

# **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

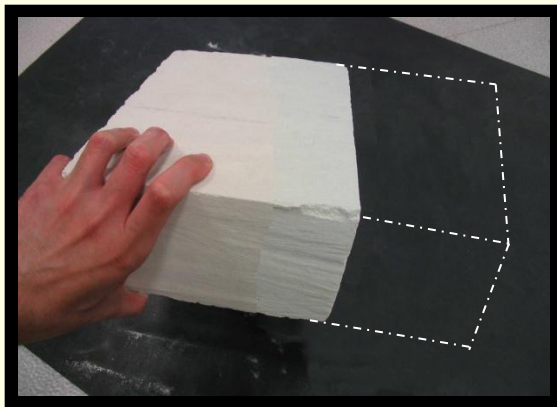
- Vieillessement des pierres, mécanismes d'altération, facteurs aggravants
- Techniques et produits de nettoyage, de restauration et de conservation
- Ouverture sur les travaux de recherche actuel :
  - développement durable : mortier de restauration conçu à partir de déchets
  - surveillance des ouvrages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

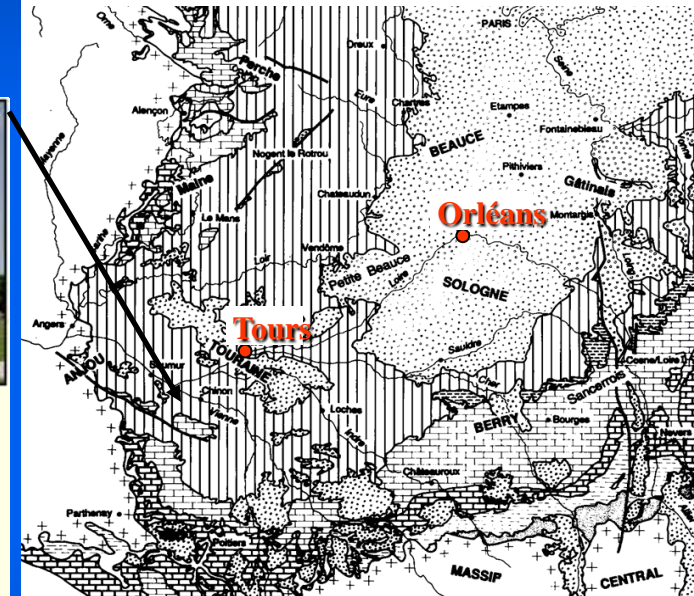
**Couleur : blanc**


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

**Utilisation : Touraine, Val de Loire**

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

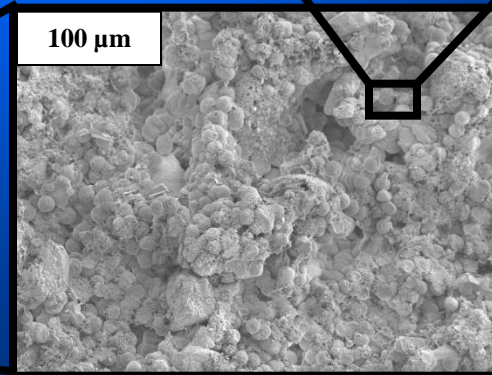
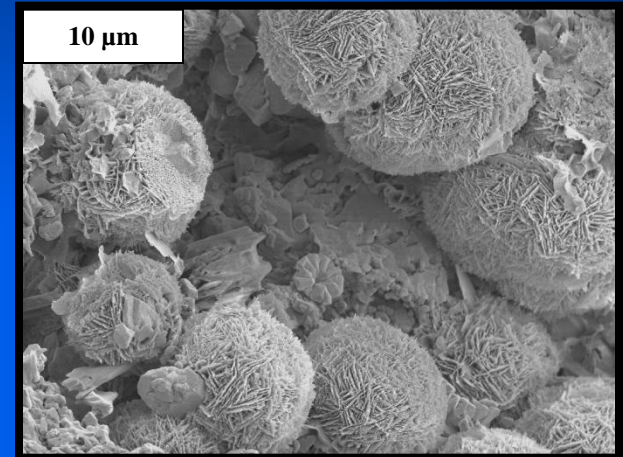
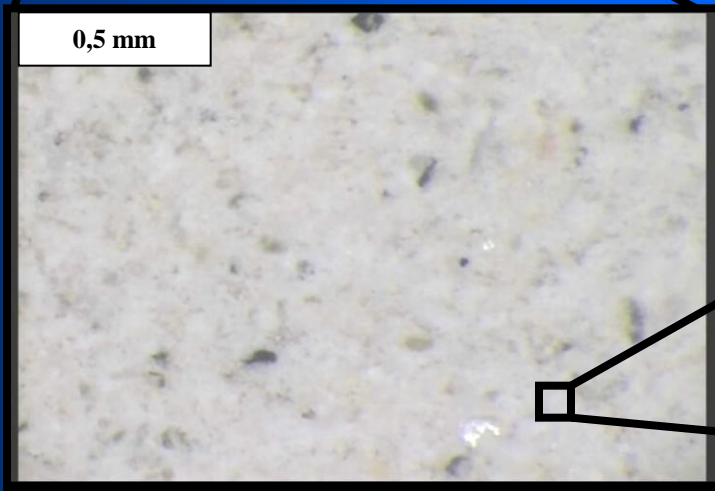
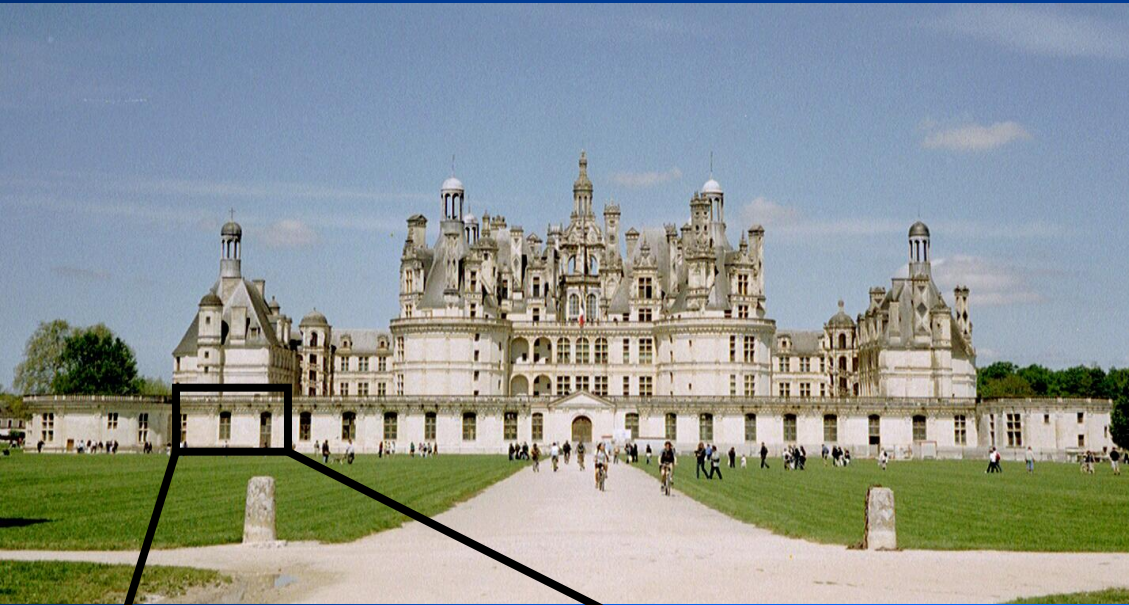
### Zone du Bassin Parisien



