

Durabilité des pierres en œuvre

- ◆ **Matériaux et Structures du Génie Civil : propriétés générales**
- ◆ **Vieillessement des matériaux et des structures : mécanismes d'altération**
- ◆ **Contrôle et surveillance : auscultation, capteurs, détection, moyen d'intervention**
- ◆ **Intervention : réglementation, procédés de restauration**
- ◆ **Aide au développement durable : amélioration de la durabilité, environnement**

Partie 1 :

Le matériaux « pierre » : nature et utilisation

- Formation géologique, exploitation en carrière, utilisation en bâtiment
- Constitution de la pierre : minéraux et porosité
- Transfert des fluides, propriétés hydrauliques, propriétés hydromécaniques
- Vieillessement in-situ et en laboratoire

Partie 2 :

Le matériaux « pierre » : pathologie et restauration

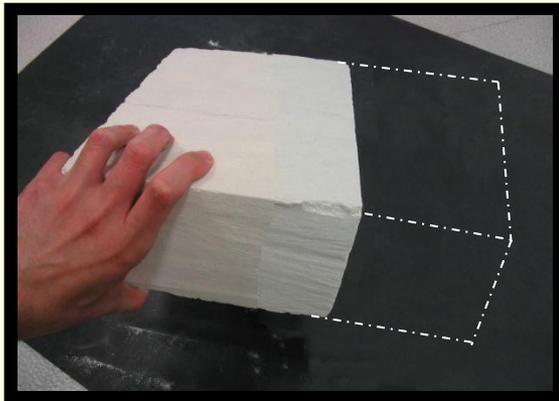
- Vieillessement des pierres, mécanismes d'altération, facteurs aggravants
- Techniques et produits de nettoyage, de restauration et de conservation
- Ouverture sur les travaux de recherche actuel :
 - développement durable : mortier de restauration conçu à partir de déchets
 - surveillance des ouvrages en pierres : le projet SACRE

Un exemple de pierre de construction : le tuffeau

“tuffeau” → latin *tofus* “pierre spongieuse”

Tuffeau blanc

Porosité : 40 – 50 %



Château de Chambord

**Matériau de construction
tendre et léger**

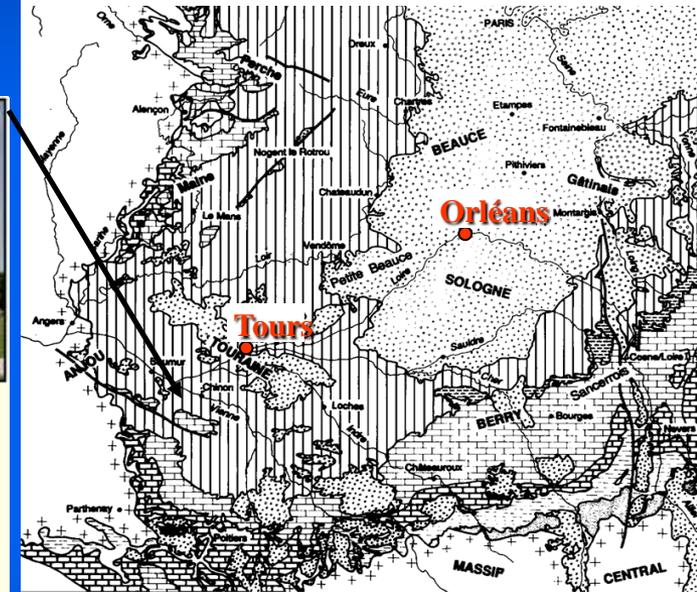
Couleur : blanc

Age géologique : Turonien Moyen (-90 m.a.)

Utilisation : Touraine, Val de Loire

(châteaux de Chambord, Blois, Chenonceau, Saumur, ...)
(cathédrales de Tours, de Nantes, ...)

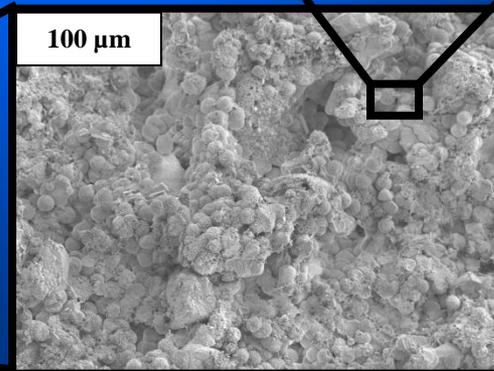
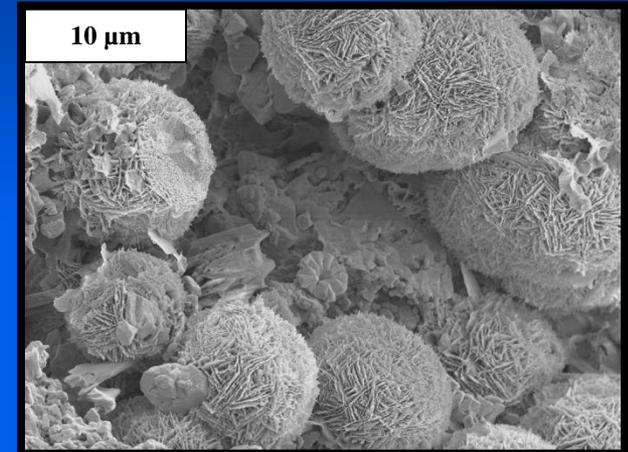
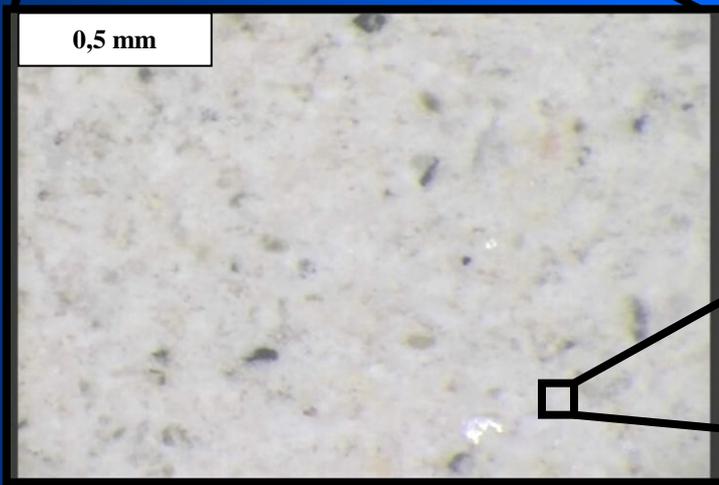
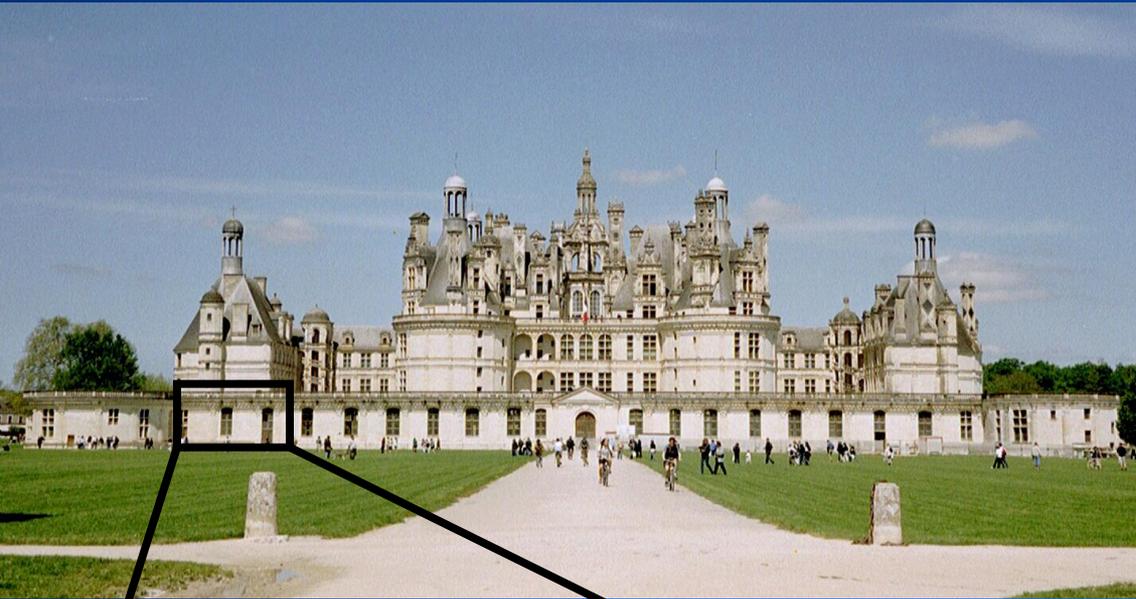
Zone du Bassin Parisien



-  **Terrains tertiaires** : argiles, sables et calcaires lacustres
-  **Crétacé supérieur** : craies et tuffeaux
-  **Crétacé inférieur** : sables et argiles
-  **Jurassique supérieur** : calcaires et marnes
-  **Jurassique moyen** : calcaires
-  **Jurassique inférieur** : marnes
-  **Trias** : sables, grès et argiles
-  **Socle** : roches granitiques et métamorphiques

Voyage au centre de la pierre

De l'œil nu au microscope électronique ...



Cathédrales de Tours, Nantes, ...
Châteaux de Chambord, Blois, ...

**Comprendre
les mécanismes d'altération
des pierres en œuvre**



**Conservation & Restauration
du patrimoine bâti**



Château de Chambord

Altération des pierres



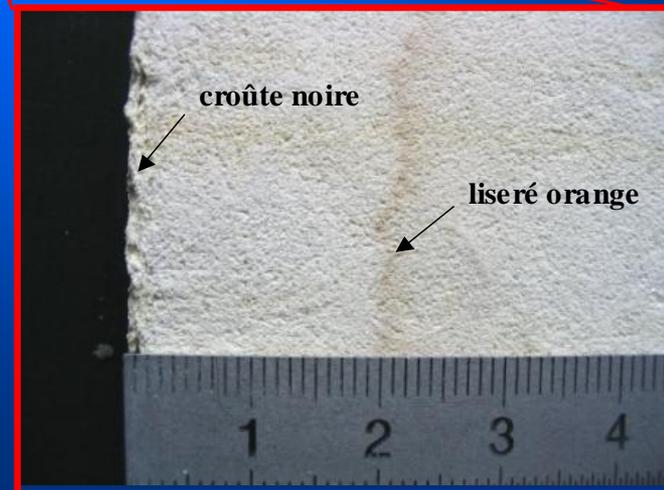
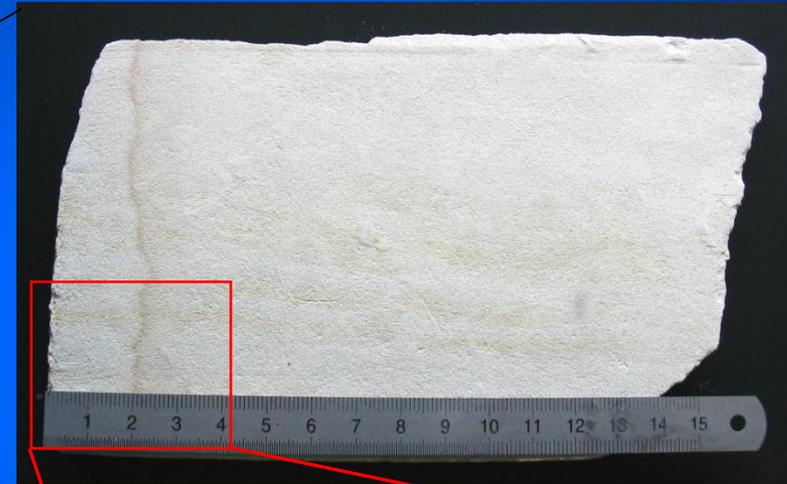
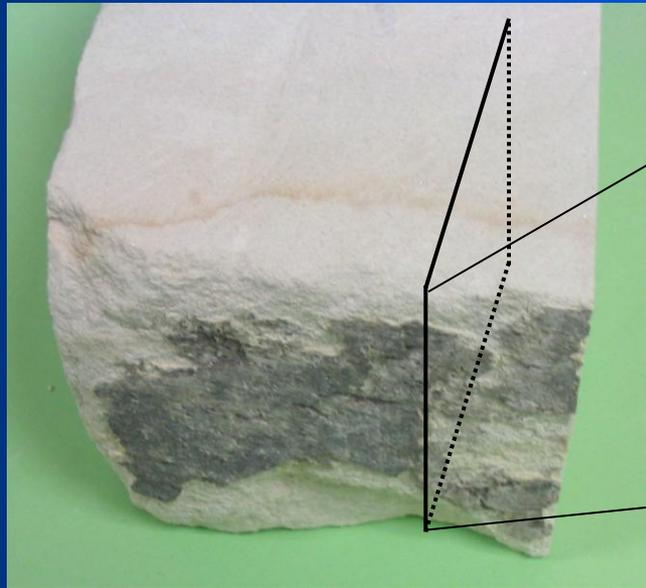
Château de Blois

L'altération naturelle sur sites

**Etude de cas
de pierres altérées in-situ**

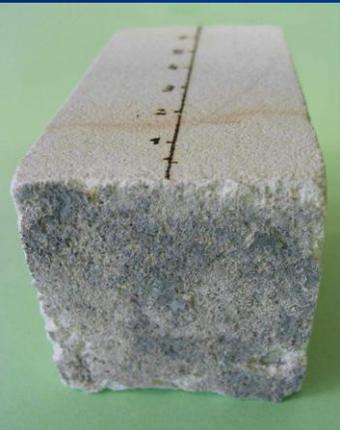
➔ *Partie n°1 : L'altération naturelle (sur monuments)*

Observation et étude de cas de pierres altérées in-situ



Tuffeau altéré prélevé in-situ

Propriétés d'imbibition



$$h = B\sqrt{t}$$

$$\frac{dm}{S} = A\sqrt{t}$$

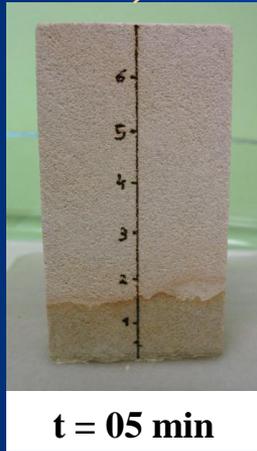
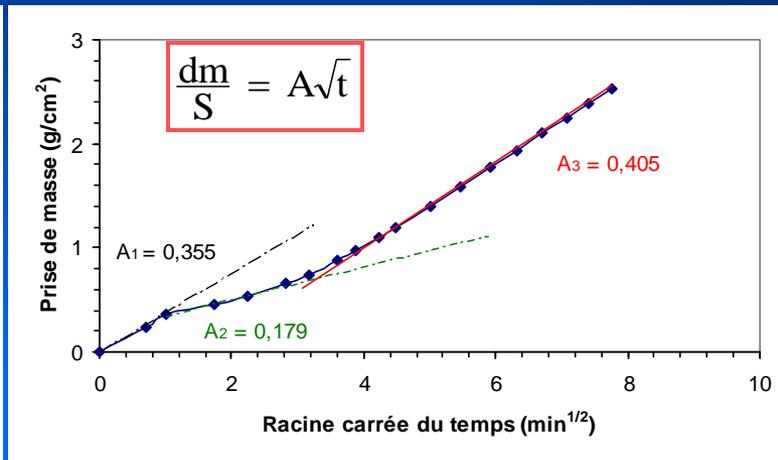
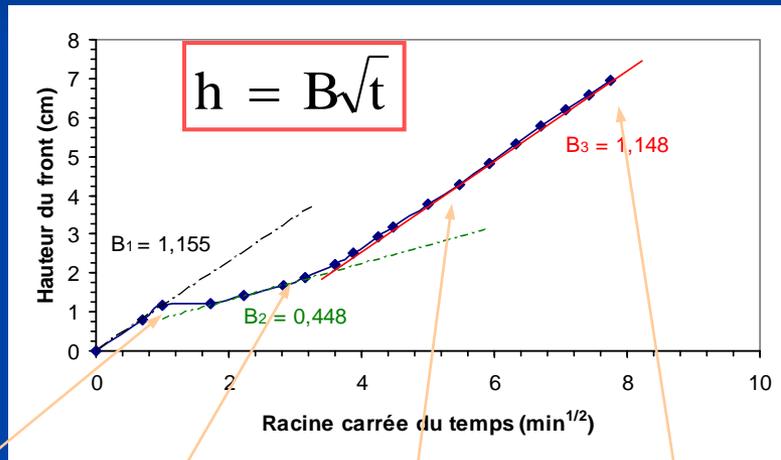
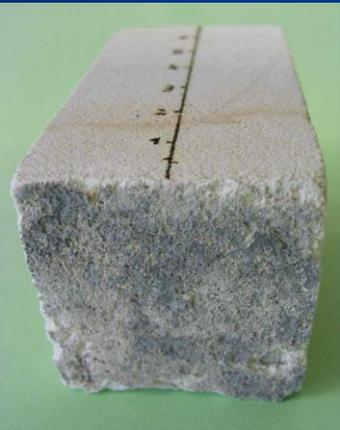
Equations de Washburn



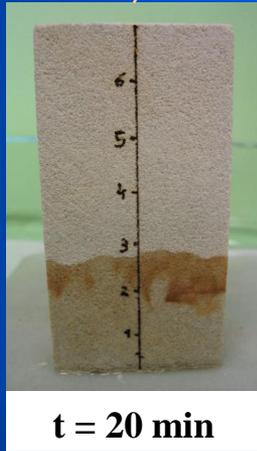
Tests d'imbibition

t = 60 min

Propriétés d'imbibition



t = 05 min



t = 20 min



t = 30 min



t = 60 min

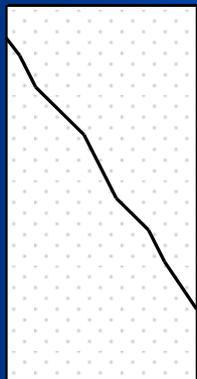
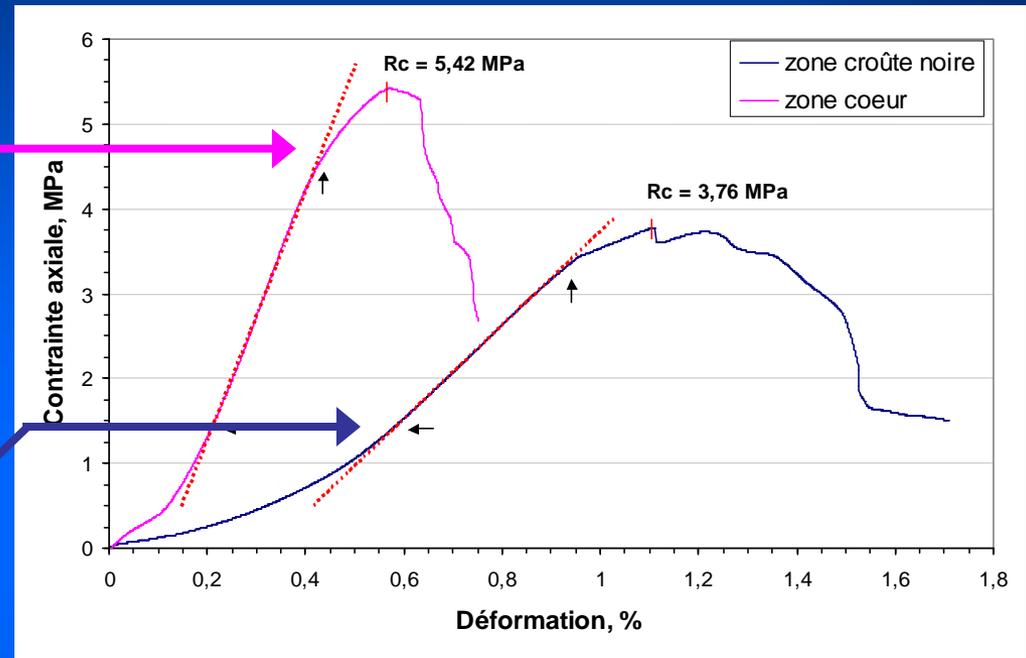
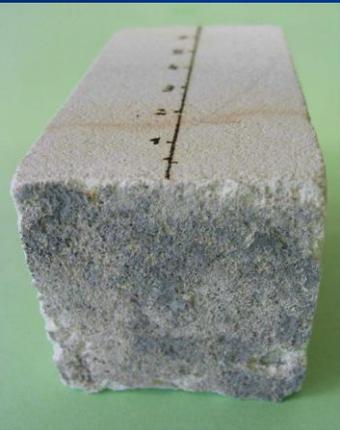
**20 mm de profondeur :
pénétration maximale atteinte
par les mouvements d'eau**

