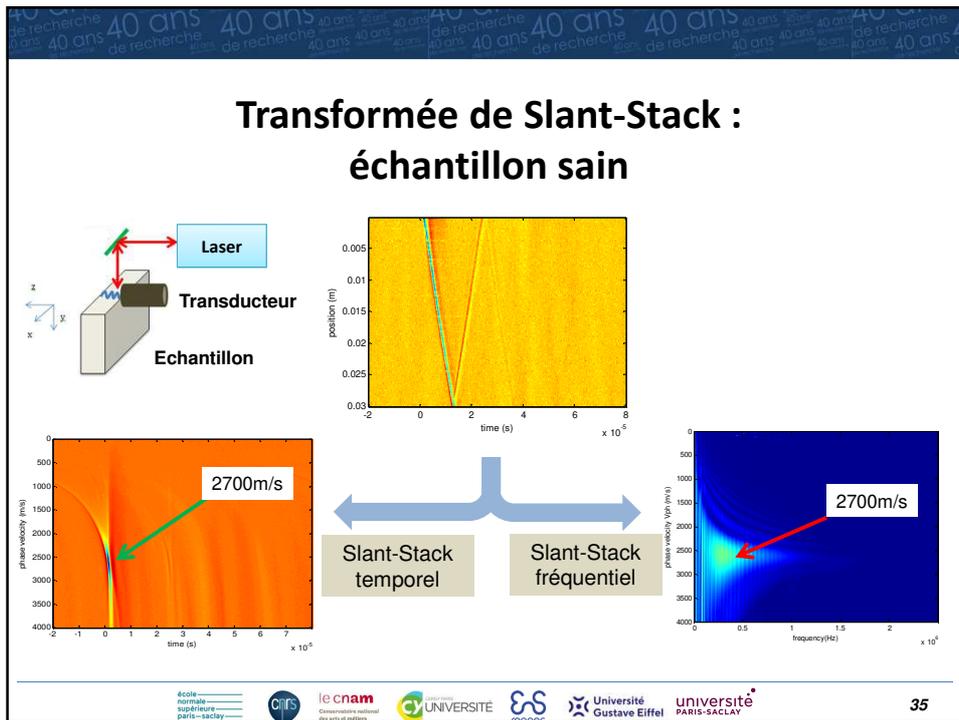
UNIVERSITÉ

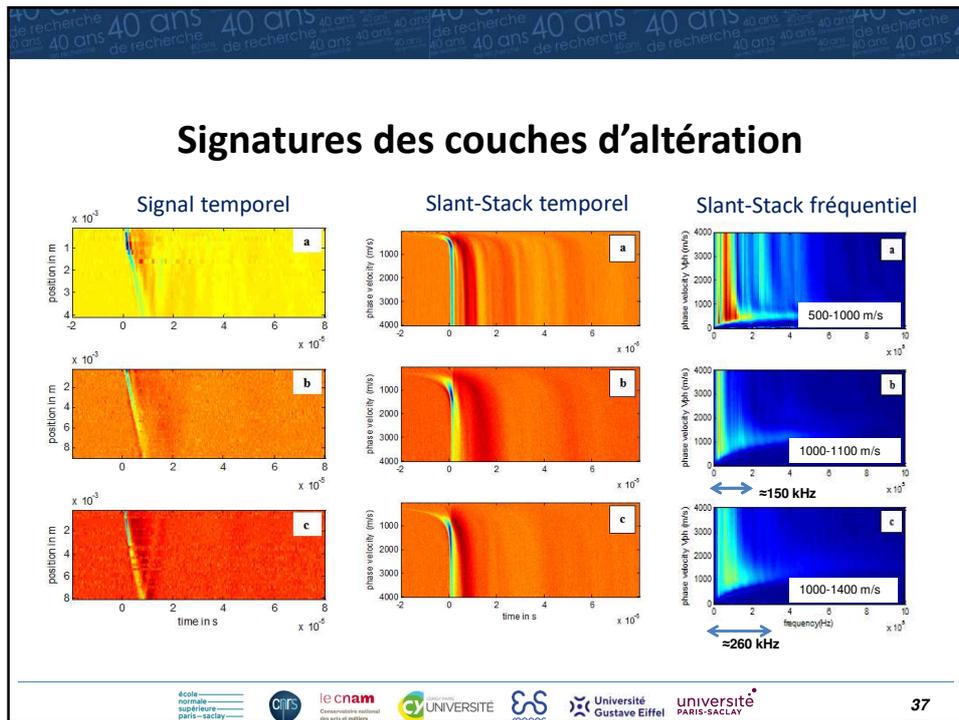
ES

Université Gustave Eiffel

université PARIS-SACLAY

34





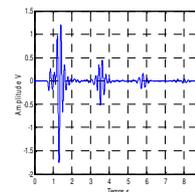
3. Conclusions et perspectives

Contexte

- ✓ Compréhension de l'altération superficielle de la pierre reste complexe
- ✓ Nombreux paramètres qui influencent les processus d'altération
- ✓ Les techniques dites classiques ont montré leurs efficacités mais elles présentent des inconvénients majeurs