-  **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 ...*



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



**Conservation & Restauration  
du patrimoine bâti**



**Château de Chambord**

*Altération des pierres*



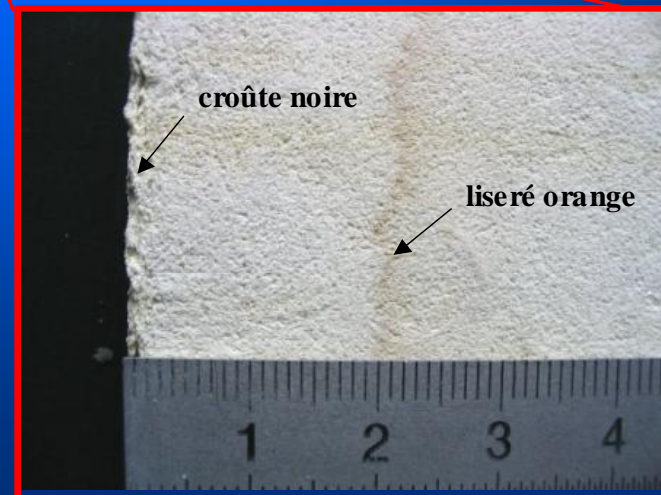
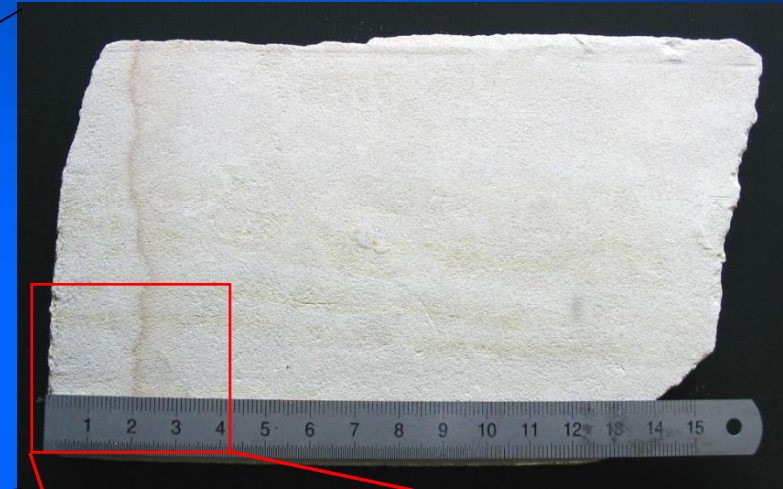
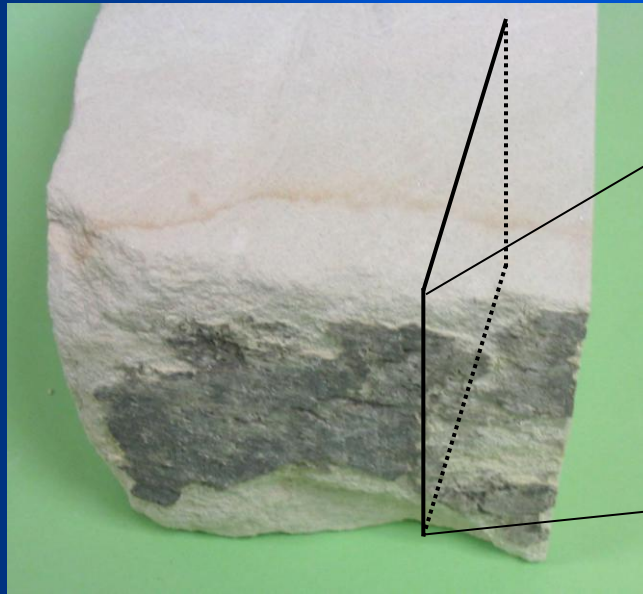
**Château de Blois**

# **L'altération naturelle sur sites**

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

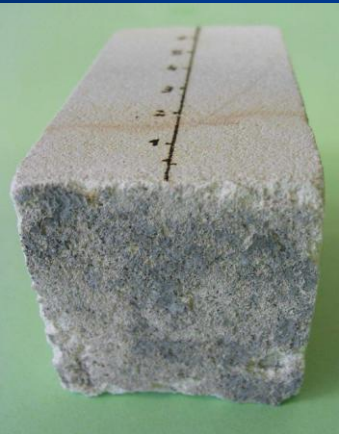
➔ *Partie n°1 : L'altération naturelle (sur monuments)*