Les "particules oranges" sont drainées par l'eau

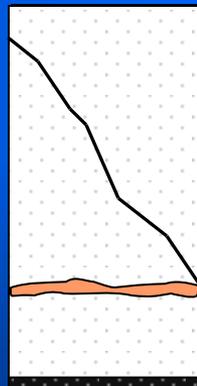


**Rôle de
marqueur**

Résistance mécanique



Zone de cœur

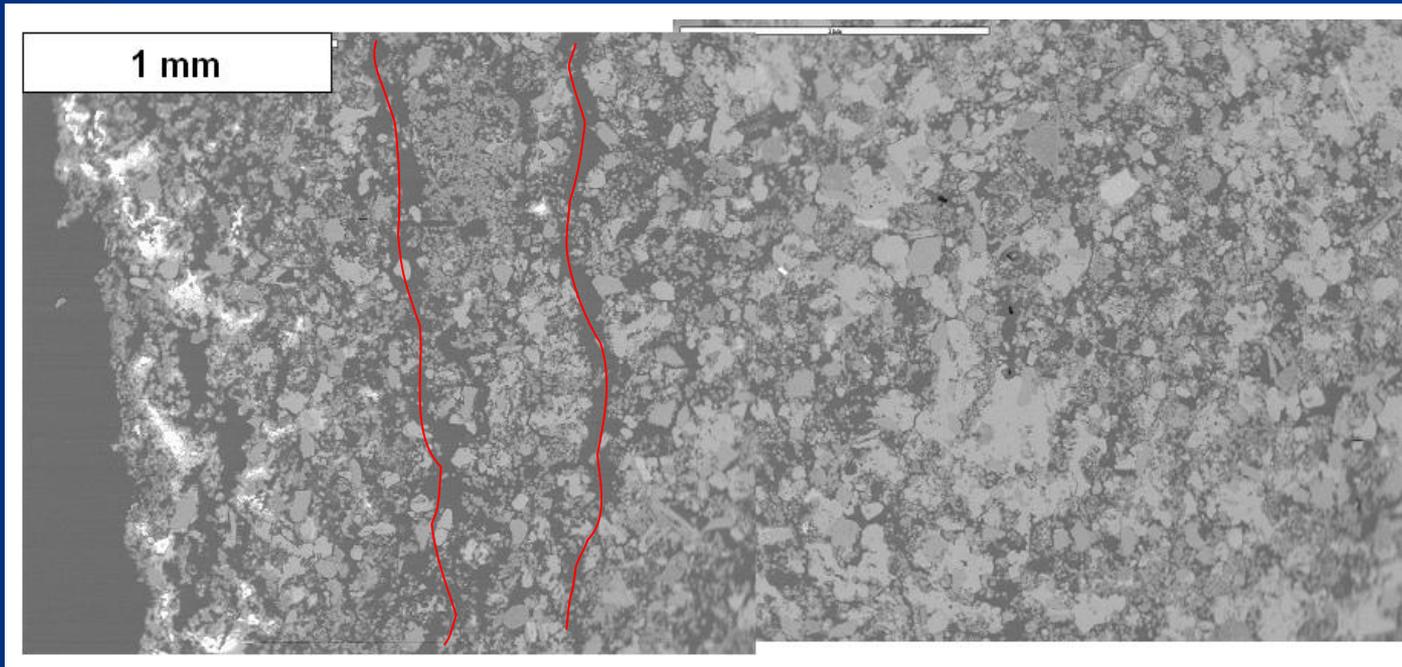


Zone de surface

état sec



La zone de surface est fragilisée



Œil nu



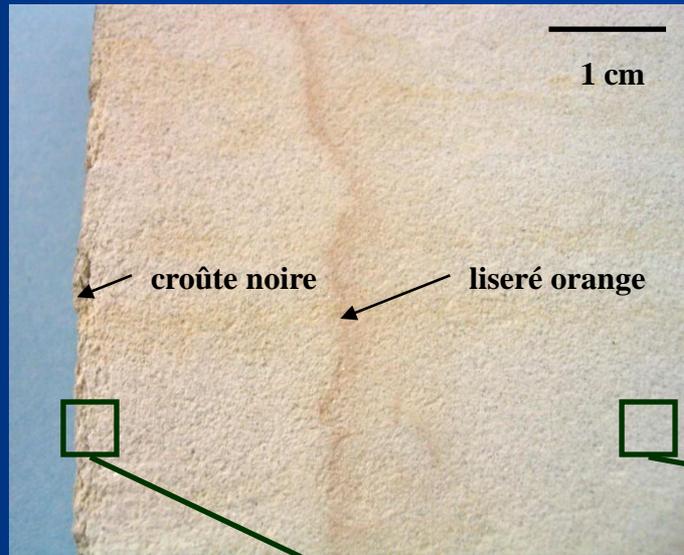
**Microscopie
Optique**



M E B



**Nombreuses microfissures
sous-jacente à la croûte noire**



Œil nu

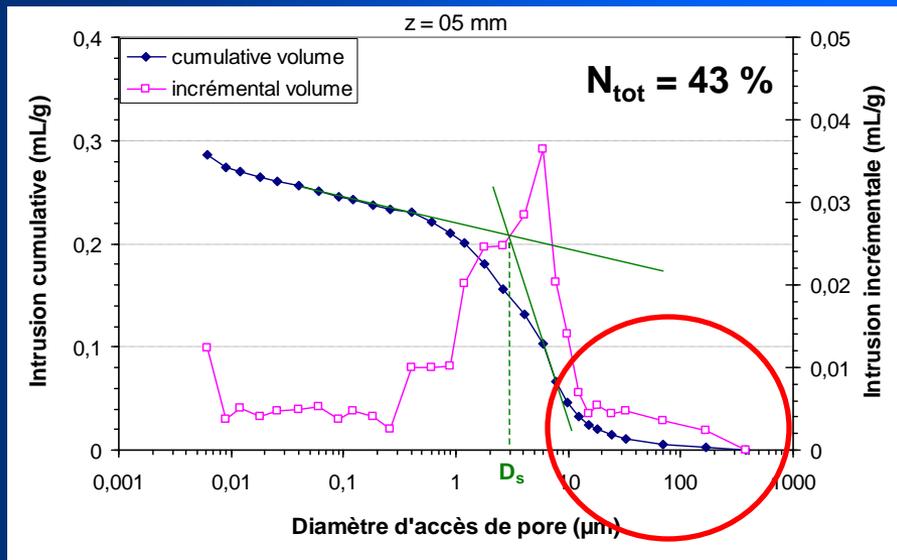


Microscopie
Optique

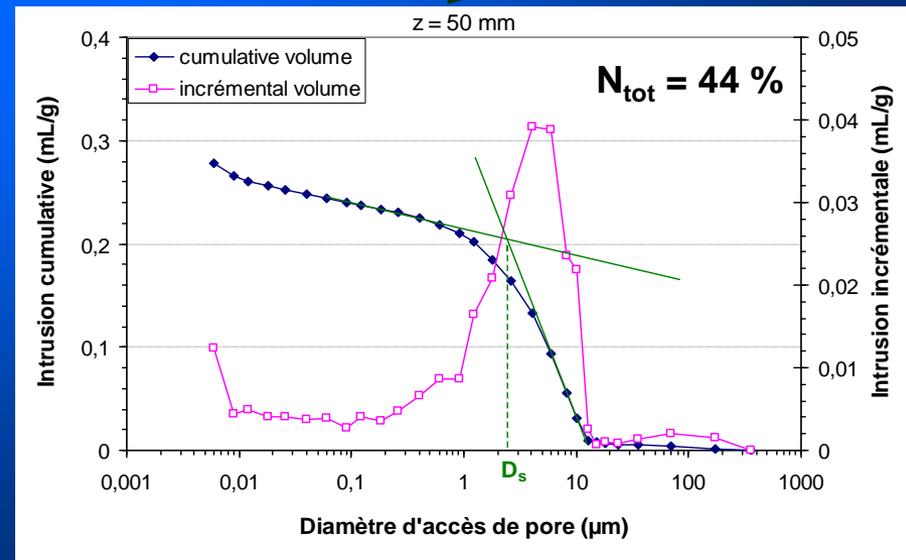


MEB

Porosimétrie
mercure



Zone de surface ($z = 05 \text{ mm}$)



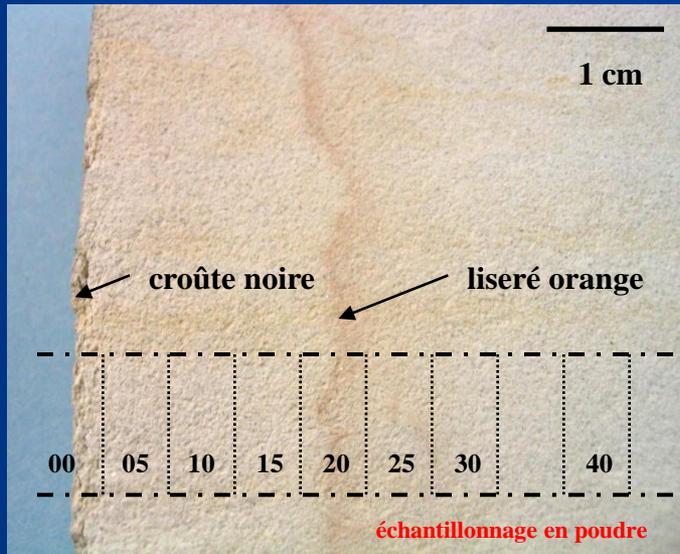
Zone de cœur ($z = 50 \text{ mm}$)

L'altération : étude de cas

Approche microscopique :

Minéralogie

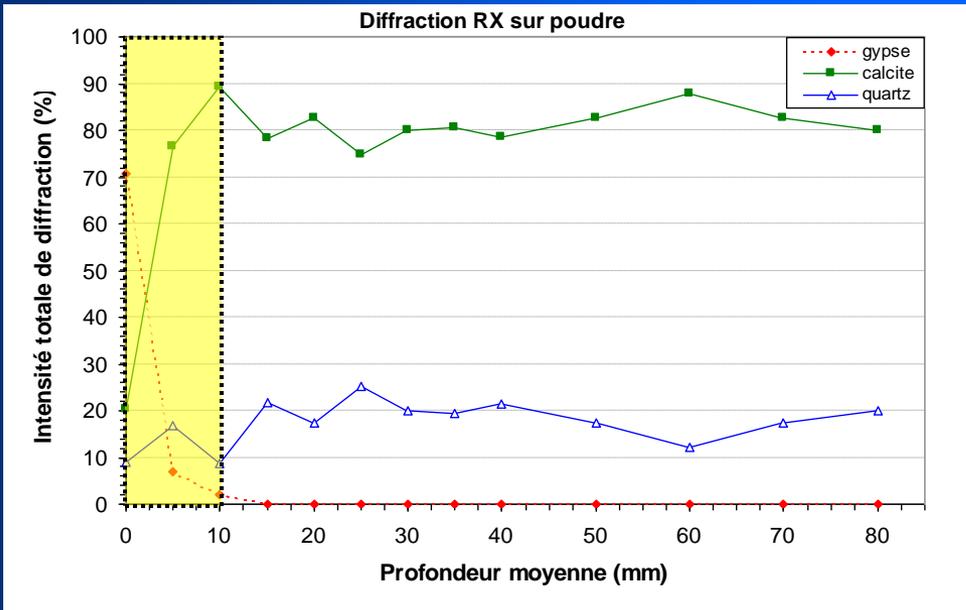
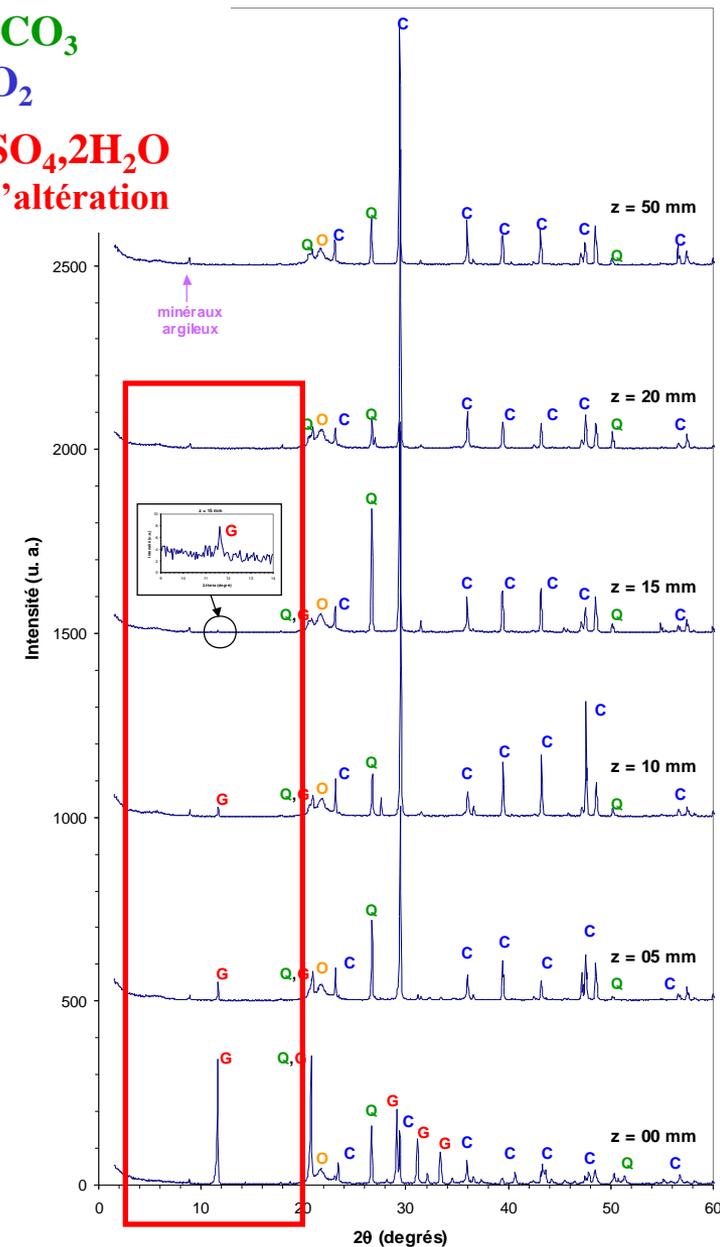
DRX sur poudre



Calcite : CaCO_3

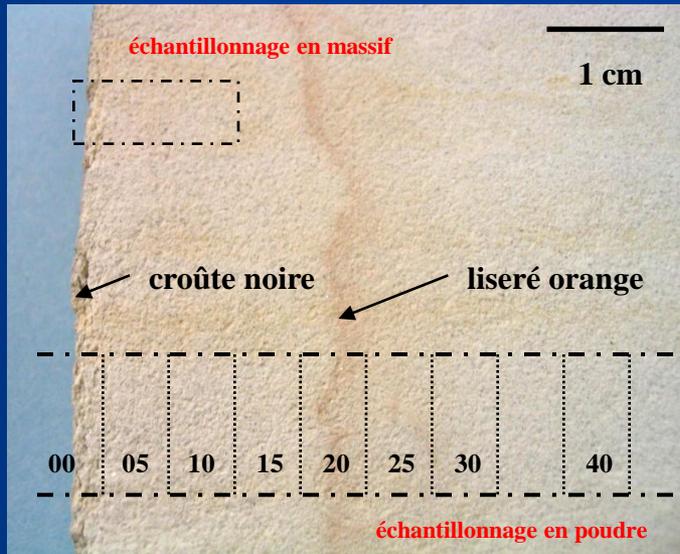
Quartz : SiO_2

Gypse : $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
= produit de l'altération



Minéralogie

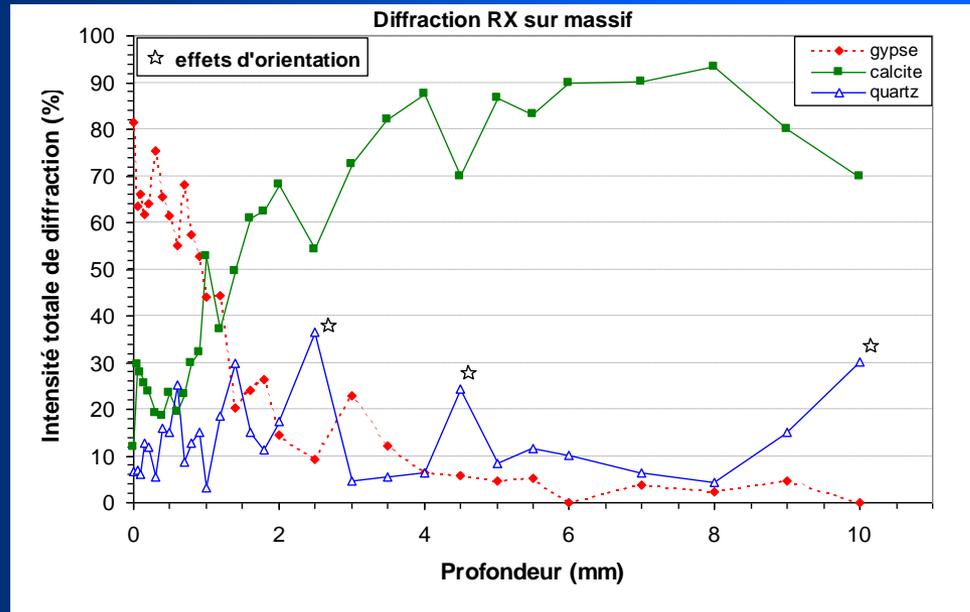
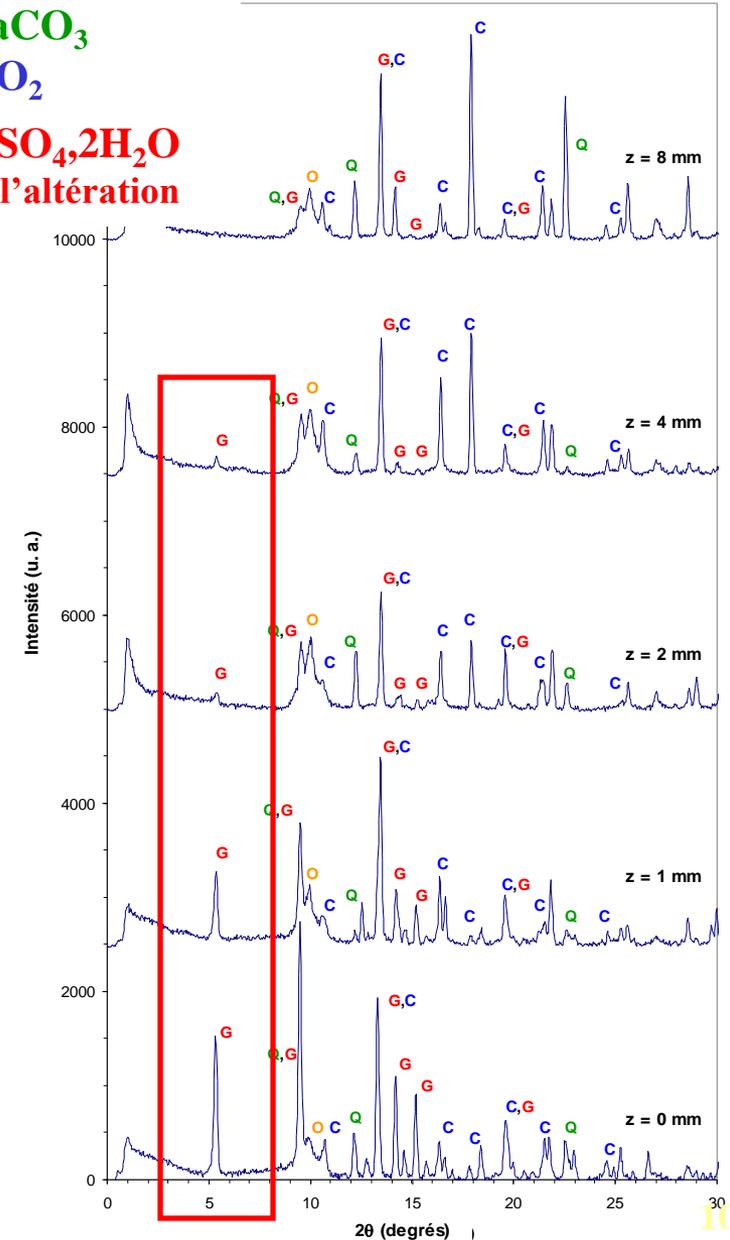
DRX sur massif