Confirmations

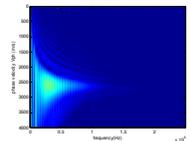
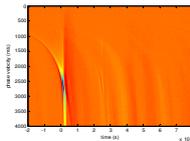
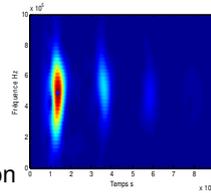
- ✓ Le temps de vol, nous a permis de confirmer la corrélation entre l'état de de dégradation et la vitesse longitudinale
- ✓ Les ondes de volume sont sensibles à l'évolution de l'état du matériau
- ✓ Les variations de vitesses nous permettent de faire un suivi de propriétés mécaniques et physiques du marbre



3. Conclusions et perspectives

Apports du projet SAMIA

- ✓ Travail de caractérisation d'échantillons naturels et artificiels
- ✓ Protocole de vieillissement accéléré
- ✓ Evolution de la signature acoustique selon le niveau d'altération
- ✓ Analyse fréquentielle en complément de l'analyse temporelle

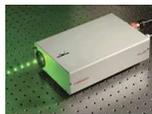


- ✓ Adaptation de la longueur d'onde d'investigation selon l'altération recherchée
- ✓ Identification de nouveaux paramètres de suivi : fréquence centrale, bande passante, ...
- ✓ Mise en place de banc instrumentaux : volume, surface, transducteur, laser
- ✓ Estimation de la non homogénéité du stade d'altération : onde de surface couplée à la transformée de Slant Stack

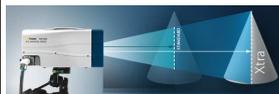
3. Conclusions et perspectives

Futur

- ✓ Optimisation du protocole d'altération accéléré :
 - Affiner l'endommagement par les chocs thermiques (durée, température)
 - Améliorer l'altération par cristallisation par les sels (durée, concentration)
- ✓ Poursuivre l'exploitation des ondes de volume et des ondes de cisaillement à des fréquences plus faibles (< 150 kHz).
- ✓ Exploitation en détail des propriétés de l'onde de Rayleigh



- ✓ Meilleur retour lumineux en cas de surface très altérée :
 - Laser IR ?
- ✓ Investigation sans contact :
 - Laser Nd:YAG pour génération des ondes US par thermoélasticité?



- ✓ Amélioration du modèle numérique utilisé pour la transformée de Slant Stack

3. Conclusions et perspectives

Méthodologie mise en place

actuellement utilisée dans le domaine PATRIMOINE

- caractérisation d'œuvre en résine
- optimisation du matériau constituant des reproductions de statues
 - ✓ matrice polymère chargée de poudre de marbre

bientôt utilisée dans le domaine SECURITE

- aide à l'identification :
 - ✓ estimation du délai Post-Mortem
- authentification de contrefaçon


41

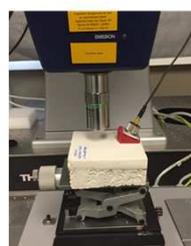
CND acoustique dans le domaine du Patrimoine

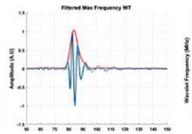
Optimisation de matériau constituant des reproductions d'œuvres (résine polymère chargée de poudre de marbre)



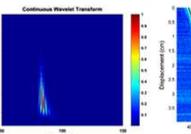




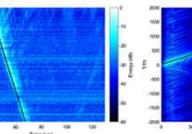




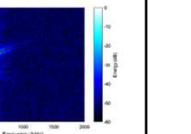
(a)



(b)



(c)



(d)


42

SATIE Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Énergie



Suivi non destructif de l'altération de marbres par méthodes acoustiques

Stone Ageing Monitoring and Imaging by Acoustics



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

nicolas.wilkie-chancellor@cyu.fr

École normale supérieure Paris-Saclay  le cnam  ES  université PARIS-SACLAY **43**