Observation et étude de cas de pierres altérées in-situ



Tuffeau altéré prélevé in-situ

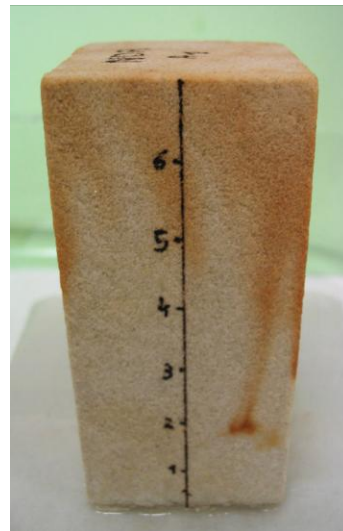
## *Propriétés d'imbibition*



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

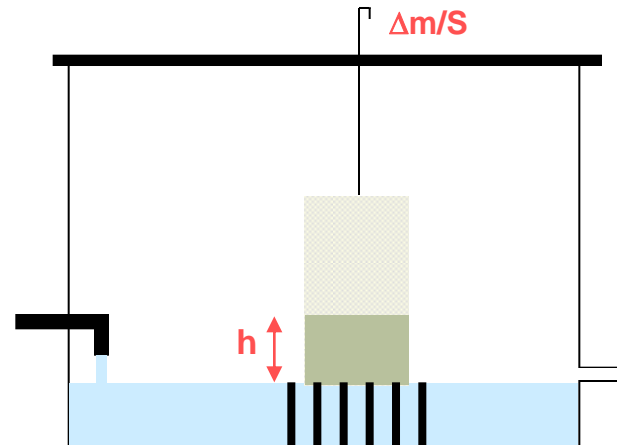
$$\frac{dm}{S} = A\sqrt{t}$$

Equations de Washburn



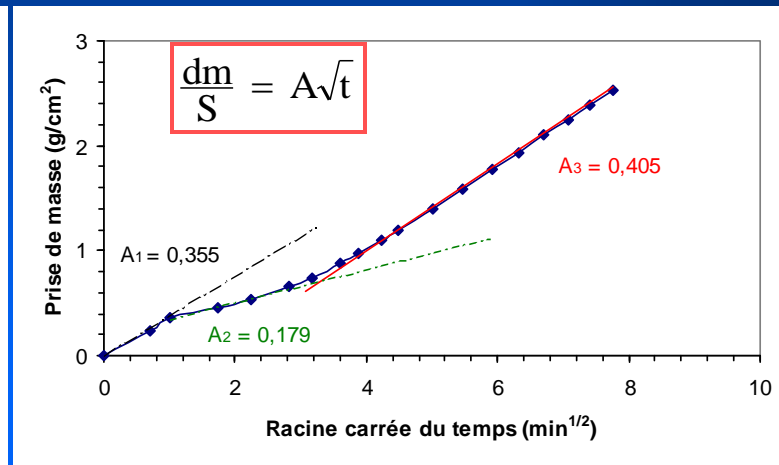
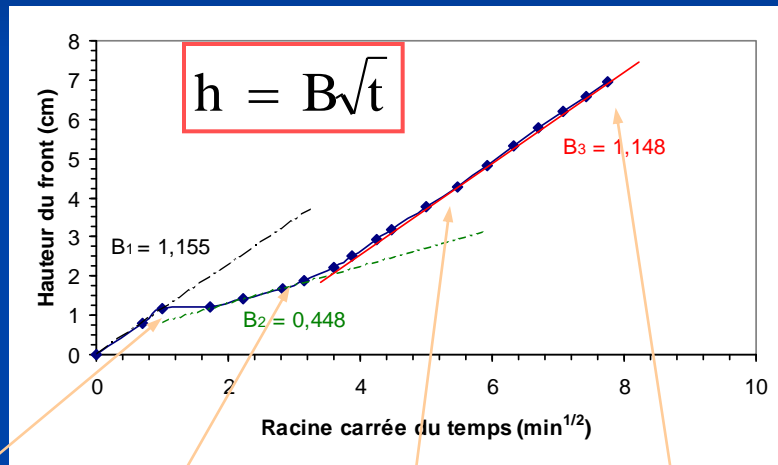
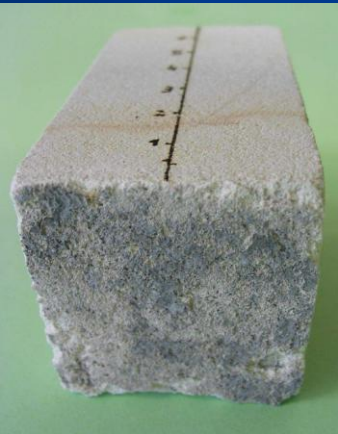
**t = 60 min**

Tests d'imbibition

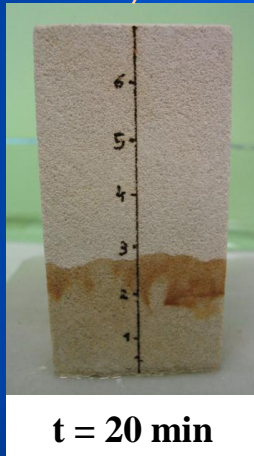




## Propriétés d'imbibition



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

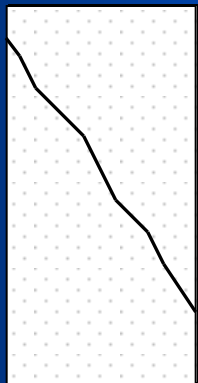
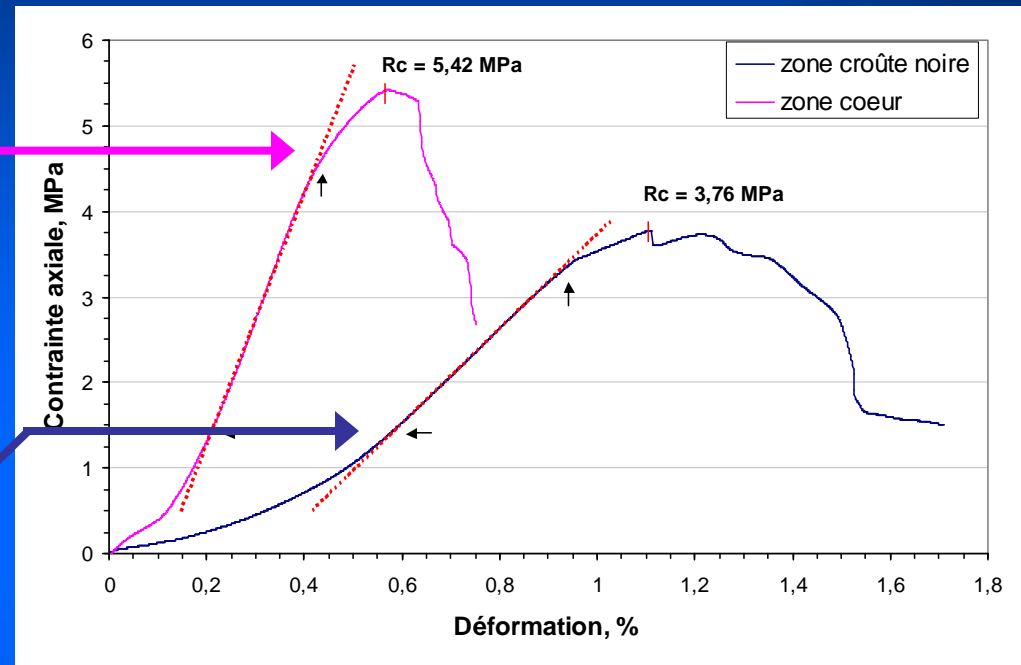
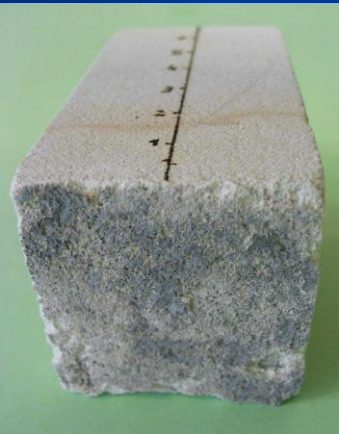