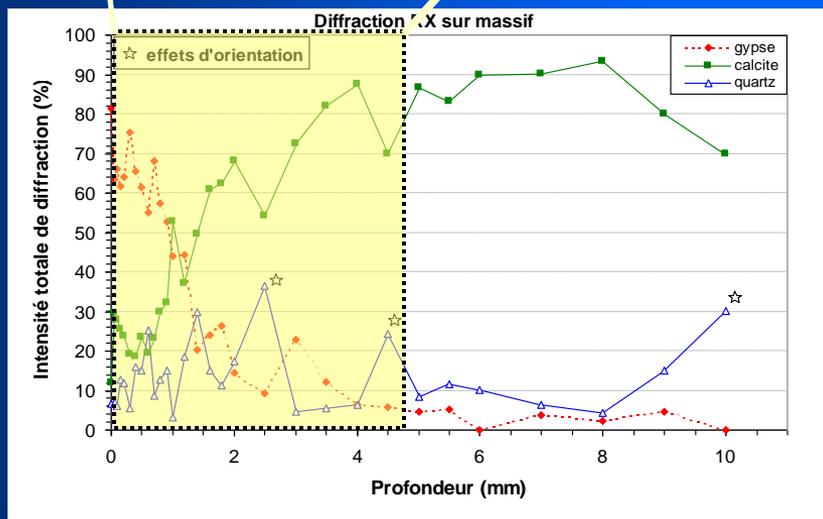
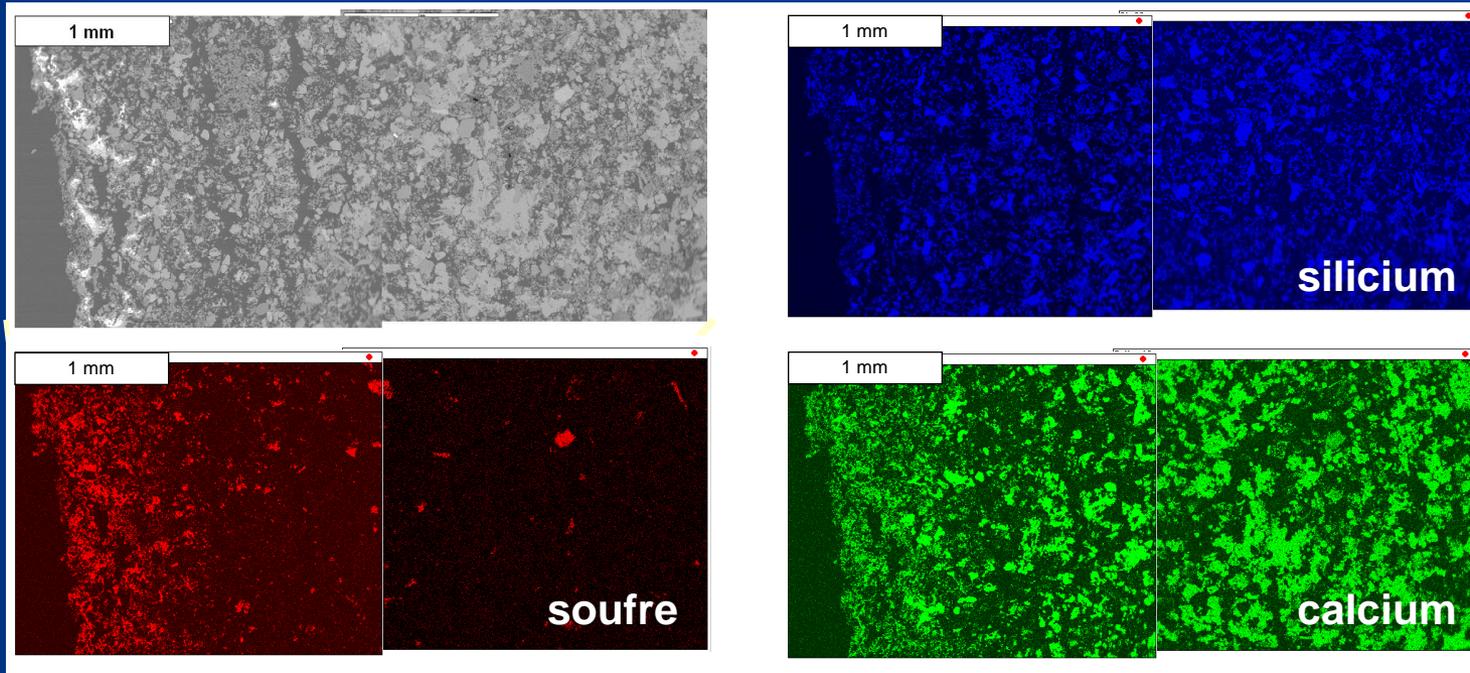
Calcite : CaCO_3

Quartz : SiO_2

Gypse : $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
= produit de l'altération



DRX sur poudre et sur massif, ATG, ICP, MEB, ...



Calcite : CaCO_3

Quartz : SiO_2

**Gypse : $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
= produit de l'altération**

Comprendre les mécanismes d'altération des pierres en œuvre

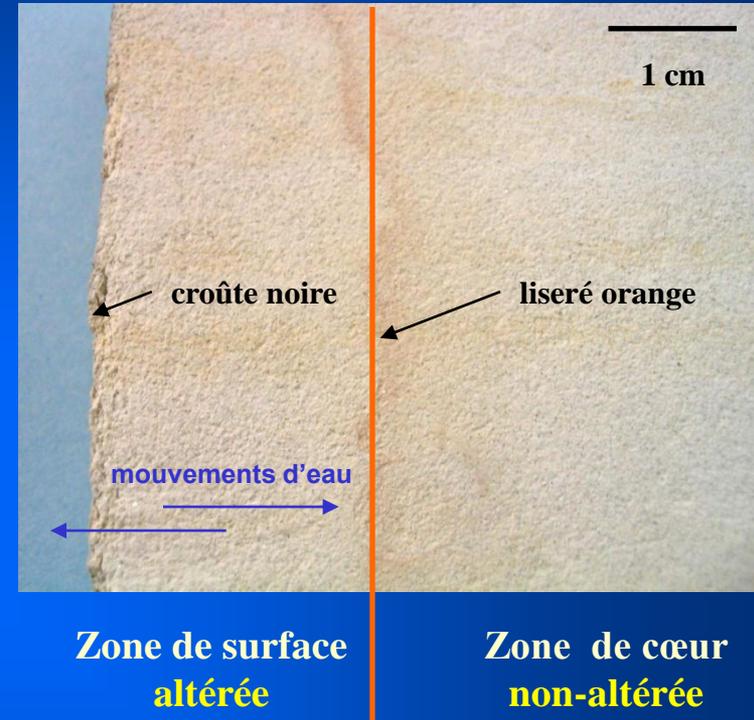
1. Modifications minéralogiques et texturales dans la zone proche de la surface exposée à l'environnement extérieur
2. 20 mm de profondeur : limite de présence de gypse, produit de l'altération

"liseré orange"
profondeur : 20 mm



Rôle de
marqueur

3. 20 mm de profondeur : pénétration maximale des mouvements d'eau



Le développement de l'altération se limite à la zone accessible aux mouvements d'eau

Comprendre les mécanismes d'altération des pierres en œuvre

L'eau :
vecteur principal des altérations

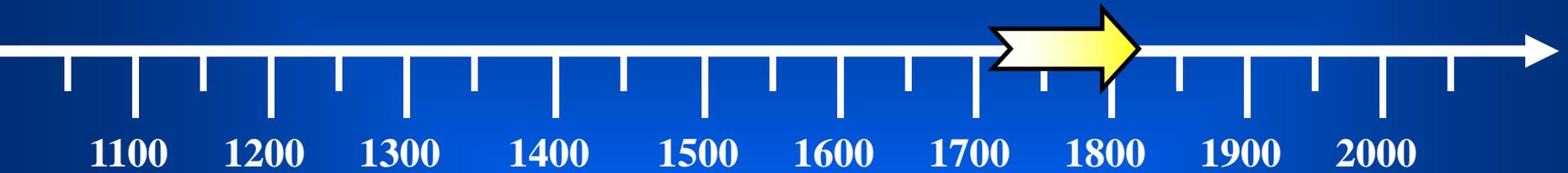


Humidité de l'air
Pluie directe
Remontée capillaire



Maison à Nantes

Depuis quand observe-t-on la détérioration des pierres en œuvre ?

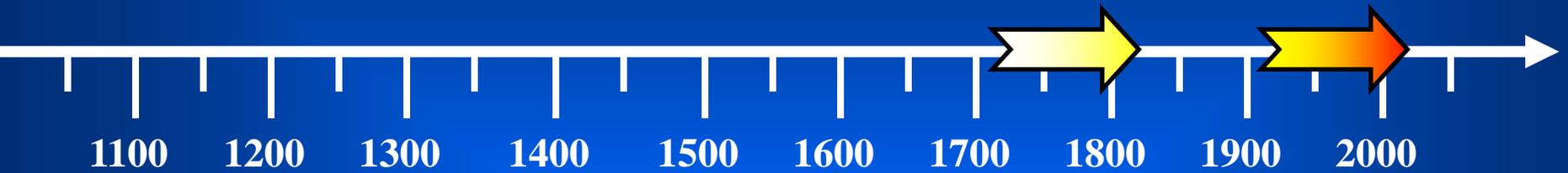


Avant l'ère industrielle:

Rôle des agents naturels



Depuis quand observe-t-on la détérioration des pierres en œuvre ?



Rôle des agents naturels

+ Rôle majeur des polluants

Depuis l'ère industrielle:



Les différents types d'altérations

Les altérations rencontrées
sont d'origine :

Physique

et/ou

Chimique

et/ou

Biologique

Cathédrales de Tours, Nantes, ...
Châteaux de Chambord, Blois, ...



Château de Chambord

Altération des pierres



Château de Valencay

Les différents types d'altérations



CRACK & DEFORMATION FISSURE & DÉFORMATION

CRACK . FISSURE

Fracture . Fracture

Star crack . Fissuration en étoile

Hair crack . Microfissure

Craquele . Craquellement

Splitting . Clivage

DEFORMATION . DÉFORMATION



DETACHMENT DÉTACHEMENT

BLISTERING . BOURSOUFURE

BURSTING . ECLATEMENT

DELAMINATION . DÉLITAGE

Exfoliation . Exfoliation

DISINTEGRATION .
DÉSAGRÉGATION

Crumbling . Emiettement

Granular disintegration .
Désagrégation granulaire

■ **Powdering, Chalking** . Pulvérulence,
Farinage

■ **Sanding** . Désagrégation sableuse

■ **Sugaring** . Désagrégation saccharoïde

FRAGMENTATION .
FRAGMENTATION

Splintering . Fragmentation en esquilles

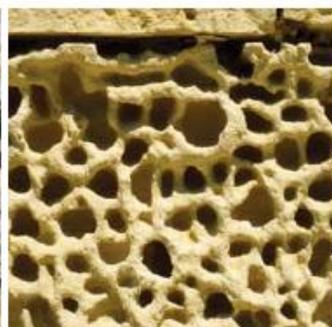
Chipping . Epaufure

PEELING . PELAGE

SCALING . DESQUAMATION

Flaking . Ecaillage

Contour scaling . Desquamation en plaque



FEATURES INDUCED BY MATERIAL LOSS FIGURES INDUITES PAR UNE PERTE DE MATIÈRE

ALVEOLIZATION . ALVÉOLISATION

Coving . Creusement

EROSION . ÉROSION

Differential erosion . Erosion différen-
tielle

Loss . Perte :

■ **of components** . de constituants

■ **of matrix** . de matrice

Rounding . Erosion en boule

Roughening . Augmentation de rugosité

MECHANICAL DAMAGE .
DÉGÂT MÉCANIQUE

Impact damage . Trace d'impact

Cut . Incision

Scratch . Rayure

Abrasion . Abrasion

Keying . Bûchage

MICROKARST . MICROKARST

MISSING PART .
PARTIE MANQUANTE

Gap . Trou

PERFORATION . PERFORATION

PITTING . PITTING



DISCOLORATION & DEPOSIT ALTÉRATION CHROMATIQUE ET DÉPÔT

CRUST . CROÛTE

Black crust . Croûte noire

Salt crust . Croûte saline

DEPOSIT . DÉPÔT

DISCOLOURATION .
ALTÉRATION CHROMATIQUE

Colouration . Coloration

Bleaching . Décoloration

Moist area . Assombrissement dû à l'humidité

Staining . Tache

EFFLORESCENCE . EFFLORESCENCE

ENCRUSTATION . ENCRÔTEMENT

Concretion . Concrétion

FILM . FILM

GLOSSY ASPECT . ASPECT LUISANT

GRAFFITI . GRAFFITI

PATINA . PATINE

Iron rich patina . Patine ferrugineuse

Oxalate patina . Patine d'oxalates

SOILING . ENCRASSEMENT

SUBFLORESCENCE .
SUBFLORESCENCE



BIOLOGICAL COLONIZATION COLONISATION BIOLOGIQUE

BIOLOGICAL COLONIZATION .
COLONISATION BIOLOGIQUE

ALGA . ALGUE

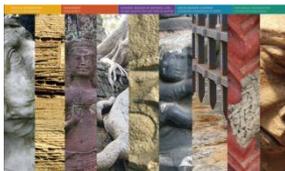
LICHEN . LICHEN

MOSS . MOUSSE

MOULD . MOISSISSURE

PLANT . PLANTE

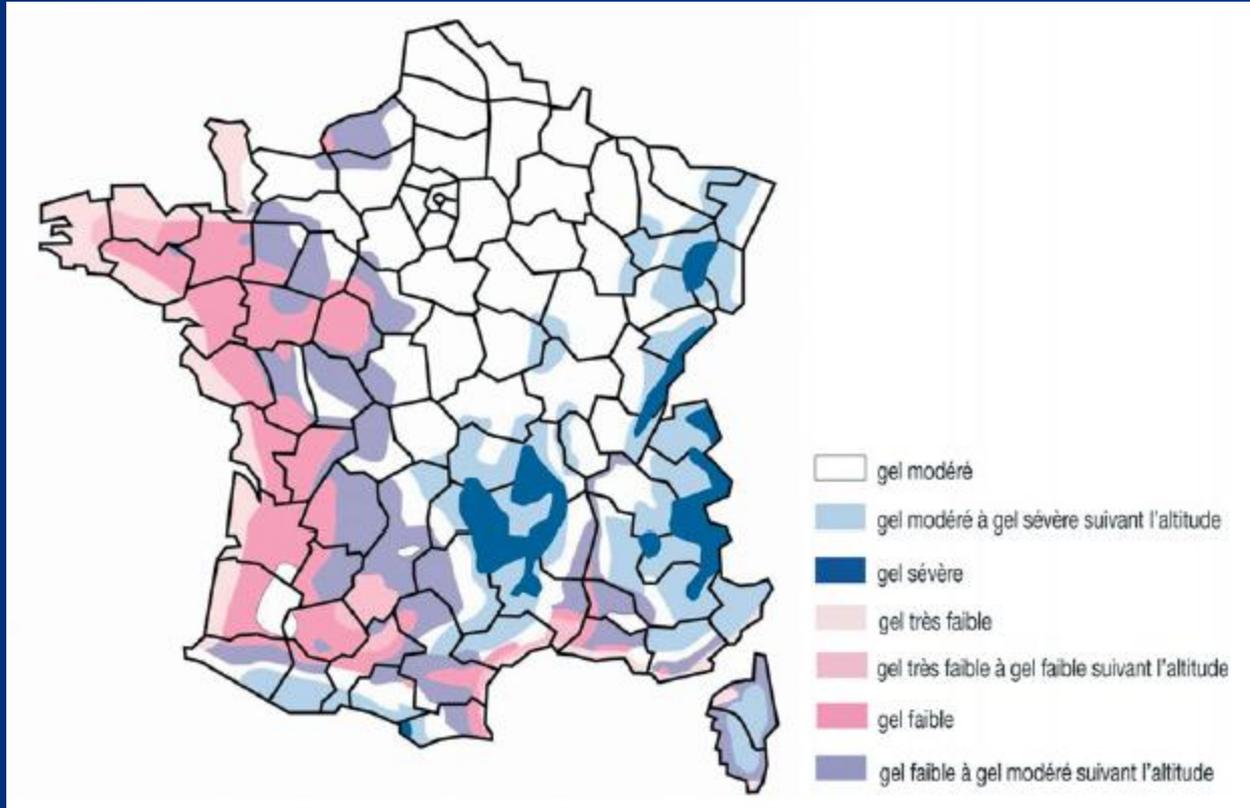
ICOMOS



Conseil International des
Monuments et des Sites

Les différents types d'altérations

Le gel (The freezing)



Éclatement dû au gel



Les différents types d'altérations

Le gel (The freezing)

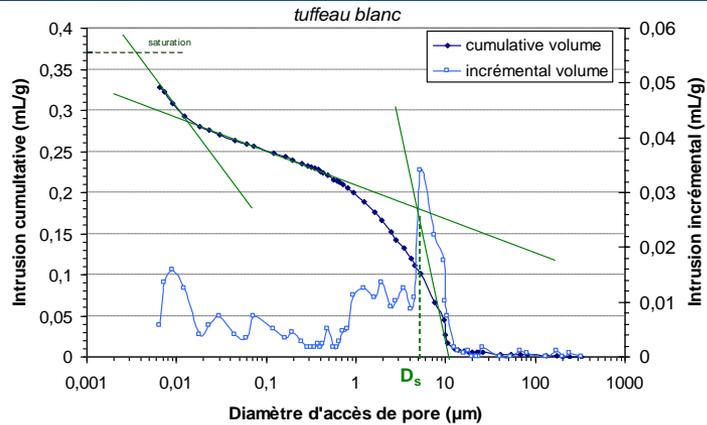
Pierre de Sébastopol

$$N_{Hg} = 41,9 \%$$

$$\rho_a = 1,52 \text{ g.cm}^{-3}$$

$$\rho_s = 2,70 \text{ g.cm}^{-3}$$

$$D_s = 20 \mu\text{m}$$



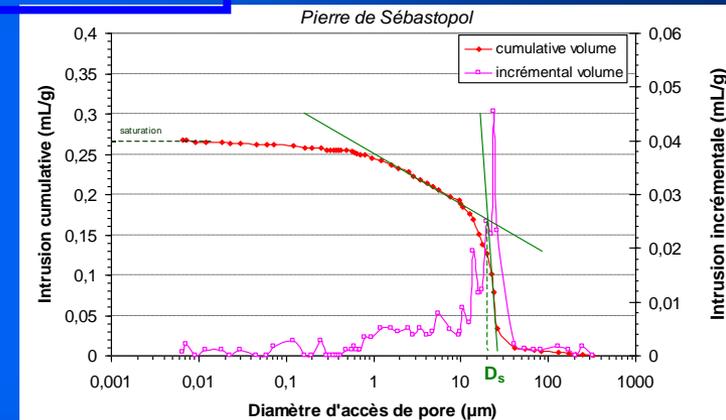
Tuffeau blanc

$$N_{Hg} = 42,8 \%$$

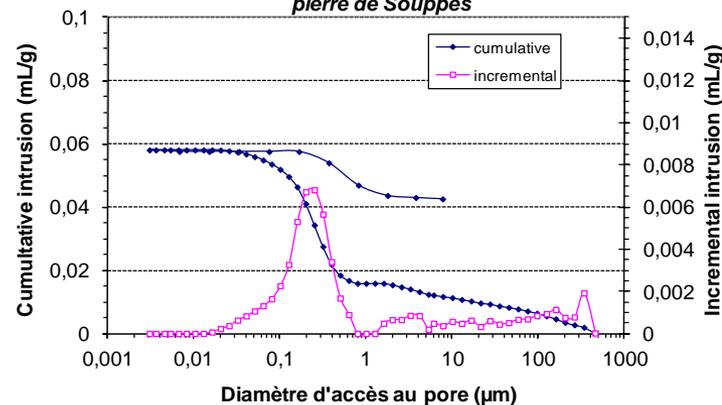
$$\rho_a = 1,31 \text{ g.cm}^{-3}$$

$$\rho_s = 2,55 \text{ g.cm}^{-3}$$

$$D_s = 5 \mu\text{m}$$



Pierre de Souppes



Pierre de Souppes

$$N_{Hg} = 13,3 \%$$

$$\rho_a = 2,29 \text{ g.cm}^{-3}$$

$$\rho_s = 2,65 \text{ g.cm}^{-3}$$

$$D_s = 0,4 \mu\text{m}$$

Les différents types d'altérations

Les colonisations biologiques (The biological colonizations)

**mousses,
lichens,
végétaux divers**



Château de Chambord

Front d'imbibition



Les différents types d'altérations

Les patines (The patina)



Cloître de la Psalette (Tours)



partie restaurée en 1998

La patine est une sorte
d'épiderme créé par la pierre !

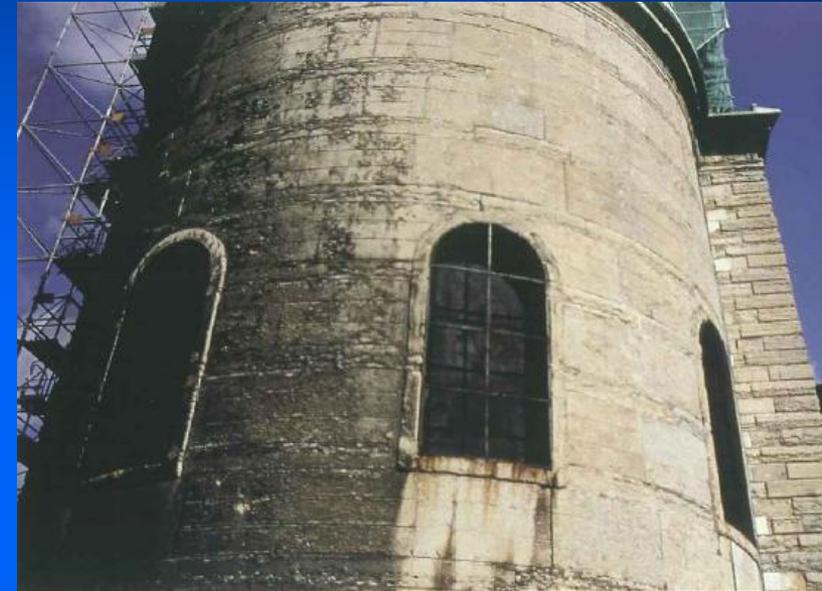
C'est une altération mais pas une dégradation à proprement dite, bien qu'elle soit souvent initiatrice des futures dégradations ...

Les différents types d'altérations

Les croûtes noires (The black crusts)



Maison à Nantes



*zones humides
mais non lessivées*

Les différents types d'altérations

Les désagrégations sableuses (The granular disintegrations)



Château d'Amboise

*zones humides
(ruissellement)*

*mais sans
séchage intense*



Abbaye de Fontevraud



Donjon de Montrichard

Cas du Tuffeau blanc

Les différents types d'altérations

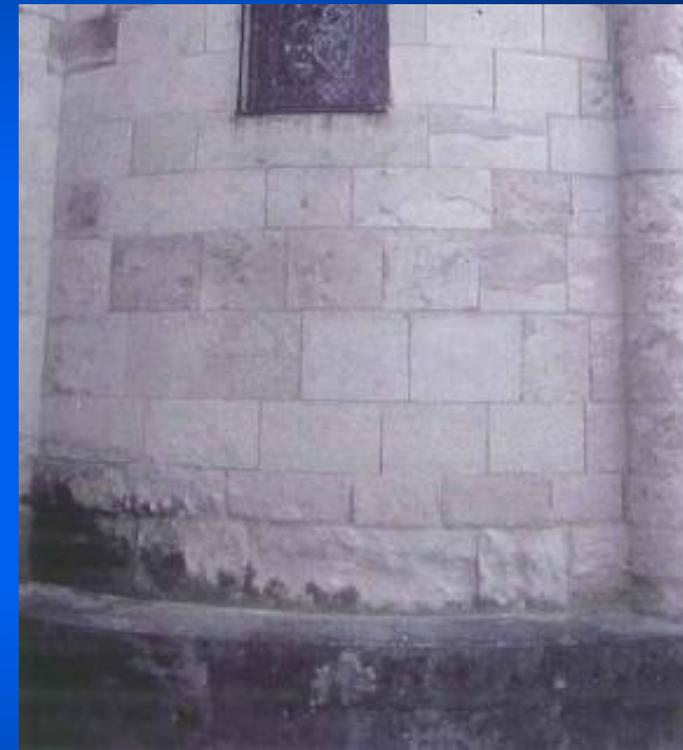
Les désagrégations sableuses (The granular disintegrations)

Rôle de l'architecture



*zones humides
(ruissellement)
mais sans
séchage intense*

Dégradation liée aux remontées capillaires au-dessus d'une feuille métallique protégeant une corniche (Avignon)



Dégradation liée aux remontées capillaires au-dessus d'un soubassement (Nevers)

Les différents types d'altérations



Château des Ducs de Bretagne
Nantes

*zones humides
(ruissellement)
sans
séchage intense
+ action du vent*

Les alvéolisations (The alveolizations)



Château des Ducs de Bretagne
Nantes



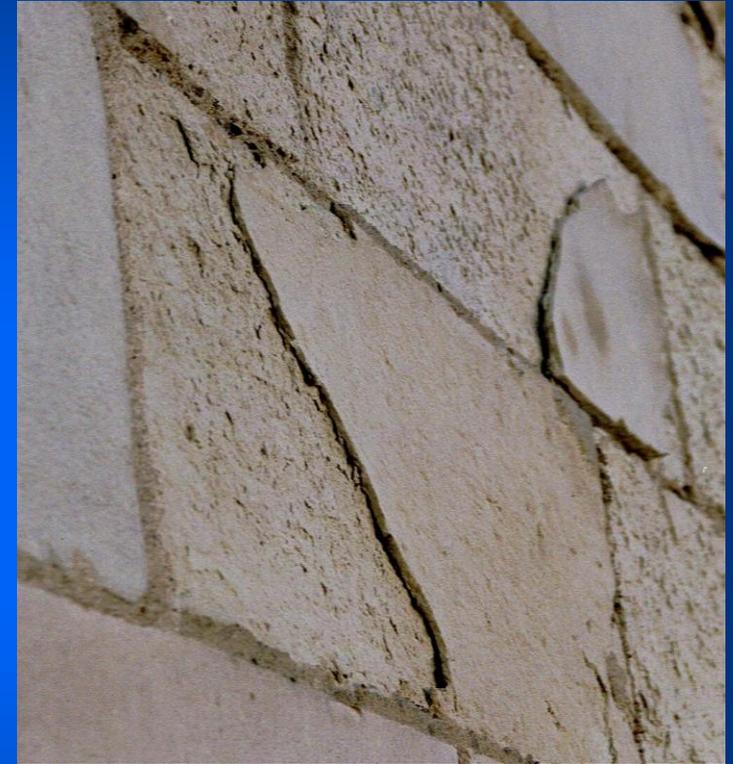
Maison à Nantes

Les différents types d'altérations

Les desquamations en plaques (The coutour scaling)



Château de Blois



Château de Chaumont



Château de Chambord

zones lessivées

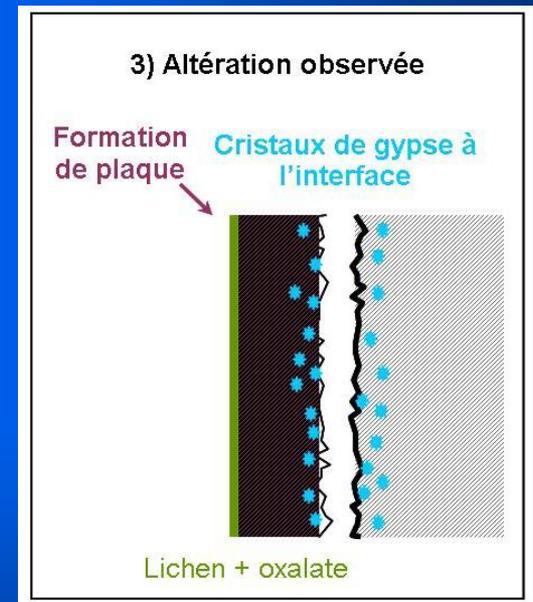
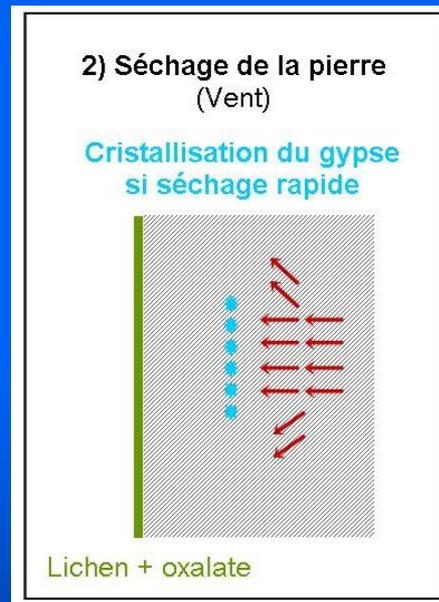
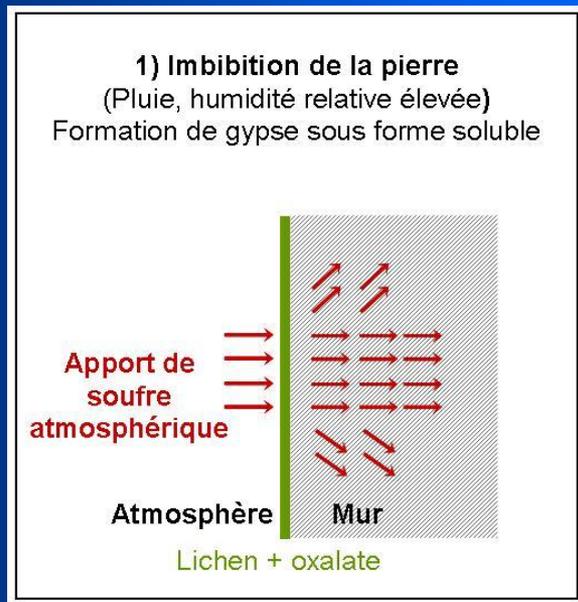
avec

séchage intense

Cas du Tuffeau blanc

Hypothèses émises

- Le gypse : facteur déclenchant de l'altération en plaques



D'autres facteurs d'altération

La compatibilité pierre / pierre (The compatibility stone / stone)



tuffeau

Forme d'altération en :
désagrégation sableuse et/ou alvéolisation

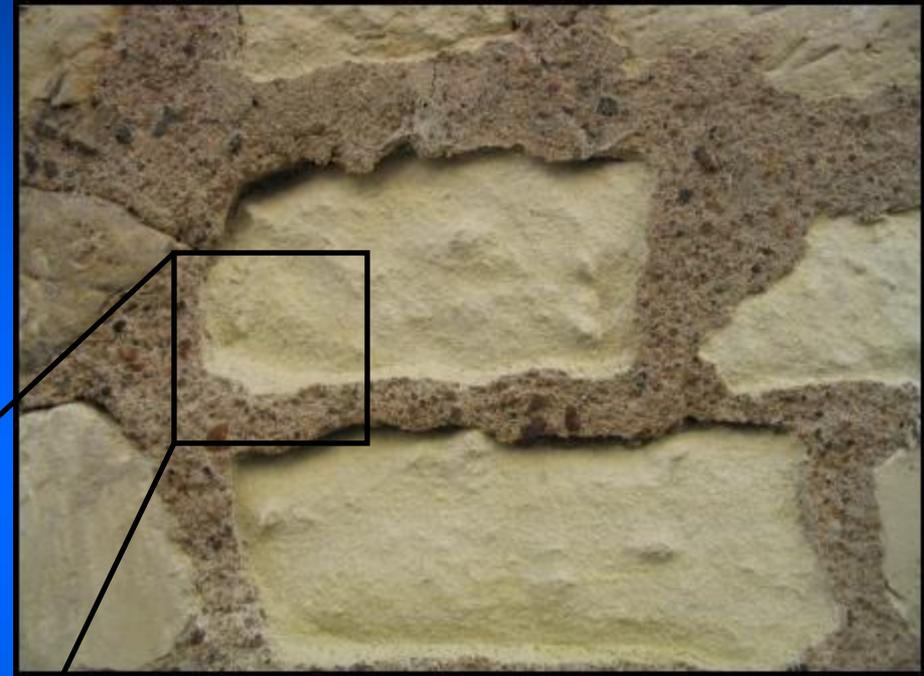
La juxtaposition de pierres de nature différente peut accélérer la dégradation de l'une d'elles !

Une pierre laissant faiblement circuler l'eau juxtaposée à une pierre favorisant sa circulation va empêcher le bon drainage de l'eau. Et la pierre va être fortement imprégnée d'eau chargée de sels et autres polluants qui vont s'y accumuler.



D'autres facteurs d'altération *tuffeau*

La compatibilité pierre / mortier (The compatibility stone / mortar)



Forme d'altération en :
désagrégation sableuse

Les mortiers utilisés pour relier les pierres entre elles peuvent accélérer la dégradation des pierres !

Les mortiers sont souvent chargés en sels et très peu perméables. L'eau chargée de sels et autres polluants qui vont s'accumuler dans la pierre et la détériorer. Les mortiers à base de ciment sont les plus destructeurs.

D'autres facteurs d'altération

La compatibilité pierre / mortier (The compatibility stone / mortar)

PROPRIÉTÉS CONFÉRÉES AUX MORTIERS DE RÉPARATION PAR DIFFÉRENTS LIANTS (D'APRÈS LA LITTÉRATURE ET LES ÉTUDES URMH ET LABORATOIRES ASSOCIÉS)					
	Mortier de chaux aérienne	Mortier de chaux hydraulique naturelle	Mortier de ciment blanc	Mortier prêt à l'emploi (pierre tendre)	Mortier prêt à l'emploi (pierre dure)
Résistance mécanique	X	X	XXXX	XX	XXX
Porosité	XXXX	XXXX	XX	XXXXX	XXXX
Capillarité	XXXX	XXXXX	X	XX	X
Adhérence	X	X	XXX	XXX	XXX

PRÉCONISATIONS POSSIBLES SELON LES CONDITIONS DE CHANTIER					
	Pierre dégradée, tendre/capillaire	Pierre dure/non capillaire, non altérée	Milieu exposé, humide, riche en sels	Applicateur non qualifié	Réversibilité souhaitée
Mortier de plâtre	X	non	non	X	X
Mortier de chaux aérienne	XX	XX	non	non	XX
Mortier de chaux hydraulique	XX	XX	X	X	X
Mortier de ciment	non	X	non	X	non
Mortier prêt à l'emploi	X	XX	X	XX	X

L'eau est le vecteur principal des altérations
(The water is the main vector of alterations)

Action directe

Dissolution
Gel/dégel



Action indirecte

Transport des polluants

Types de sels	Origines possibles
Sulfate de sodium (mirabilite, thénardite)	Ciments de type Portland, mortiers au ciment, lessives, briques...
Carbonate de sodium, de potassium	Ciments type Portland, mortiers au ciment, lessives, résidus de nettoyage chimique...
Chlorure de sodium (halite)	Eau de mer, embruns, sels de déverglaçage, sel de salaison...
Chlorure de potassium (sylvite)	Sol...
Sulfate de calcium (gypse, anhydrite, bassanite)	Plâtre, mortiers contenant du plâtre, ciments, mortiers au ciment, SO ₂ atmosphérique, embruns, activités bactériennes
Nitrate de sodium	Sol, engrais, matières organiques décomposées, activités bactériennes
Nitrate de potassium	Matières organiques décomposées, sol, engrais, activités bactériennes

Principaux sels solubles sur les monuments

- Chlorures** {
- **Sylvite** KCl
 - **Halite** NaCl
 - Antarctite $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
- Nitrates** {
- Nitrate de sodium NaNO_3
 - **Niter** (salpêtre) KNO_3
 - Nitrocalcite $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
- Sulfates** {
- Kieserite / Epsomite $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
 - Arcanite K_2SO_4
 - **Gypse** $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
 - **Thenardite / Mirabilite** $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
- Carbonates** {
- Calcite CaCO_3
 - Natron $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
- Autres sels** {
- Thaumassite $\text{Ca}_3\text{Si}(\text{CO}_3)(\text{OH})_6(\text{SO}_4)12\text{H}_2\text{O}$
 - **Ettringite** $\text{K}_2\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}26\text{H}_2\text{O}$

Facteurs externes liés aux dégradations par les sels

Conditions de saturation
en eau/sels

Teneur en eau
Concentration en sel du substrat
(type de polluant)
Cycles d'humidification-séchage

Conditions
d'évaporation

Vitesse d'évaporation
Intensité des variations HR et T°C
Durée des paliers HR et T°C
Fréquence des cycles humidification-séchage
(exposition, durée, intensité)

Facteurs internes liés aux dégradations par les sels (propriétés pétrophysiques)

Propriétés
de transfert

Distribution porale
Transferts capillaires
Perméabilité
Rétention d'eau
Minéralogie du substrat

Propriétés
mécaniques

Résistance à la traction R_t
Anisotropie

Eau Chargée en sels au contact de la Pierre

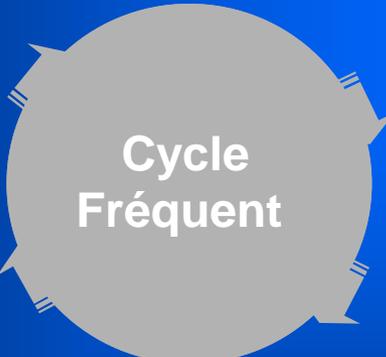


Dégradation

Action Physique

Action Chimique

Dissolution



Précipitation

**Contraintes
récurrentes**

**Altération des propriétés liantes
des phases constitutives des pierres
et des enduits**

Perte de cohésion & Perte de masse

Altération chromatique / Discoloration
Tâches d'humidité / Moist spots



(Venise, Italie)



(Couvent, Collioure)

Altération chromatique / Discoloration Tâches d'humidité / Moist spots



Tache d'humidité à l'intérieur de la cathédrale
d'Agde due à des infiltrations d'eau par le vitrail

Efflorescences



Efflorescence (mur extérieur, Oisterwijk, Pays-bas)



Efflorescence et pelage de peinture
(Église, Coïmba, Portugal)



Efflorescences



Efflorescences salines (sulfates, carbonates) à proximité de rejointoiements réalisés avec un mortier à base de ciment (Arles)



Cristallisations salines en sous-face d'un balcon soumis à des infiltrations d'eau (Marseille)

Répartition d'efflorescences à l'échelle d'une maçonnerie soumise à des remontées capillaires



Londres, RU

Délamination/Delamination



Délamination d'enduits, Coimbra, Portugal.



Grès rouge, Delft, Pays-Bas

Exfoliation/ Exfoliation



Exfoliation d'un grès, Cathédrale Zeitz, Allemagne.
B. Fitzner



Exfoliation d'enduits, Lisbonne.
Portugal

Desquamation/Scaling



Ancien dépôt de sel (Venise, Italie)

Pelage/Peeling



Conservatoire de Musique, Lyon



Église ND des Anges, Perpignan



Cloître, Collioure

Désagrégation sableuse / Granular disintegration

Enduit, Dieuze, France



Sculpture en marbre, Munich / S. Simon

Charité, Marseille



Que faire ?