**Rôle de  
marqueur**

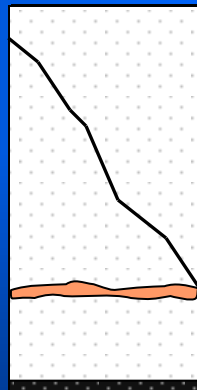
# L'altération : étude de cas

## Approche macroscopique :

### Résistance mécanique



Zone de cœur

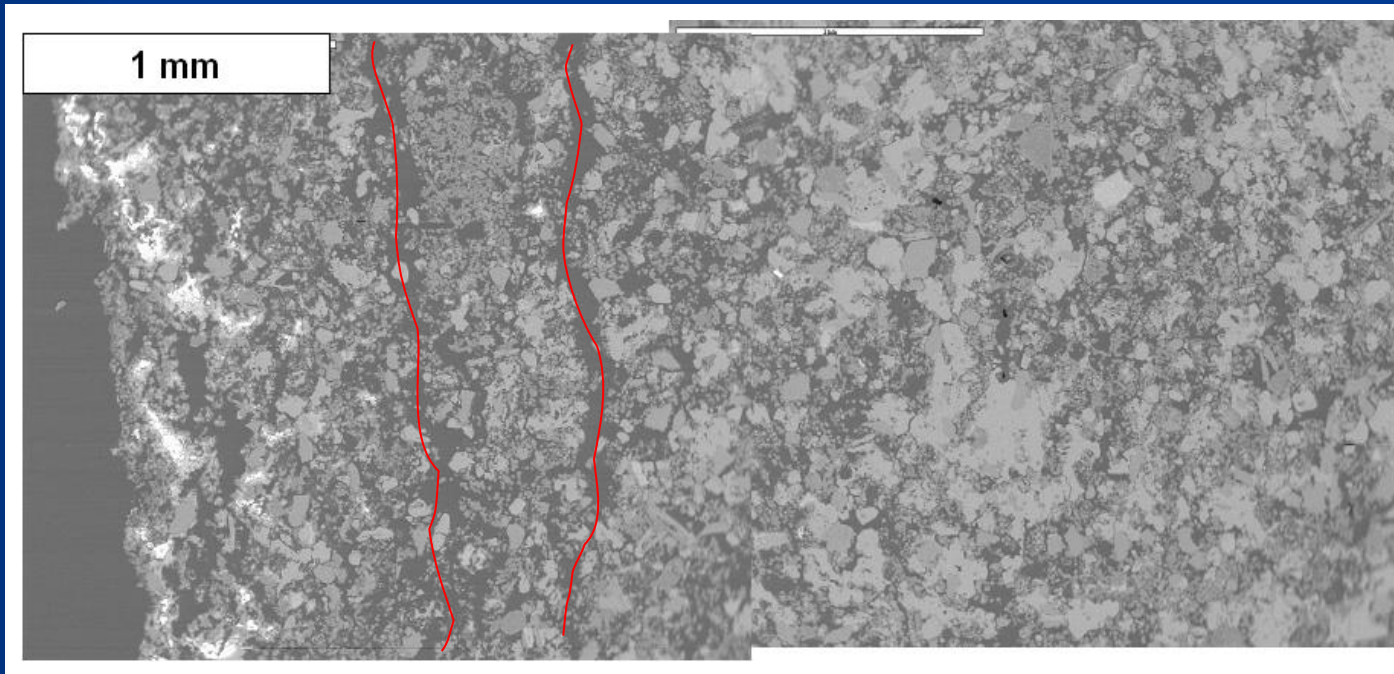


Zone de surface

état sec



La zone de surface est fragilisée



**Œil nu**



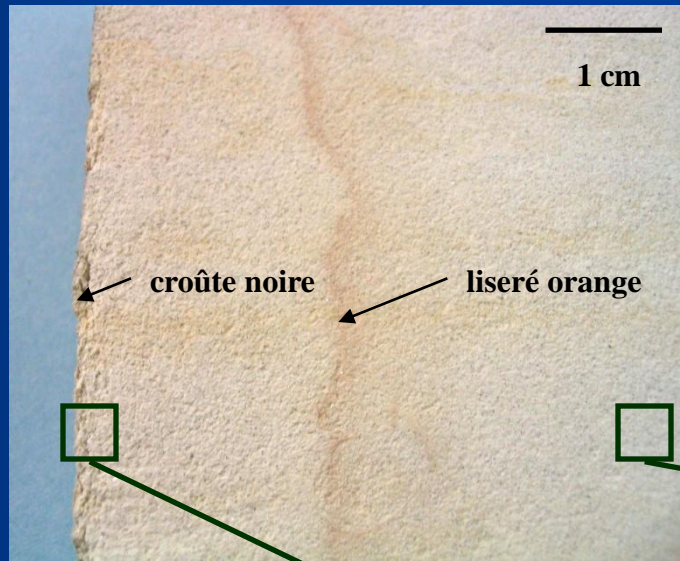
**Microscopie  
Optique**



**M E B**



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

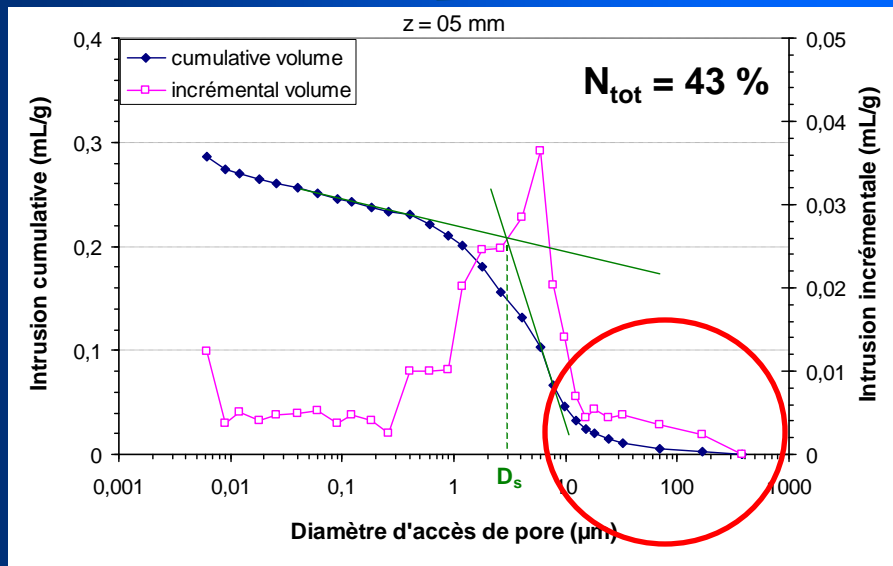


Œil nu

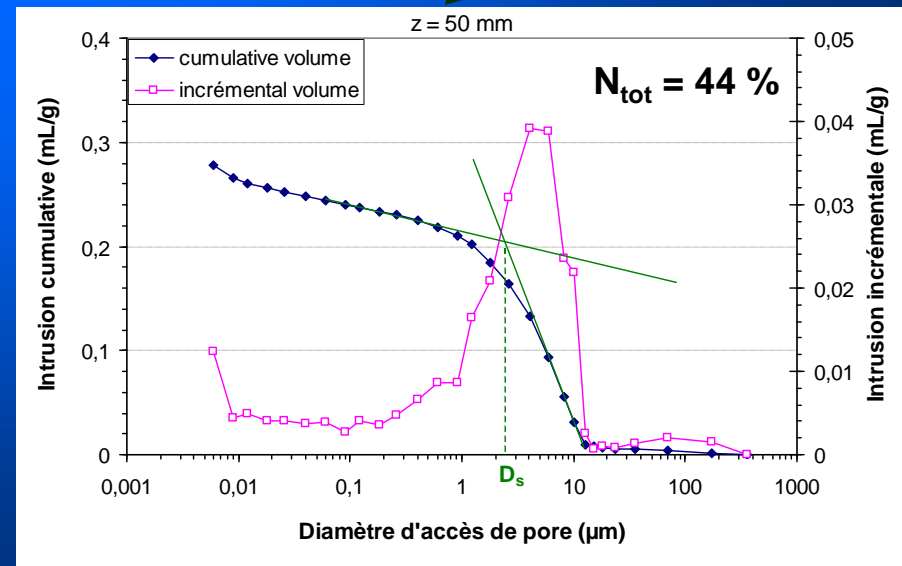
Microscopie  
Optique

Porosimétrie  
mercure

M E B



Zone de surface (z = 05 mm)