élaboration d'un diagnostic

Inspection & diagnostic de bâtiment : État des lieux

Données générales:

***historique (construction & intervention), plan,
photos et schéma...***

Localisation des pathologies:

Orientation des murs, cartographie, photos....

Description des matériaux concernés:

brique, pierres, mortier...

Description des types de dégradation:

intérieur, extérieur, formes, distribution...

Conditions environnementales:

Exposition, T°C, HR, leurs variations....

Données additionnelles:

problème de structure, infiltration d'eau, pollution...

Inspection & diagnostic de bâtiment : **État des lieux**

Formulation d'hypothèses:
mécanismes de dégradations plausibles

Tests à réaliser:

In situ types de test (pipe karsten, prélèvement de poudre & efflorescence, vitesse de son...) et zones concernées

*Mesure de
l'absorption d'eau*



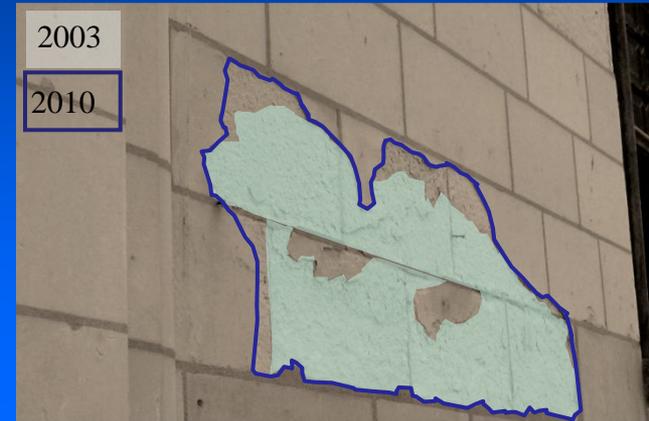
Mesures au laboratoire:
Teneur en eau,
Teneur en eau
hygroscopique,
analyses de sel (DRX, Cl, ...)

Diagnostic

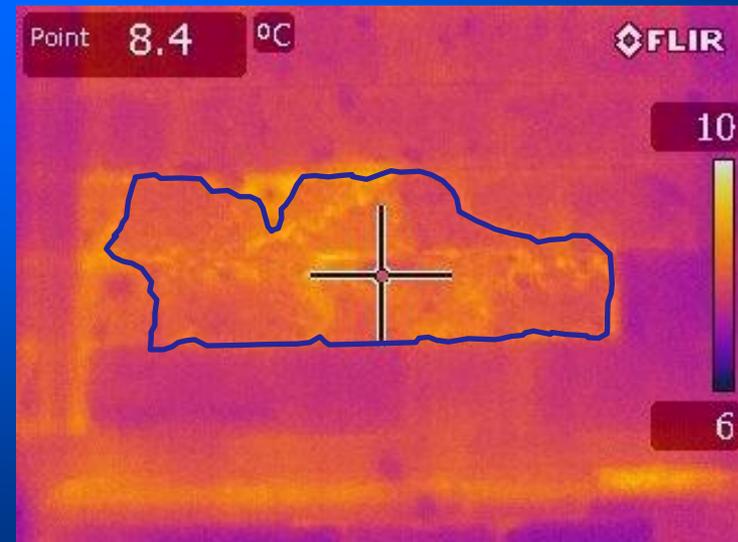
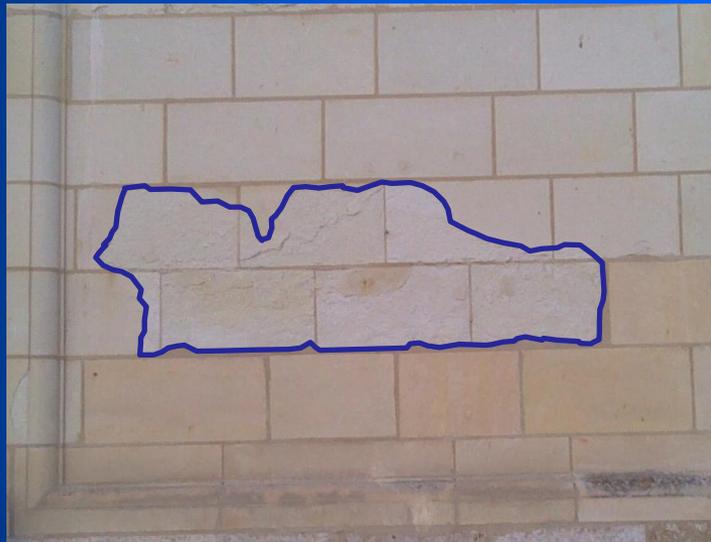
Préconisation et méthodes de restauration:
faisabilité, application suivi.....

Inspection & diagnostic de bâtiment : État des lieux

Suivi de l'évolution d'une altération en plaque : prédiction?



Cour intérieure, aile Sud. Clichés pris en 2003 et 2010 : évolution de l'étendue de la zone d'altération.



Cour intérieure, aile Sud. Le cliché pris à la caméra thermique laisse entrevoir les zones de future desquamation. Un diagnostic "sonore" permet de confirmer cette hypothèse d'évolution de l'altération en plaque.

Interventions

- **Nettoyage**
- **Dessalement**
- **Inhibiteur de cristallisation**
- **Stopper les remontées capillaires**
- **Application de mortiers spéciaux résistants aux sels**

Mortier accumulateur de sels



Juin 01



Dec 02



Fev 03



Mai 04



Sept 04

Inspection & diagnostic de bâtiment : État des lieux

SCHÉMA MÉTHODOLOGIQUE DE L'ÉTUDE D'UN ÉDIFICE

Observation naturaliste documentée	Etat des lieux	Visite détaillée de l'édifice Pré-diagnostic Stratégie d'investigation à l'échelle de l'édifice
	Diagnostic global	Contexte historique Contexte environnemental Relevé de l'ouvrage (calepinage) Typologie du bâti
Analyses	Etude des désordres et des altérations	Symptômes Stratégie d'investigation : <ul style="list-style-type: none"> • à l'échelle de la structure • à l'échelle du matériau
Intégration des données pour la pérennité de l'ouvrage	Diagnostic	Synthèse des résultats Détermination des causes
	Solutions Choix de restauration	Proposition des solutions répartitrices de restauration
	Suivi	Surveillance de l'ouvrage

Inspection & diagnostic de bâtiment : *État des lieux*

Altérations	Travaux à entreprendre
Désordres physiques avec perte de matière	Réparation, ragréage, consolidation, dessalement (hydrofugation)
Dégradations visuelles, esthétiques (tache, coulure, fracture)	Nettoyage, bouchage (hydrofugation)
Altérations biologiques	Traitement biocide
Dégradations dues à une erreur de conception, de mise en œuvre ou de traitement	Modifications architecturales, changement de matériau, dérestauration
Dégradations dues à l'utilisation ou à l'occupation du site	Modifications des usages

→ Le nettoyage

- Le gommage ®
- Le nettoyage laser
- Les cataplasmes (procédé tollis ®)



Cathédrale de Nantes

→ Le nettoyage

- Le gommage ®

projection d'une fine poudre (ϕ 30 à 100 μ m) sous faible pression (avec ou sans eau)



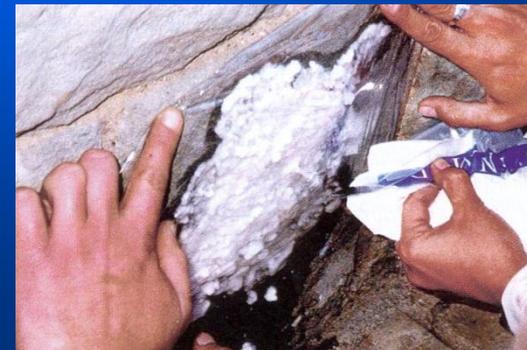
- Le nettoyage laser

vaporisation des salissures en surface par l'impact d'un faisceau laser à impulsions



- Les cataplasmes (procédé tollis ®)

application d'un cataplasme de laine de roche dissolvant les salissures et dessalinisant la pierre



→ Le nettoyage

- Le gommage ®
- Le nettoyage laser
- Les cataplasmes (procédé tollis ®)

→ La consolidation

- Les silicate d'éthyle, la chaux ...
- Les résines acryliques ...
- La bio-reminéralisation ...



Vue des tirants métalliques reliant les arcs-boutants pour assurer le cerclage de l'édifice (cathédrale de Beauvais)

→ Le nettoyage

- Le gommage ®
- Le nettoyage laser
- Les cataplasmes (procédé tollis ®)



Dispositif électrique anti-pigeons

→ La consolidation

- Les silicate d'éthyle, la chaux ...
- Les résines acryliques ...
- La bio-reminéralisation ...



→ Le traitement préventif

- Les hydrofuges ...
- Les antigraffitis ...

PRINCIPALES FAMILLES DE PRODUITS ANTIGRAFFITIS PRÉVENTIFS		
Système préventif	Permanent	Sacrificiel
Vernis polyuréthane	Maguard SP, Paratag	
Résine acrylique et polytétrafluoroéthylène	Imlar, MBH2010, Protectguard	Parflon, Hydrograph
Silicone et fluorosilane	Protectosil	
Polymère végétal		PSS20
Cires synthétiques		Syragraf, MBH30, Parataff 96

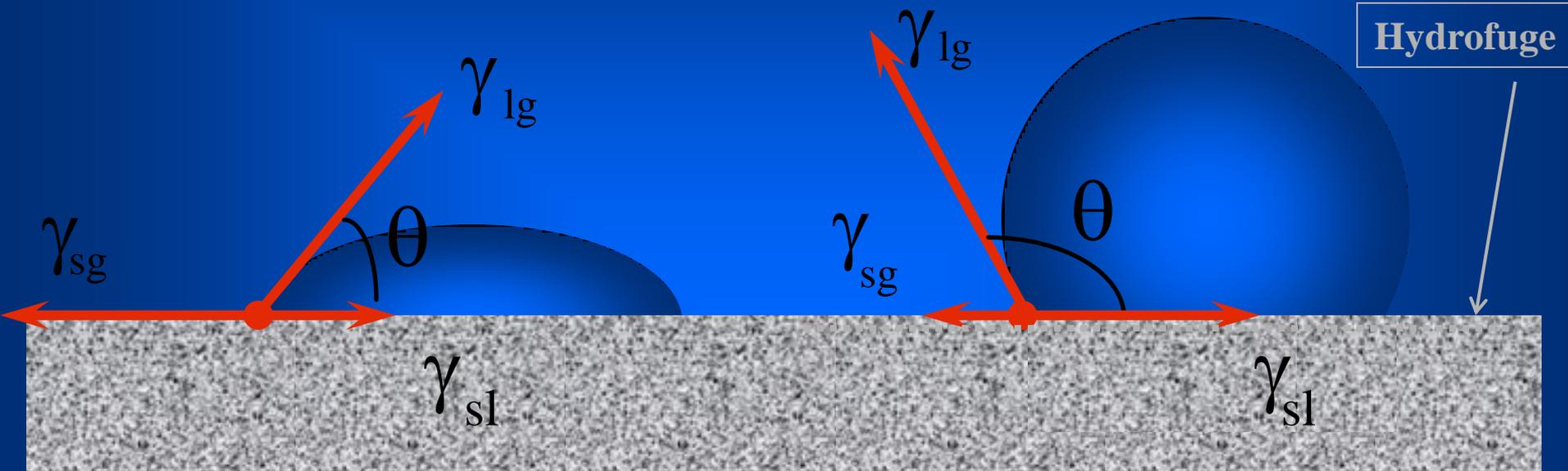
Hydrofugation



Notion de mouillabilité (étalement)

Loi de Young-Dupré (1805)

$$\gamma_{lg} \cdot \cos \theta = \gamma_{sg} - \gamma_{sl}$$



- $\theta < 90^\circ$ ($0 < \cos\theta < 1$): $\gamma_{sg} > \gamma_{sl}$ *mouillage*
 $\theta_{\text{(eau)}} = 0^\circ$ mouillage parfait $\Rightarrow \gamma_{sg} > \gamma_{lg}$ la tension superficielle du substrat est supérieure à celle de l'eau
- $\theta > 90^\circ$ ($\cos\theta < 0$): $\gamma_{sg} < \gamma_{sl}$ *non mouillage*
↑
hydrofuge
les conditions de non-mouillage sont vérifiées pour des substrats à très faible tension γ_{sg}
Hydrofuger revient à diminuer la tension superficielle du substrat jusqu'à ce qu'il acquiert les propriétés d'une surface de "basse énergie"

Problèmes observés suite à des travaux de conservation

Microsablage:



Endommagement de l'épiderme de la pierre suite à un microsablage (Toulon)

Consolidation:



La faible pénétration du produit (fluosilicatisation effectué en 1965) a provoqué l'apparition d'une croûte dure qui se détache par fragments laissant la pierre pulvérulente



**Château des Ducs de Bretagne
(Nantes)**

**Choix des pierres ...
Compatibilité des pierres ...**

*Reconstruction du monument
=
Création d'une copie ?*

PRINCIPAUX ESSAIS NORMALISÉS DE LABORATOIRE POUR LA FOURNITURE DE PIERRES NATURELLES OU L'ÉTUDE DE PIERRE EN ŒUVRE

Catégories d'essai	Essai	Référence normative	Réponse
Essais de reconnaissance	Examen pétrographique	NF EN 12407	Origine, composition minéralogique, texture, altérations
Essais physiques	Caractéristiques géométriques	NF EN 13373	Porosité Réseau poreux Réseau poreux Cohésion de surface Cohésion de surface
	Porosité, masse volumique	NF EN 1936	
	Absorption d'eau	NF EN 13755	
	Capillarité	NF EN 1925	
	Dureté superficielle	NF B 10-506	
	Dureté Knoop	NF EN 14205	
	Glissance	NF EN 14231	
Essais mécaniques	Vitesse du son	NF B 10-505	Homogénéité
	Résistance en compression	NF EN 1926	Résistance mécanique
	Résistance en flexion	NF EN 12372	Résistance mécanique
	Module d'élasticité	NF EN 14146	Rigidité
	Résistance aux attaches	NF EN 13364	Comportement des éléments minces
	Résistance à l'usure	NF EN 14157	
Essais de durabilité	Vieillessement par chocs thermiques	NF EN 14066	Tenue à l'environnement
	Résistance au gel	NF EN 12371	
	Essais de cristallisation des sels	NF EN 12370	
	Vieillessement sous SO ₂	NF EN 13919	

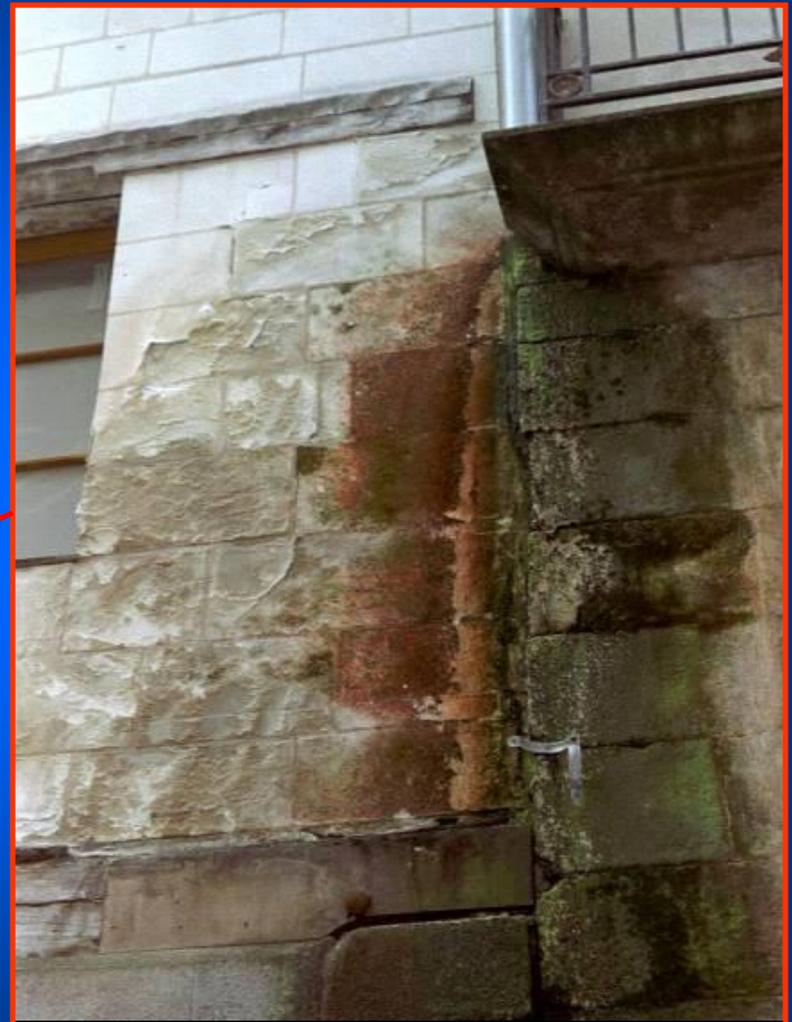
Choix des pierres de remplacement : compatibilité ?

Que faire ? : L'entretien

Maison restaurée en 1996 ...



Maison à Nantes



Maison à Nantes

Coordinateur : Muzahim Al-Mukhtar (début: 2009 - 2012)



Château de Chambord

projet « SACRE »

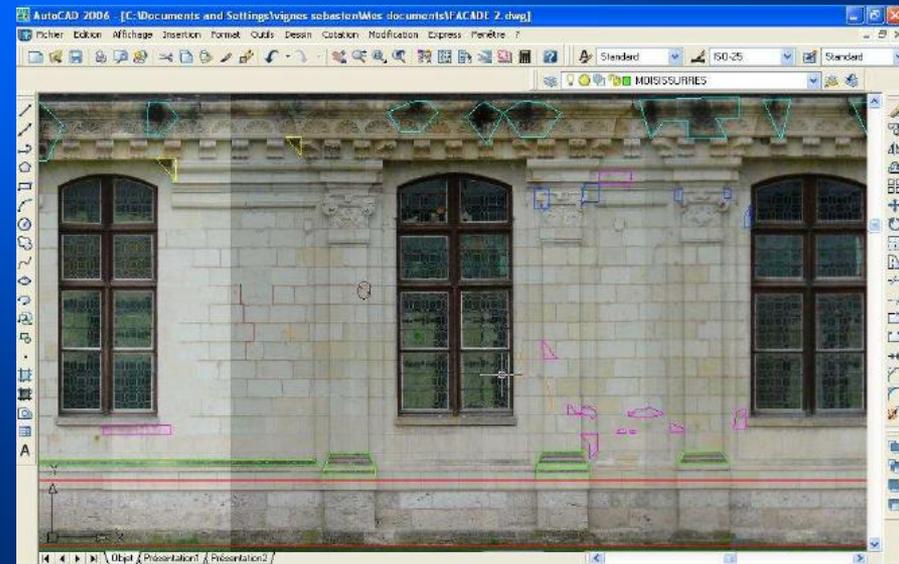
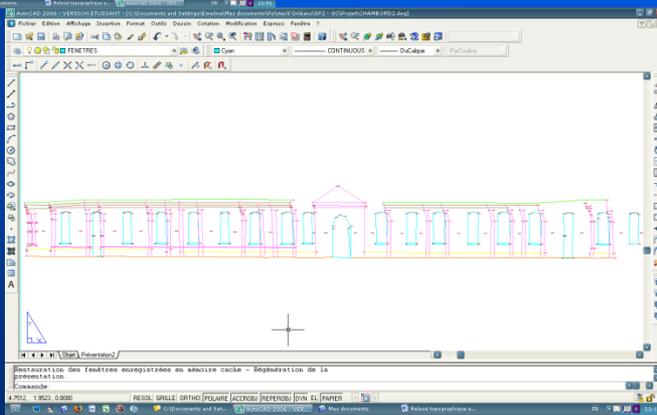
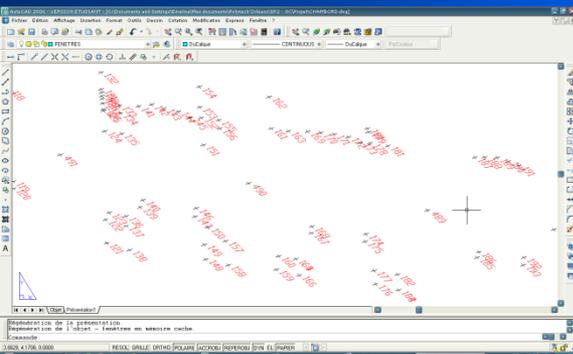
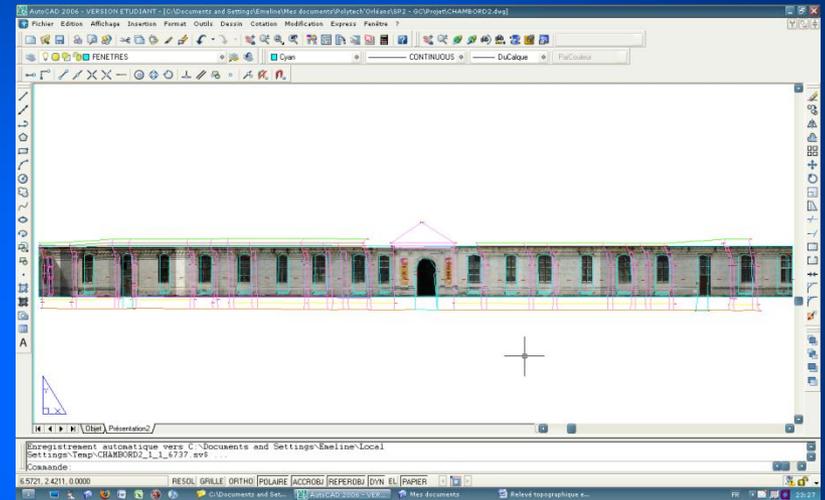
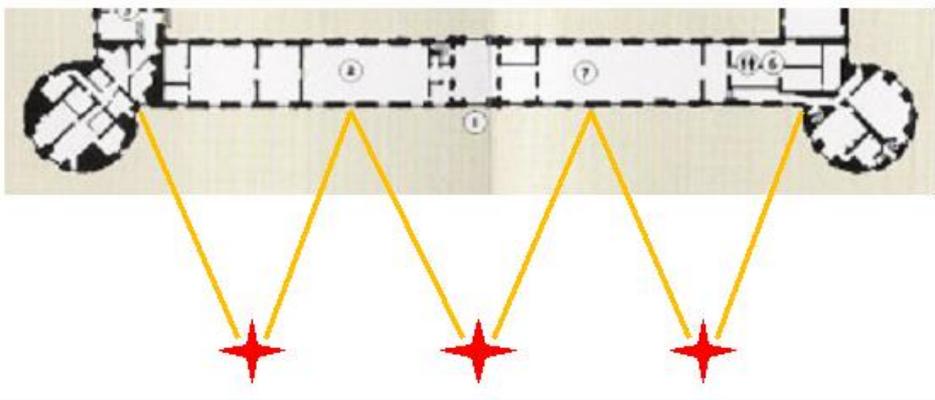
**Suivi des Altérations, Caractérisation et
Restauration des monuments en pierre calcaire**

financé par la Région Centre (3ans)
pilote par le CRMD

1. Modélisation sous DAO de la structure étudiée
2. Etablissement du carnet de santé de l'ouvrage
3. Simulation et prédiction des altérations
4. Création d'un outil d'aide à la décision pour la programmation des interventions
5. Valorisation du projet auprès du grand public

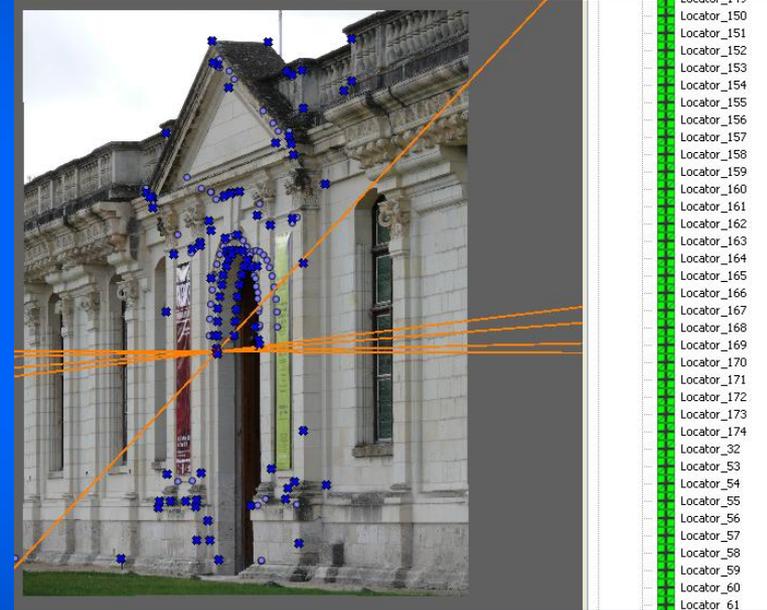
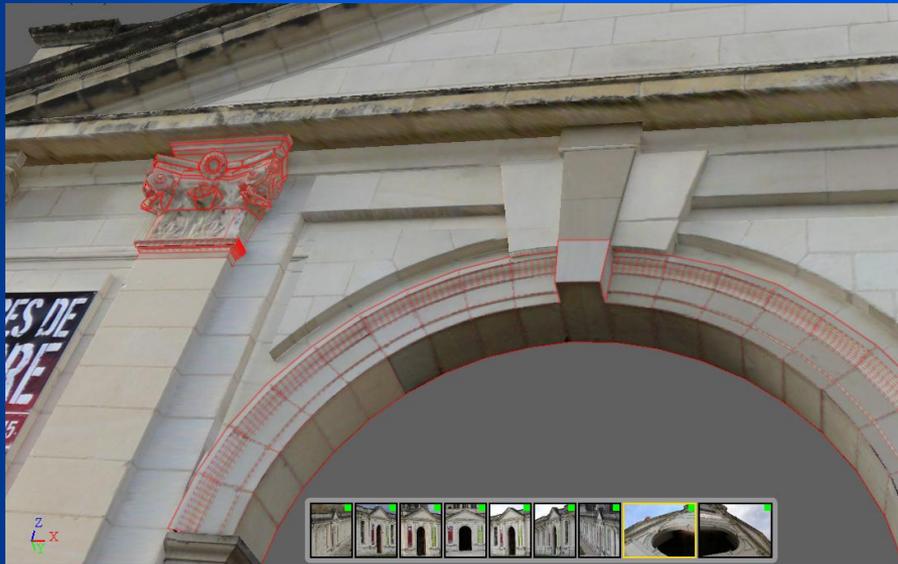


SACRE : étape 1

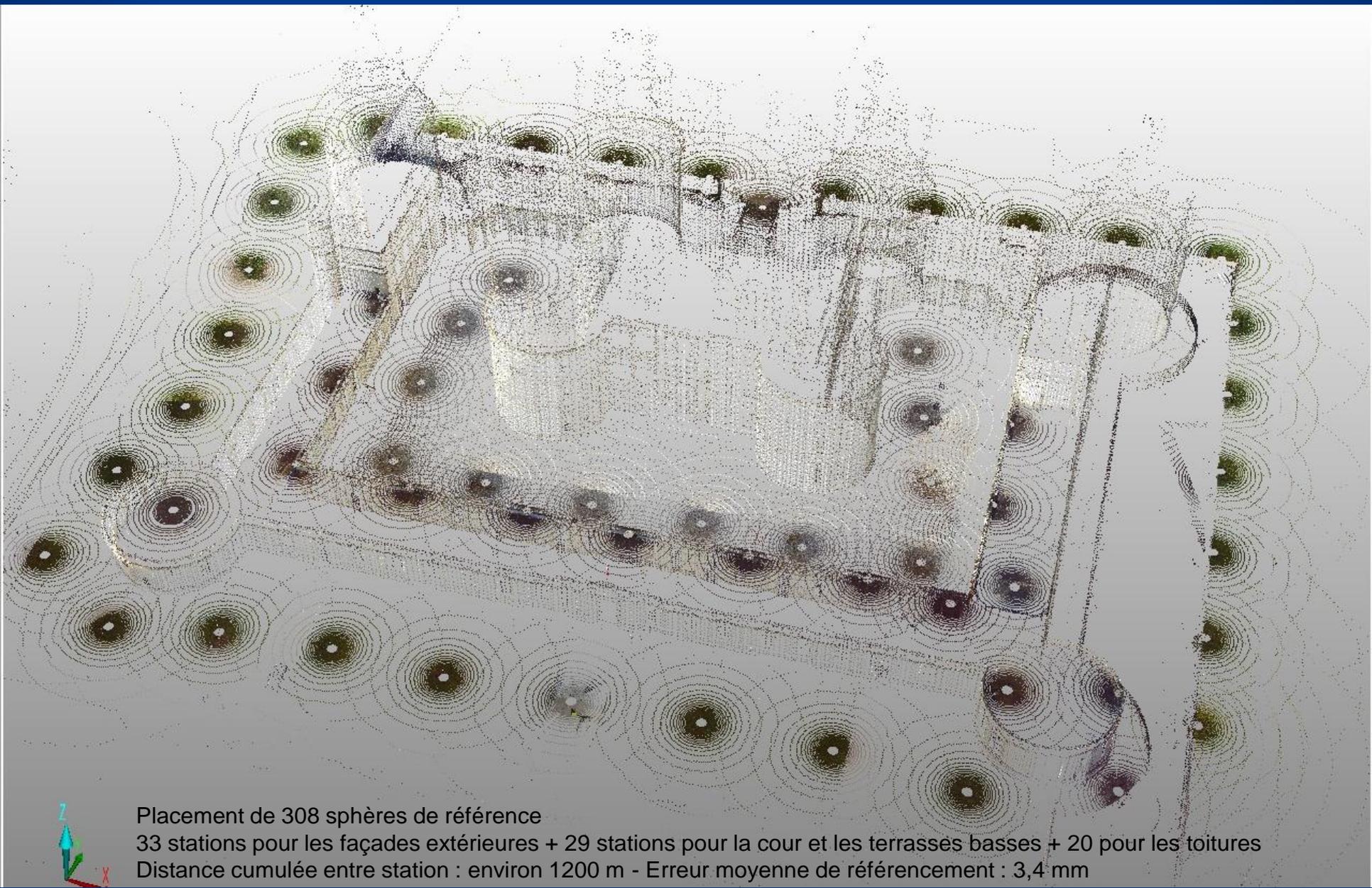


SACRE : étape 1

photogrammétrie



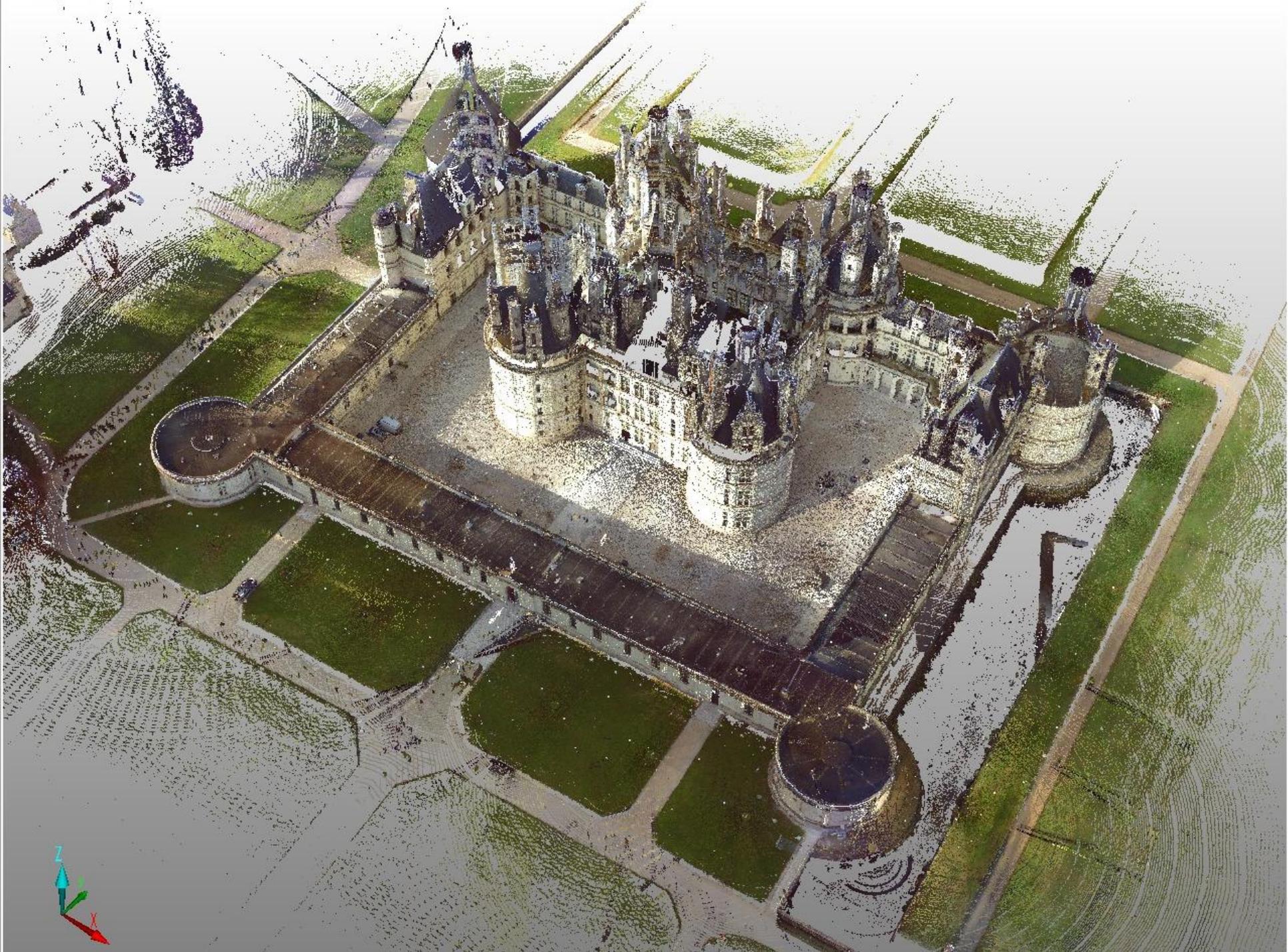
Relevé au scanner laser du château de Chambord





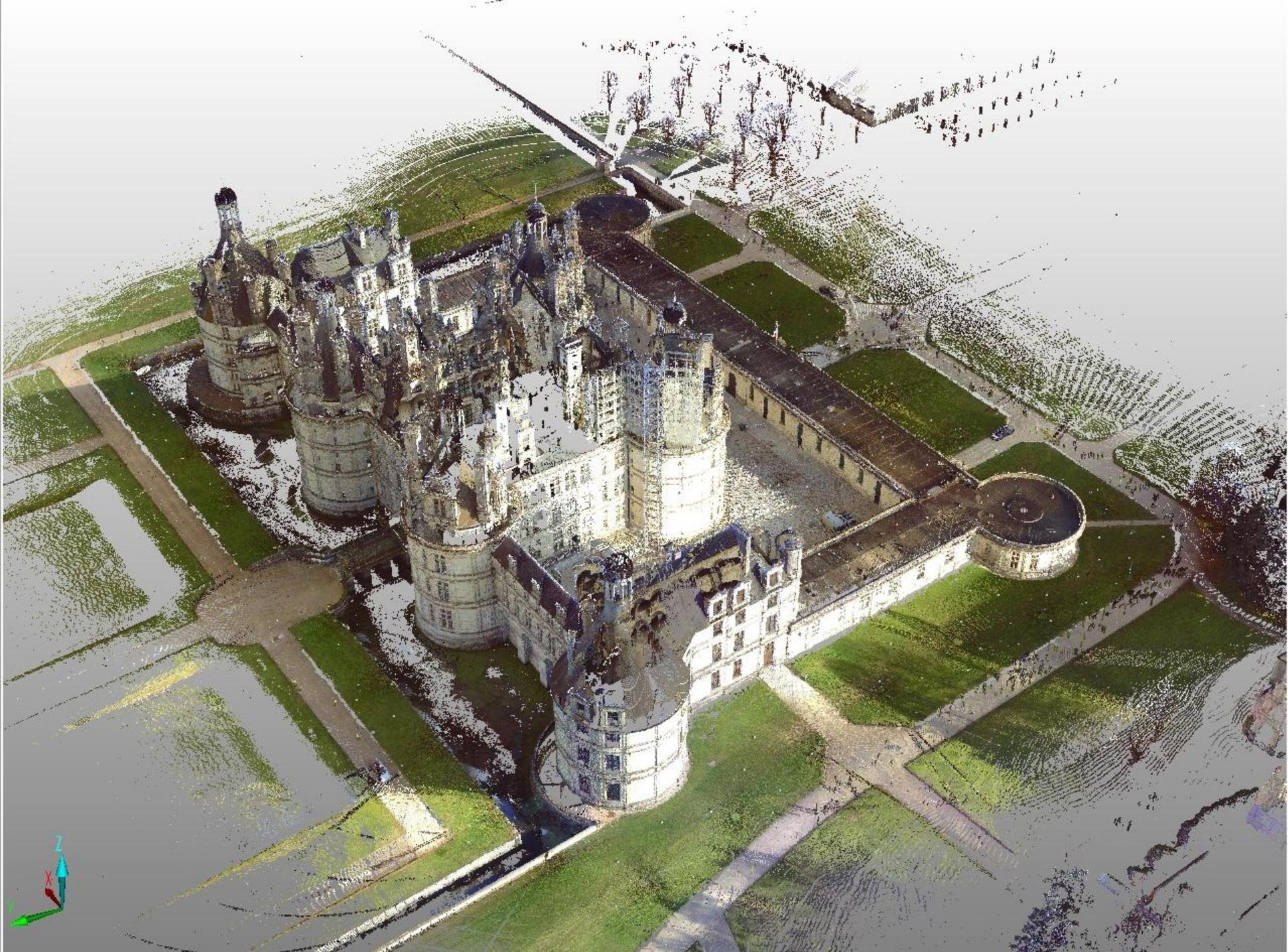








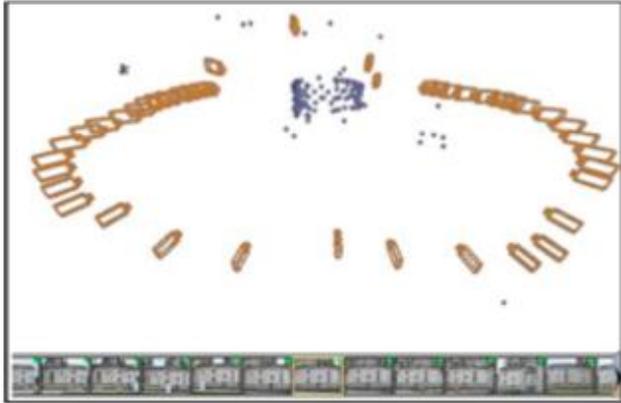




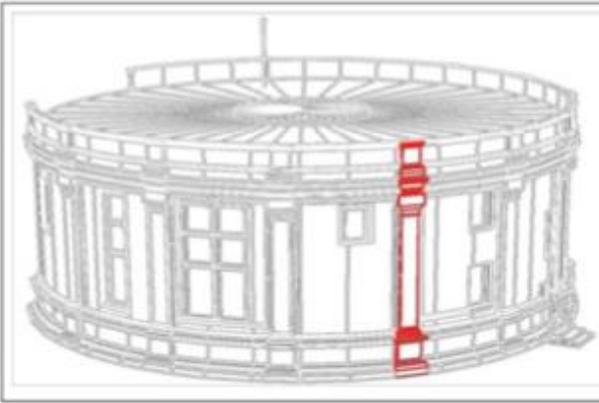


SACRE : étape 1

Position des caméras



Modèle filaire des surfaces

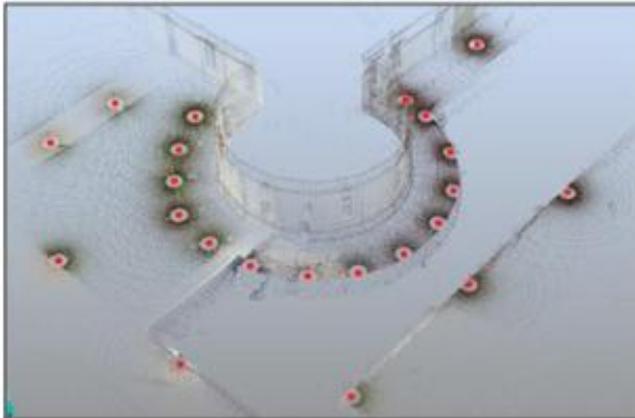


Modèle 3D texturé



MODELE 3D DE LA TOUR DU CHAUDRON REALISE PAR PHOTOMODELISATION

Position des stations



Nuage de points



Modèle 3D maillé



MODELE 3D DE LA TOUR DU CHAUDRON REALISE PAR LASERGRAMMETRIE

SACRE : étape 1

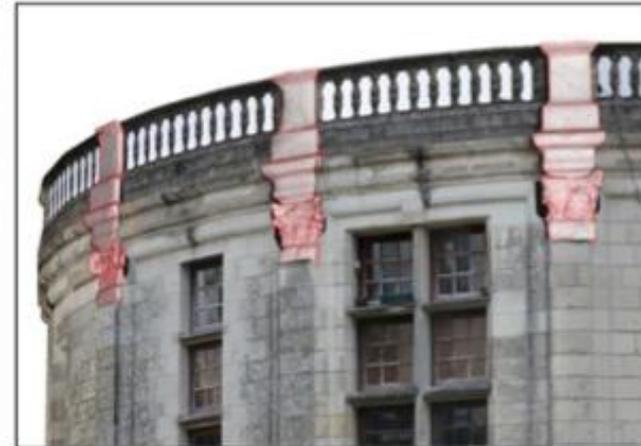
Zone d'altération



Chapiteau



Intégration au modèle 3D photomodélisé



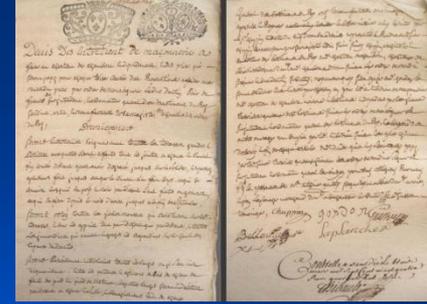
COMBINAISON DES DEUX METHODES DE MODELISATION 3D POUR AMELIORER L'ETUDE ET L'ANALYSE