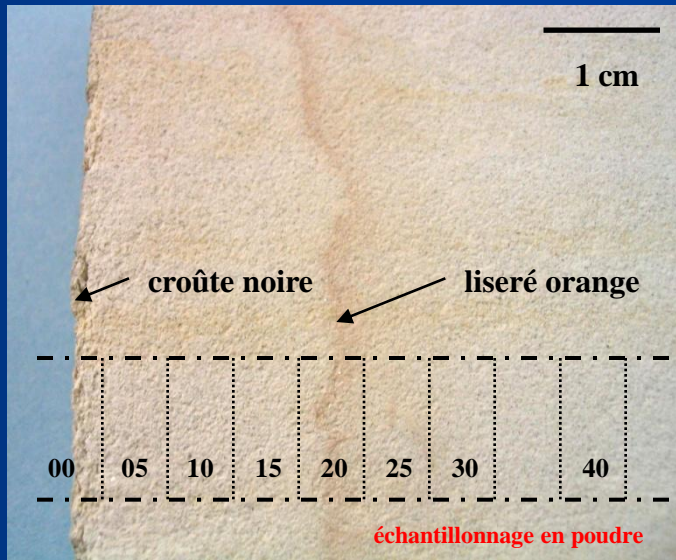
Zone de cœur (z = 50 mm)

# L'altération : étude de cas

## Approche microscopique :

## Minéralogie

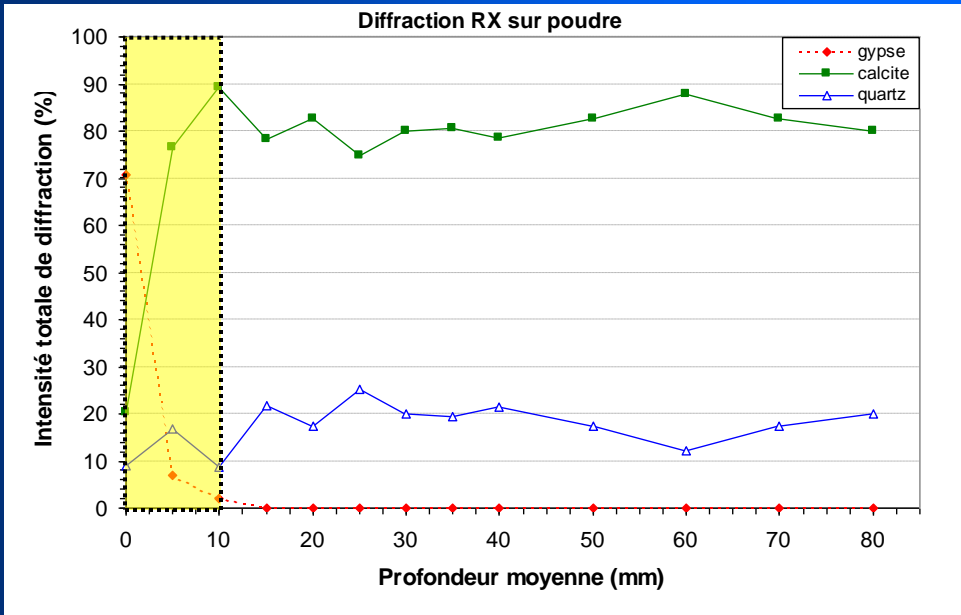
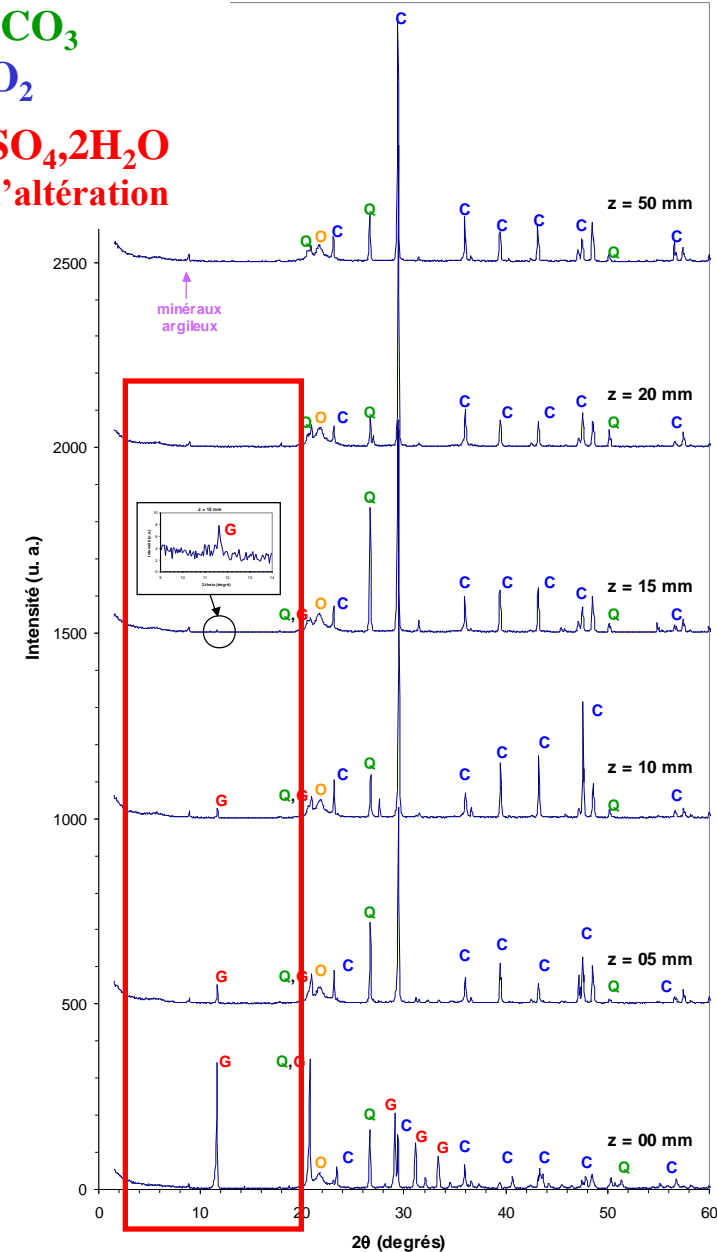
### DRX sur poudre



Calcite :  $\text{CaCO}_3$

Quartz :  $\text{SiO}_2$

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



## Minéralogie

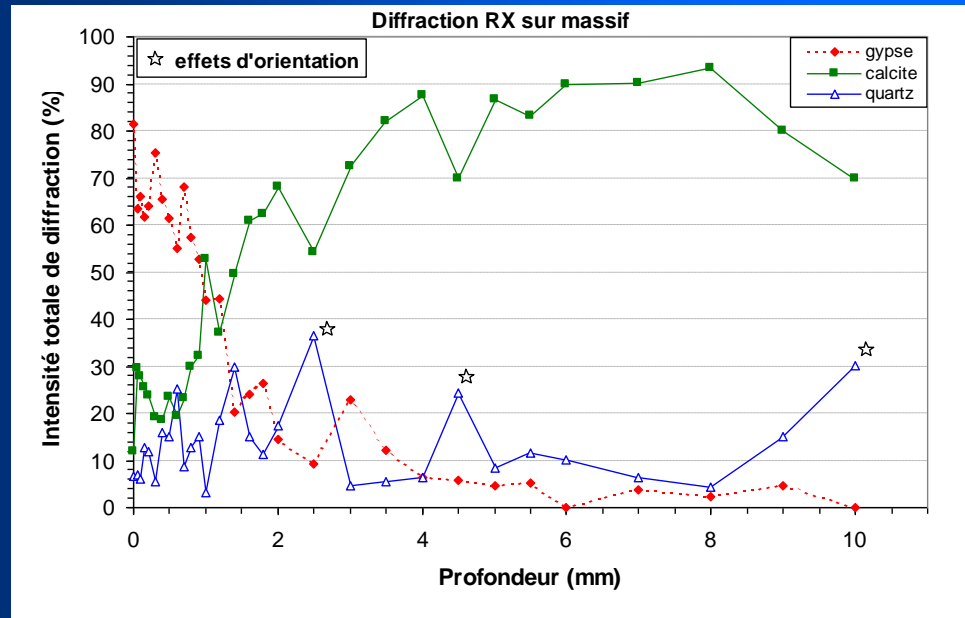
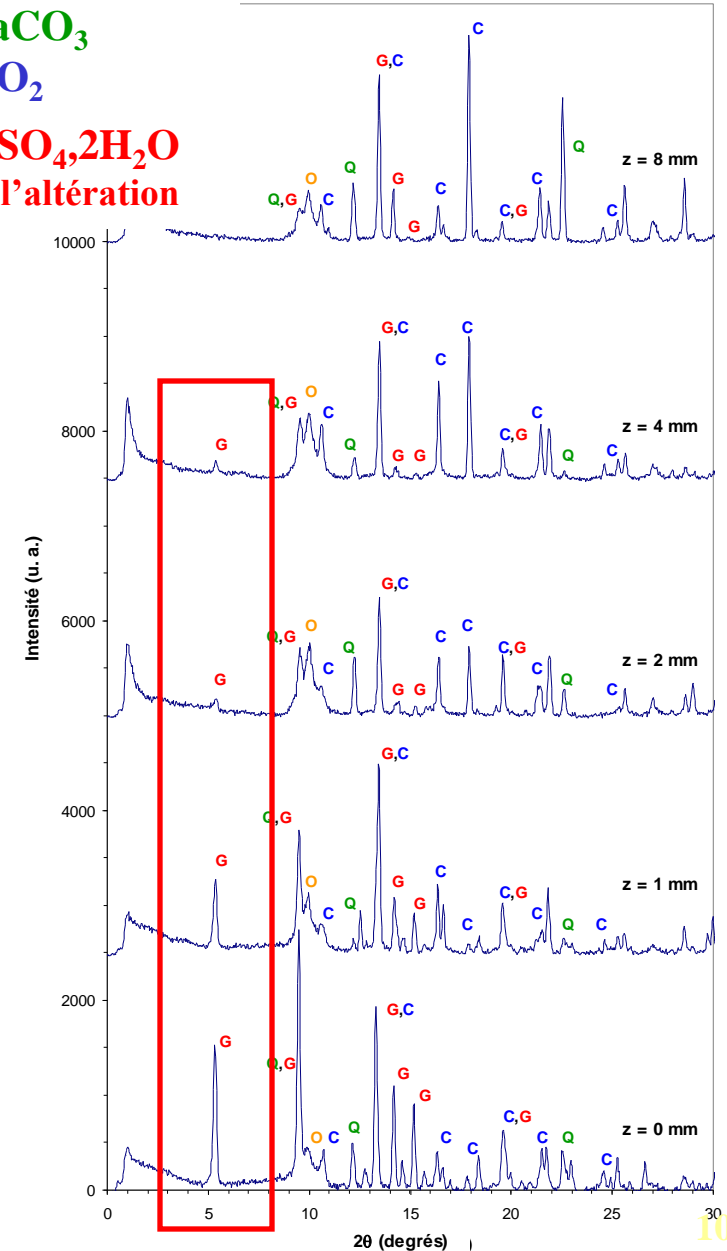
### DRX sur massif



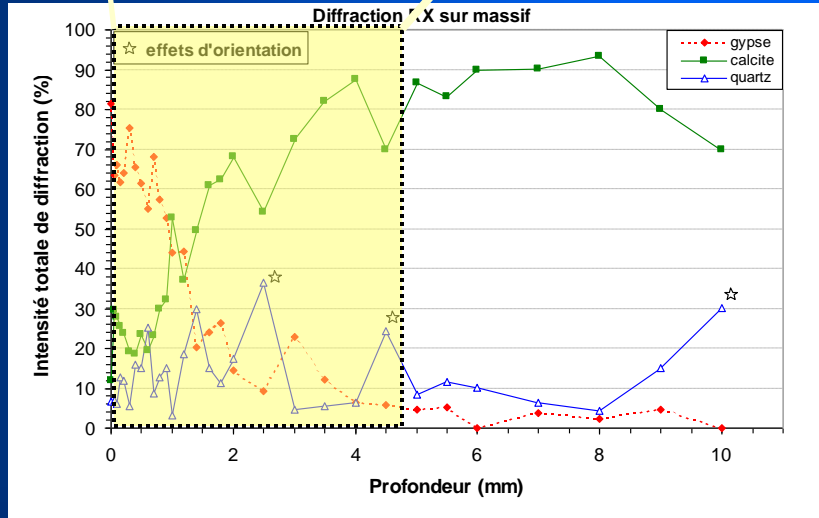
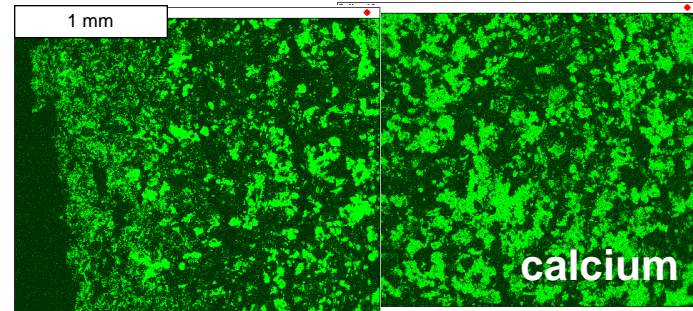
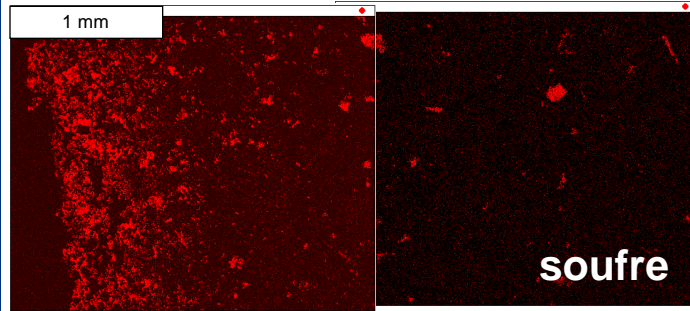
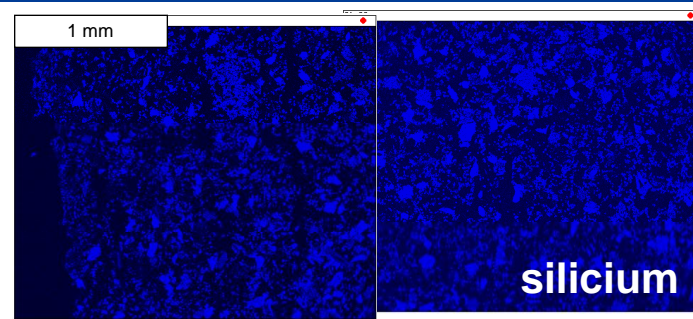
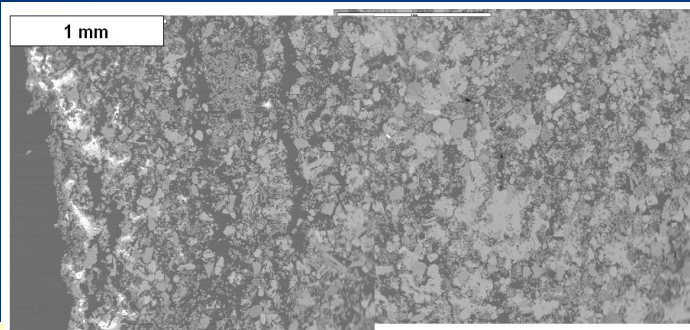
Calcite :  $\text{CaCO}_3$