SACRE : étape 2

• Sources

Données géologiques, archéologiques et historiques

- Textes anciens
- Documents techniques
- Iconographie (dessins, photographies)
- Observations *in situ*

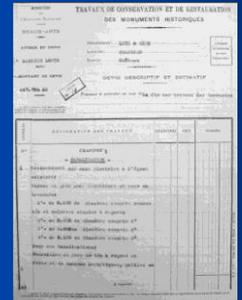


Localisation de la documentation

Archives départementales du Loiret, Orléans (fond contemporain)

DRAC Région Centre, CRMH, Orléans

Devis de restauration (2^{ème} moitié du XX^{ème} siècle)



Archives départementales du Loir-et-Cher, Blois

Fond Robert-Houdin – correspondance (1^{ère} moitié du XX^{ème} siècle)

Devis de travaux et restauration (XIX^{ème} siècle)

→ Dessins, plans et devis associés

Actes notariés (XVI^{ème} – XIX^{ème} siècle)

Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine

Devis et travaux de restauration (1^{ère} moitié du XX^{ème} siècle)

Photothèque

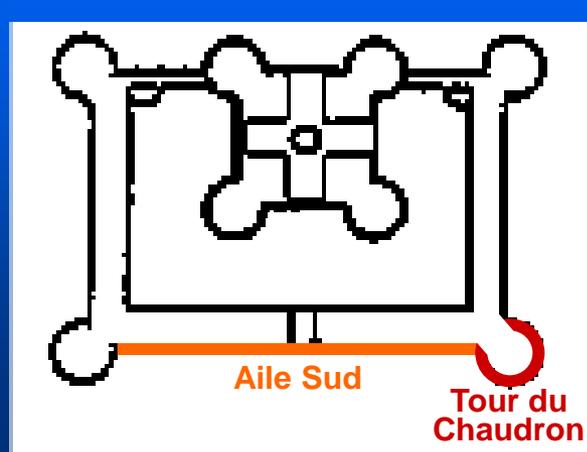
• Documents produits

- *Corpus* de références bibliographiques et iconographiques
- Chronologie des travaux effectués
- Recensement des pierres utilisées

Période de construction	Matériaux	Lieu d'extraction	Localisation dans la construction	Sources bibliographiques
Travaux sous François 1 ^{er}	Pierre de Chilly	Cheille ? , Bords de l'Indre (37)	Marches et Perrons	Mussat, 1991
	Roche de Fouchault	Bords de l'Indre (37)	Parement de murs	Jarry, 1925 ; Chatenet, 2002
	Pierre de Belleruche	Bords du Cher (37)		
	Pierre de Saint-Aignan	Bords du Cher (41)		
	Pierre de Bourré			
Travaux sous Louis XIV	Pierre d'Aprémont (Aprémont-sur-Allier)	Bord de la Loire (18),	Chapiteaux, corniches et marche d'escalier	AD 41 : minutier Chambord 35E338
	Pierre de Bourré	Bords du Cher, carrières de Vineuil (41)	Parement de murs	J. Hardouin-Mansart, sd, AN : O ¹ -13245, liasse 1, pièce n°45
	Pierre de Marnay	Bords de l'Indre (37)	Cimaises	
	Pierre de Belleruche	Bords du Cher (37)	Croisées des fenêtres (meneaux)	
	Pierre de Menars	Bords de Loire (41)	Seuil des portes	

• Documents produits

- *Corpus* de références bibliographiques et iconographiques
- Chronologie des travaux effectués
- Recensement des pierres utilisées
- Cartographies
 - Relevé des altérations
 - Relevé des signes lapidaires
 - Localisation des différentes périodes de construction et de restauration

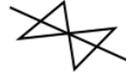


Inventaire

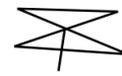
*Signes de la
première travée
de l'aile Sud*



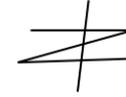
n° 1



n° 2



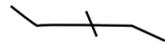
n° 3



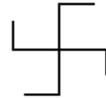
n° 4



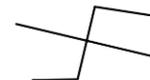
n° 5



n° 6



n° 7



n° 8



n° 9



n° 10



n° 11



n° 12



n° 13



n° 14



n° 15



n° 16



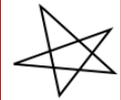
n° 17



n° 18



n° 19



n° 20



n° 21



n° 22

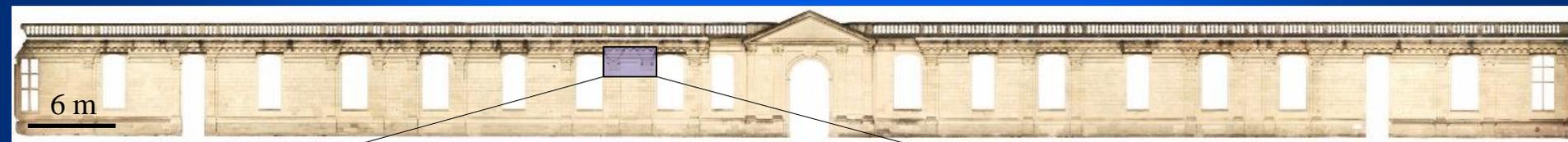


n° 23



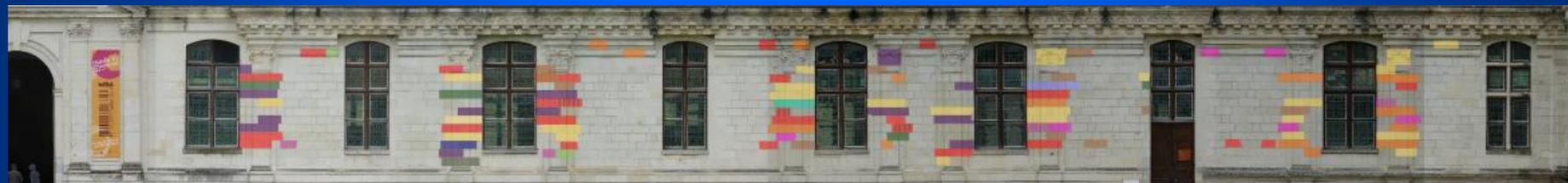
n° 24

AILE SUD



AILE SUD

Tour des Princes



Tour du Chaudron

TOUR DU CHAUDRON

Aile Sud



Communs d'Orléans

Analyse bibliographique d'archives historiques

Récolement des données

Sources écrites



Actes notariés



Devis, mémoires de travaux

Sources iconographiques



Plans et gravures



Dessins



Photographies

Observations de terrain



Datation par la localisation des signes lapidaires



Observation des faciès de pierres



Observation à la caméra thermique



Production de cartographies de datation des pierres

Analyse bibliographique d'archives historiques

 Pierres portant des signes lapidaires

 Pierres ajoutées en 1683-85

 Pierres remplacée probablement en 1856

 Pierres remplacées en 1937 lors de la démolition des mansardes

 Pierres anciennes réemployées lors des travaux de 1937

 Pierres remplacées en 1953-55

 Pierres remplacées avec certitude en 1962

 Pierres remplacée à une date incertaine – 1856 ou 1962 ?

AILE SUD

Tour des Princes

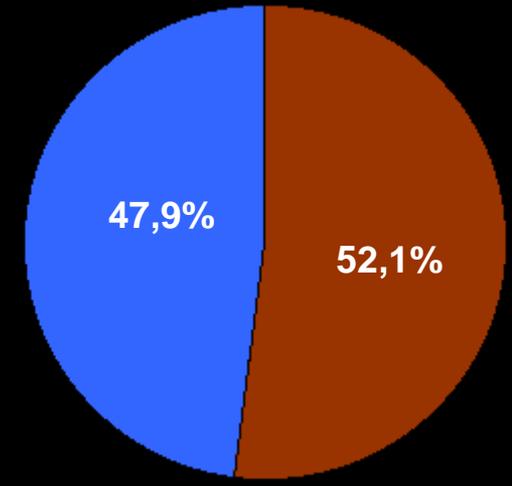
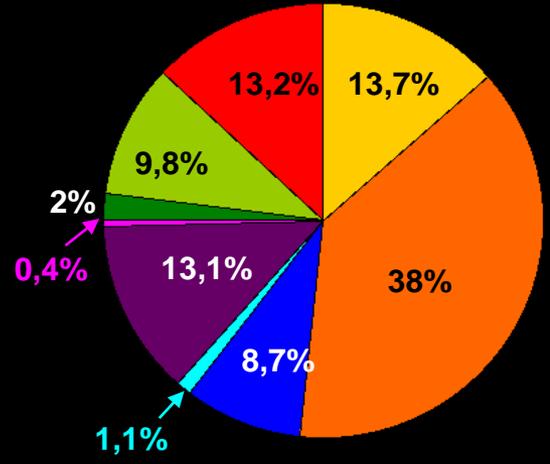


Tour du Chaudron

Analyse bibliographique d'archives historiques

Aile Sud

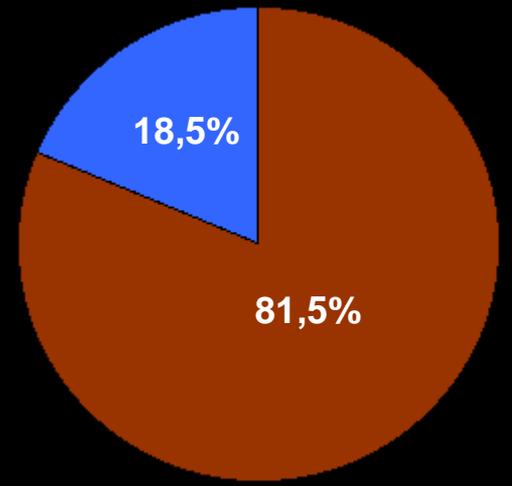
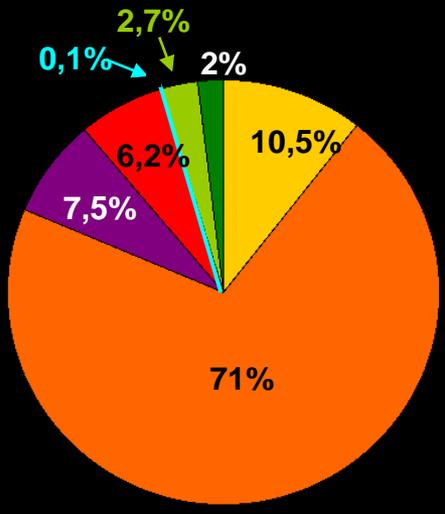
- Signes lapidaires
- Pierres supposées d'origine
- Travaux de 1683
- Travaux de 1856
- Travaux de 1937
- Travaux de 1937 - emplois
- Travaux de 1953-1955
- Travaux de 1962
- Date incertaine - 1856? 1962?



- Total de pierres d'origine
- Total de pierres remplacées

Tour du Chaudron

- Signes lapidaires
- Pierres supposées d'origine
- Travaux de 1937
- Date incertaine 1970? 1980?
- Travaux de 1985-86
- Travaux de 1994
- Travaux de 1999



Analyse bibliographique d'archives historiques

TOUR DU CHAUDRON

-  Pierres portant des signes lapidaires
-  Pierres remplacées en 1937 lors de la démolition des mansardes
-  Pierre remplacée en 1985-86
-  Pierres remplacées en 1994
-  Pierres remplacées à partir de 1999
-  Pierres remplacées à une date incertaine – 1970 ? 1980 ?

Aile Sud



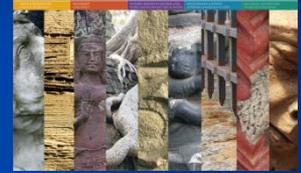
Communs d'Orléans

Relevé et état des lieux d'altérations : cartographie

Formes d'altération

- Les altérations chromatiques et dépôts
- Les fissures et déformations
- Les figures induites par perte de matière
- Les colonisations biologiques
- Les détachements

ICOMOS



Conseil International des
Monuments et des Sites

Relevé et état des lieux d'altérations : cartographie

Formes d'altération

- Les altérations chromatiques et dépôts
- **Les fissures et déformations**
 - Fissures
- Les figures induites par perte de matière
- Les colonisations biologiques
- Les détachements

ICOMOS



Conseil International des
Monuments et des Sites



Relevé et état des lieux d'altérations : cartographie

Formes d'altération

- Les altérations chromatiques et dépôts
- Les fissures et déformations
 - Fissures
- Les figures induites par perte de matière
 - Impacts et graffiti
 - Cassures
- Les colonisations biologiques
- Les détachements



ICOMOS



Conseil International des
Monuments et des Sites

Relevé et état des lieux d'altérations : cartographie

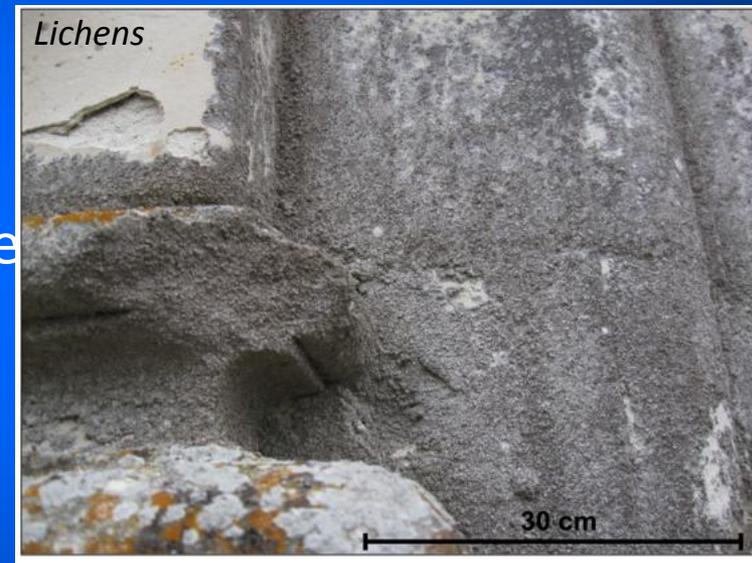
Formes d'altération

- Les altérations chromatiques et dépôts
- Les fissures et déformations
 - Fissures
- Les figures induites par perte de matière
 - Impacts et graffiti
 - Cassures
- Les colonisations biologiques
 - Lichens
 - Mousses
- Les détachements

ICOMOS



Conseil International des
Monuments et des Sites



Relevé et état des lieux d'altérations : cartographie

Formes d'altération

- Les altérations chromatiques et dépôts

- Les fissures et déformations

- Fissures

- Les figures induites par pollution atmosphérique

- Impacts et graffiti
- Cassures

- Les colonisations biologiques

- Lichens
- Mousses

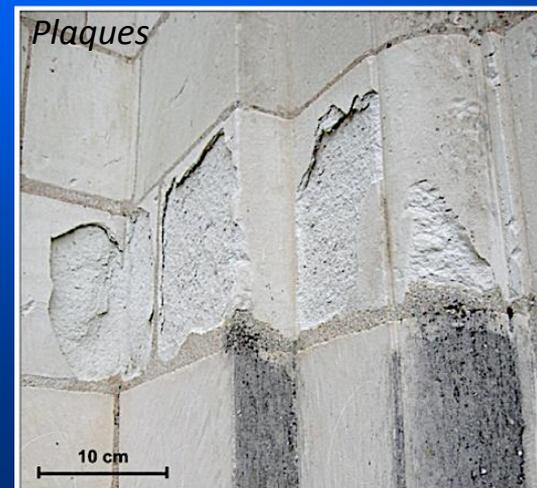
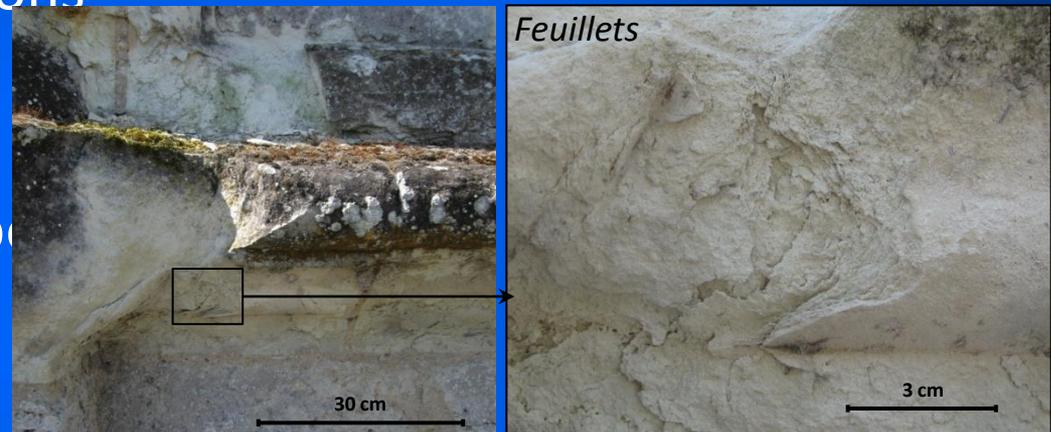
- Les détachements

- Desquamations en feuillets
- Desquamations en plaques

ICOMOS



Conseil International des
Monuments et des Sites



Relevé et état des lieux d'altérations : cartographie

-  Lichens
-  Mousses
-  Parties manquantes, cassures
-  Altérations en feuillets
-  Altérations en plaques



Aile Sud



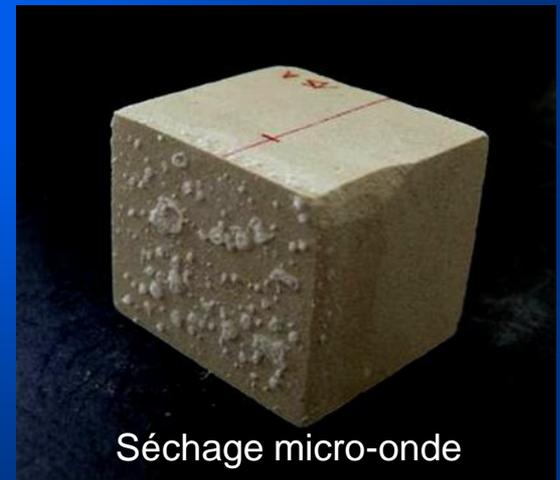
Communs d'Orléans

SACRE : étape 3

Vieillissement naturel in-situ VS Vieillissement artificiel en labo

Exemple d'imbibition partielle d'une solution de NaCl à saturation (cycle 5)

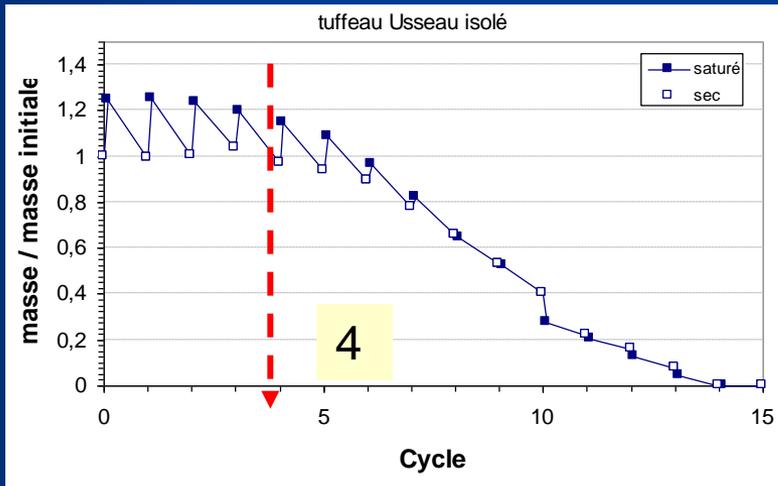
→ Figures d'altération différentes selon le type de séchage



D'autres agents d'altération

Les sels : cas du Na_2SO_4

Na_2SO_4
14%



Protocole d'altération:
cycles : imbibition avec de l'eau salée
↔ séchage à 105°C

(Norme EN12370)



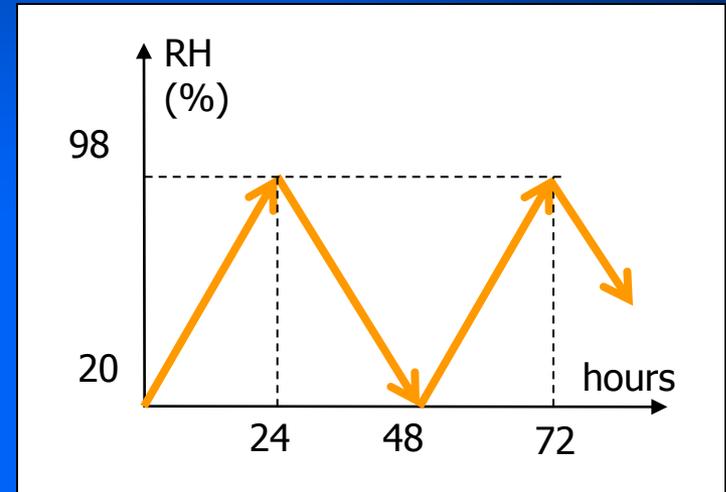
La dégradation
de la pierre est
très rapide

Cas du tuffeau

Protocole d'altération: imbibition avec de l'eau salée → cycles RH 20%- 98%, T 20°C

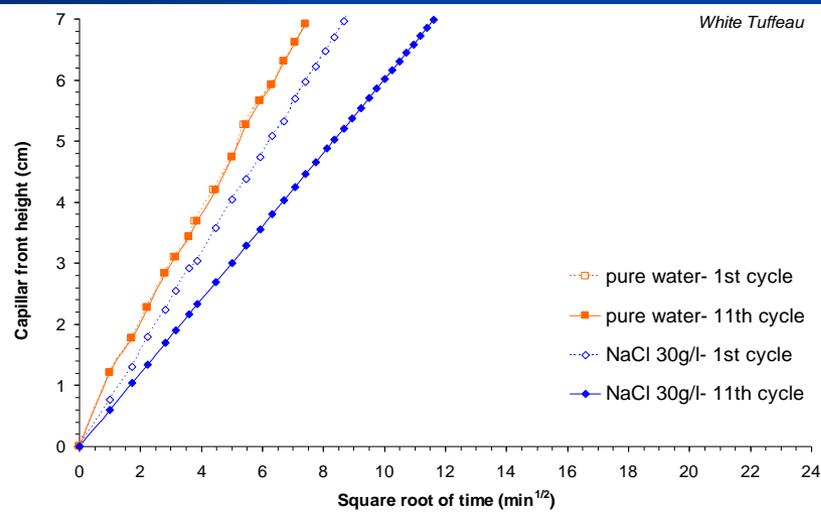


Cas du tuffeau

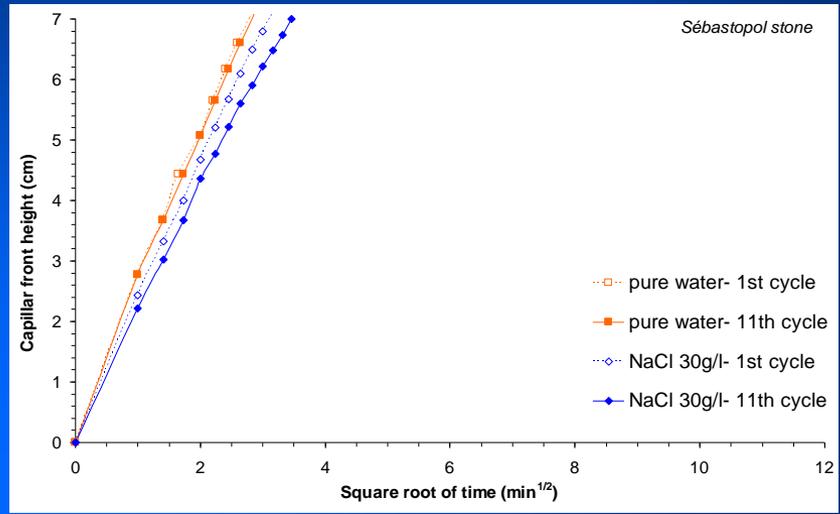


Forte altération en surface provoquée par des simples variations d'humidité dans une pierre légèrement polluée par du sel

Tuffeau blanc



Pierre de Sébastopol

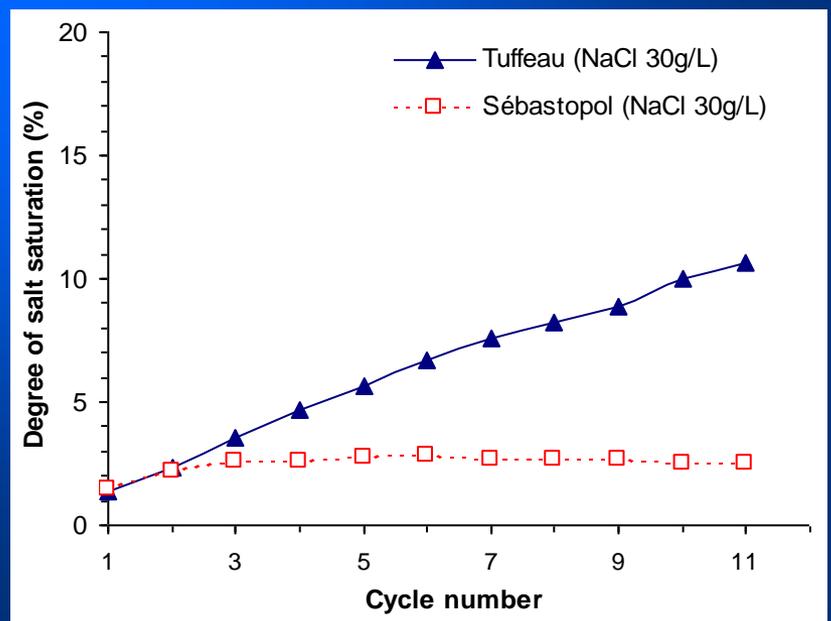


tuffeau



Sébastopol

Sel déposé à la surface de la face cyclée à la fin du 1er cycle

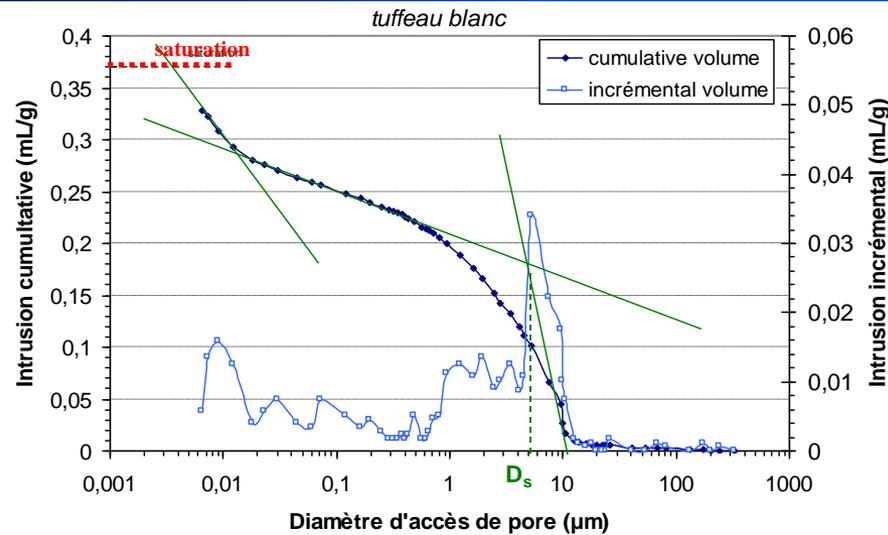


Tuffeau blanc

Porosité totale = 48,6 %

$S_{\text{BET}} = 18 \text{ m}^2/\text{g}$

Porosité Hg = 42,8 %

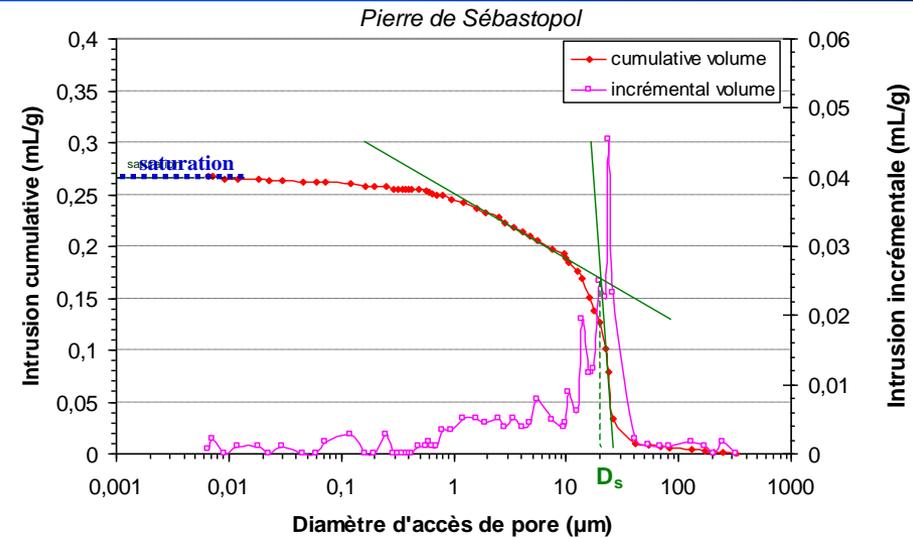


Pierre de Sébastopol

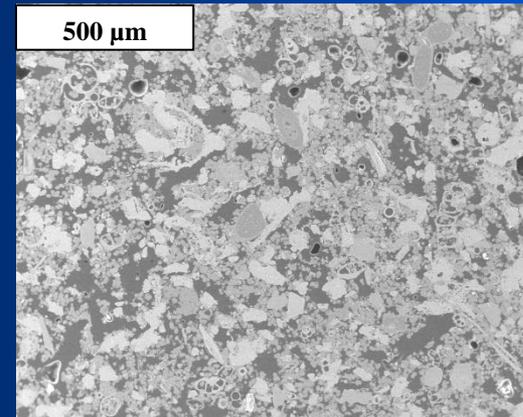
Porosité totale = 41,9 %

$S_{\text{BET}} = 0,8 \text{ m}^2/\text{g}$

Porosité Hg = 42,2 %

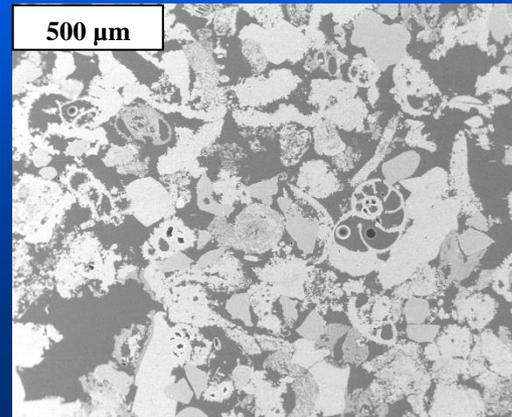


500 μm



Diamètre seuil
de percolation :
 $D_s = 5 \mu\text{m}$

500 μm



Diamètre seuil
de percolation :
 $D_s = 20 \mu\text{m}$

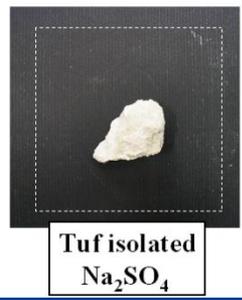
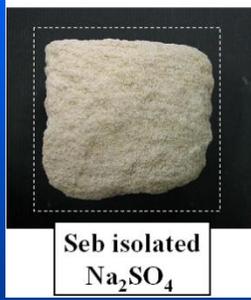
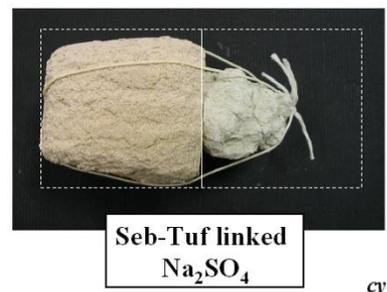
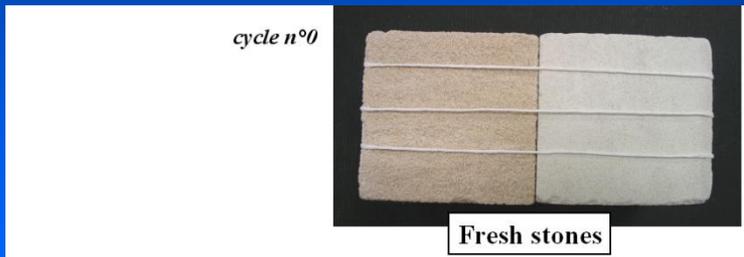
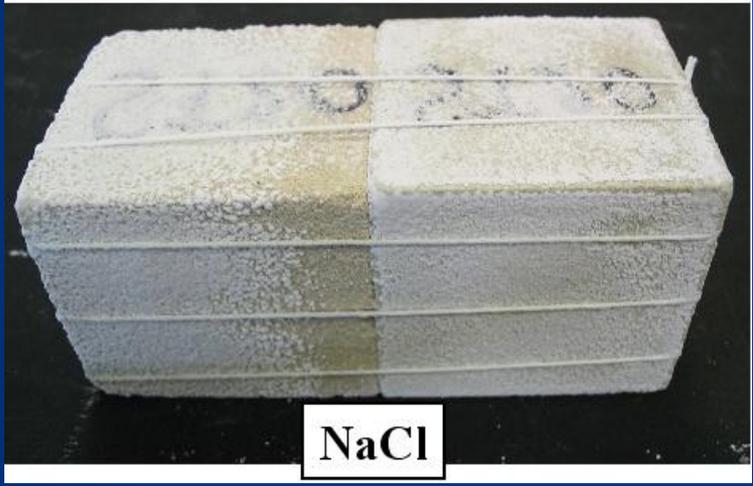
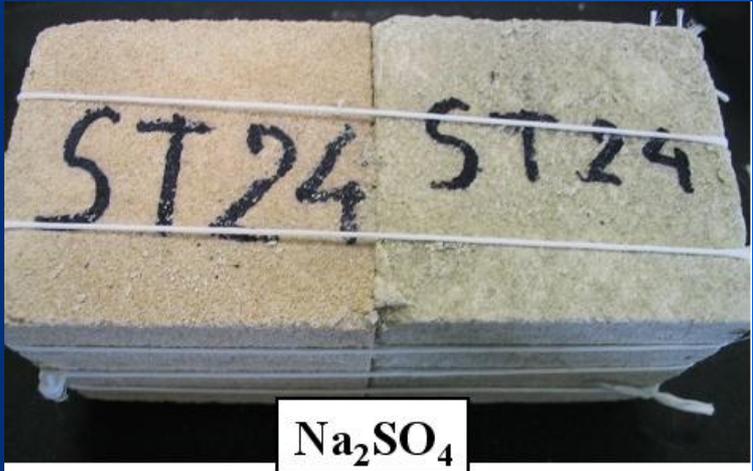
D'autres agents d'altération

Les sels : cas du NaCl

NaCl
Na₂SO₄

Pierre
de Sébastopol

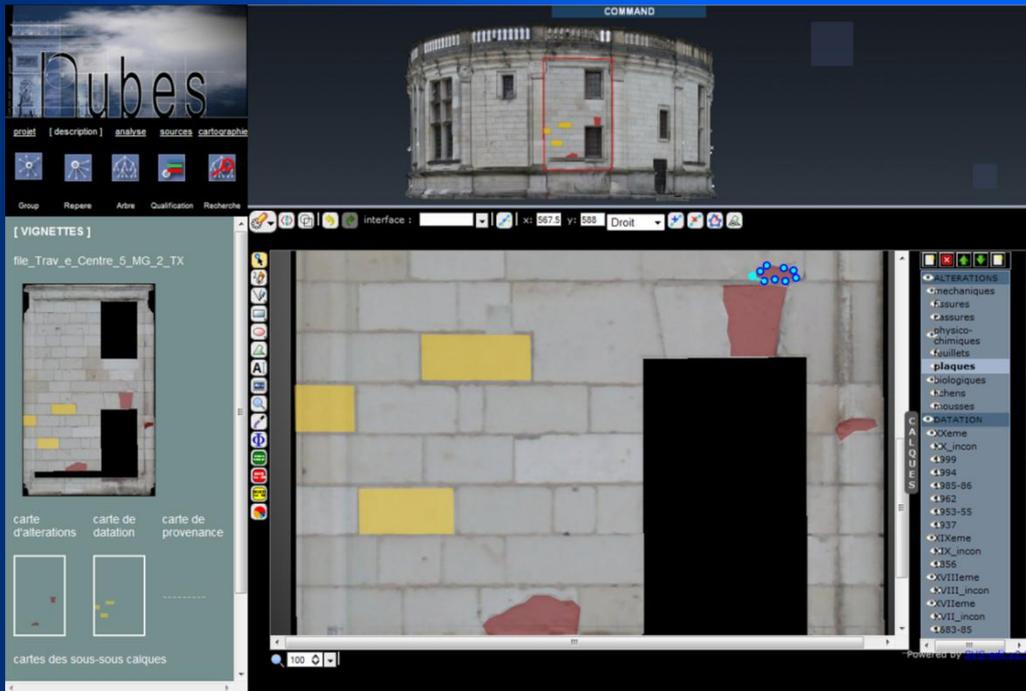
Tuffeau blanc



SACRE : étape 4

Le carnet de Santé numérique

Adaptation et utilisation de la plateforme NUBES : système d'information à l'échelle de l'architecture pour la description, l'analyse, la documentation et le partage des représentations numériques du patrimoine culturel



Améliorations méthodologiques

- Possibilité de stockage de données hétérogènes
- Utilisation d'un modèle 3D
- Automatisation du traitement des données
- Diffusion des données et travail collaboratif

→ **En cours** : implémentation des données graphiques et documentaires

SACRE : étape 5

Reportages télévisés

Posters et expositions au château de Chambord



**Le château de Chambord :
un chantier de restauration permanent !**