Quartz :  $\text{SiO}_2$

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 :  $\text{CaCO}_3$**

**Quartz :  $\text{SiO}_2$**

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

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

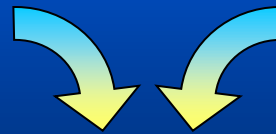
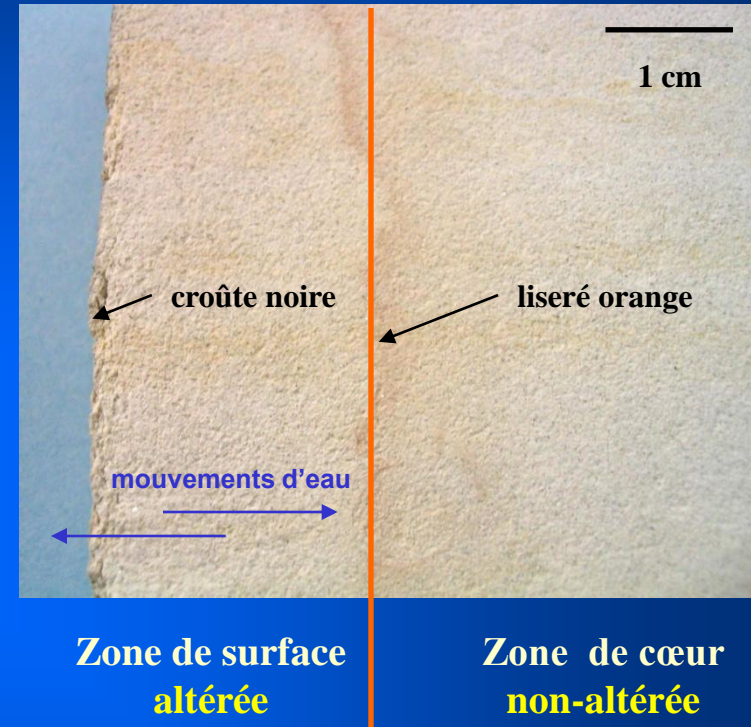
1. Modifications minéralogiques et texturales dans la zone proche de la surface exposée à l'environnement extérieur
2. 20 mm de profondeur : limite de présence de gypse, produit de l'altération

"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*

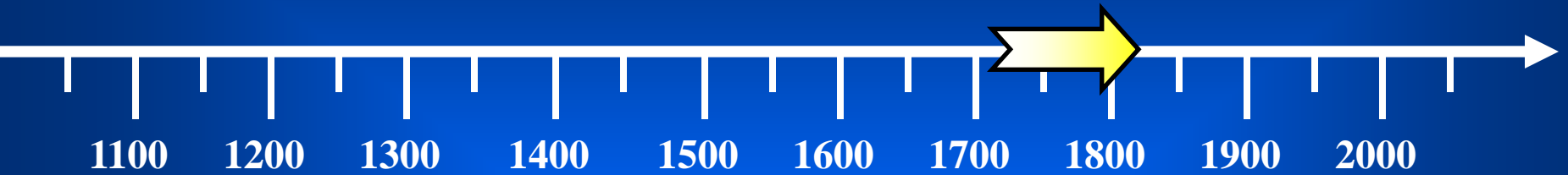


Humidité de l'air  
Pluie directe  
Remontée capillaire



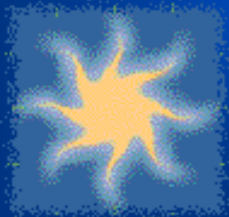
Maison à Nantes

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

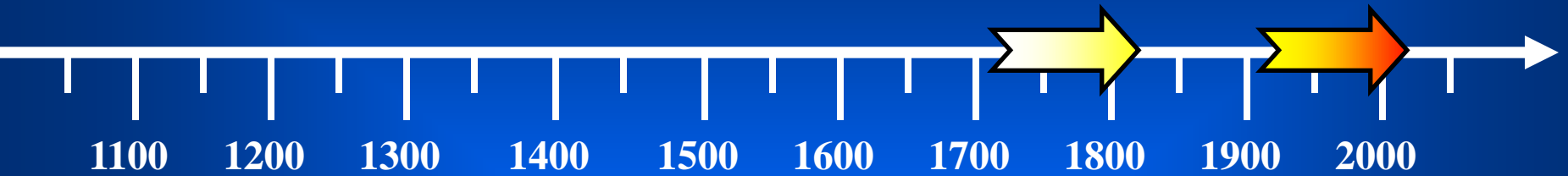


Avant l'ère industrielle:

## 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

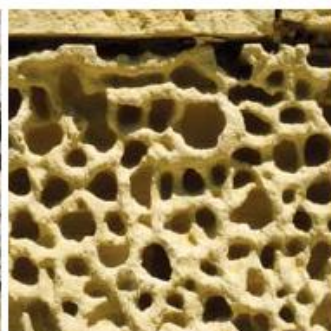
**Chipping** . Epaufure

**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

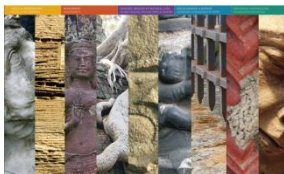
**LICHEN** . LICHEN

**MOSS** . MOUSSE

**MOULD** . MOISSISSURE

**PLANT** . PLANTE

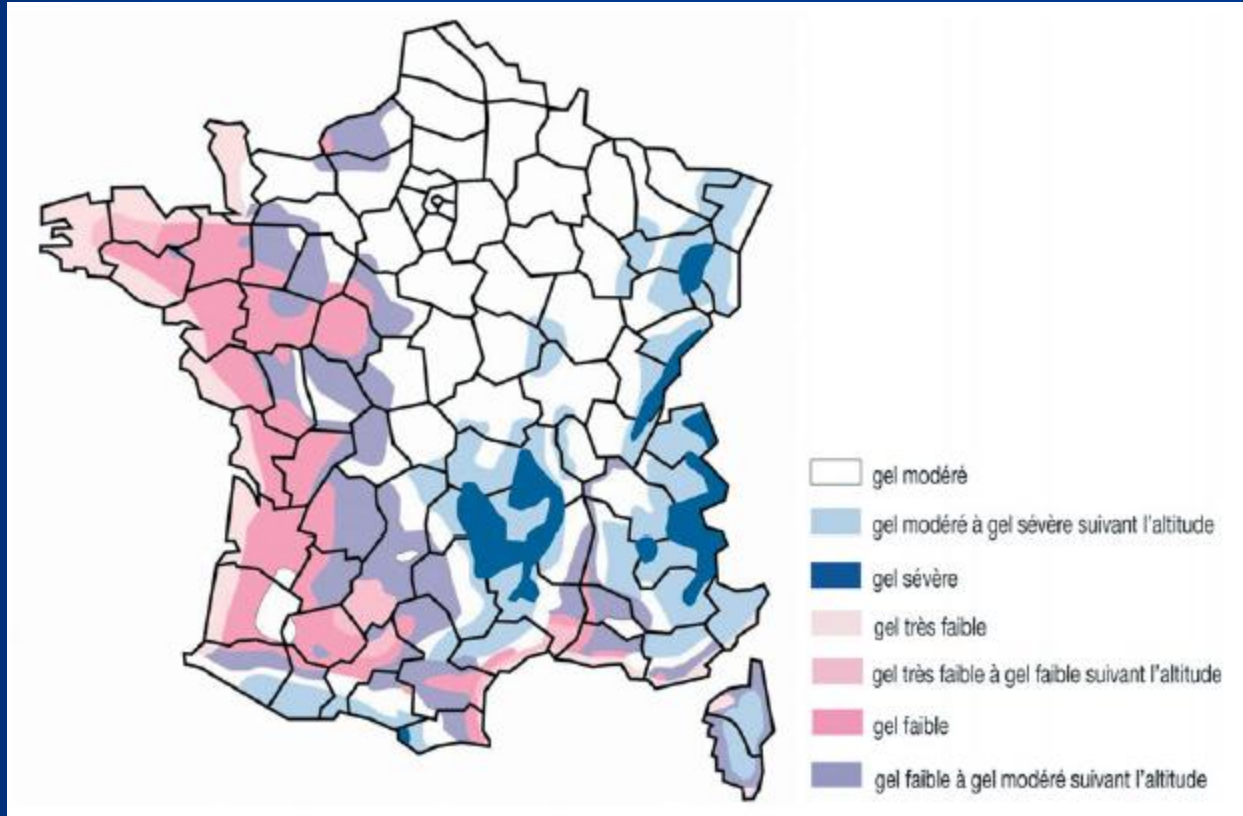
ICOMOS



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)

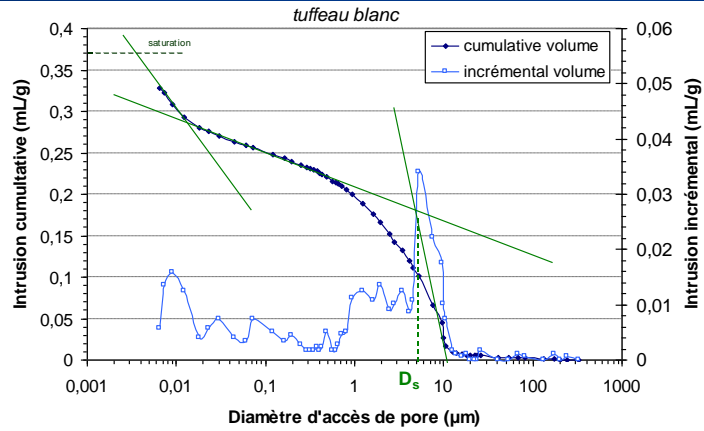
### *Pierre de Sébastopol*

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

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

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

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



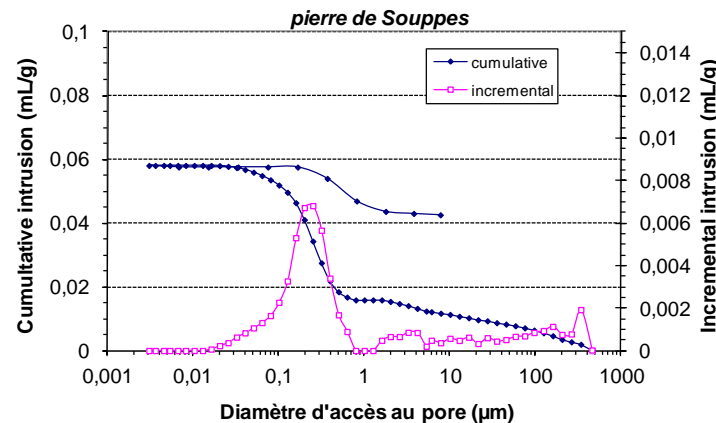
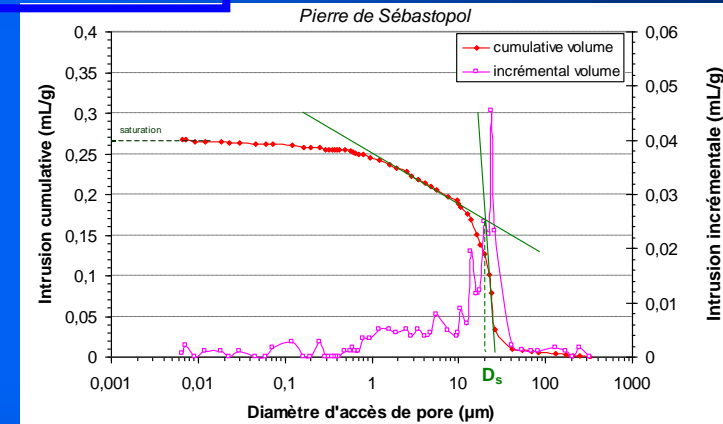
### *Tuffeau blanc*

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

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

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

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



### *Pierre de Souppes*

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

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

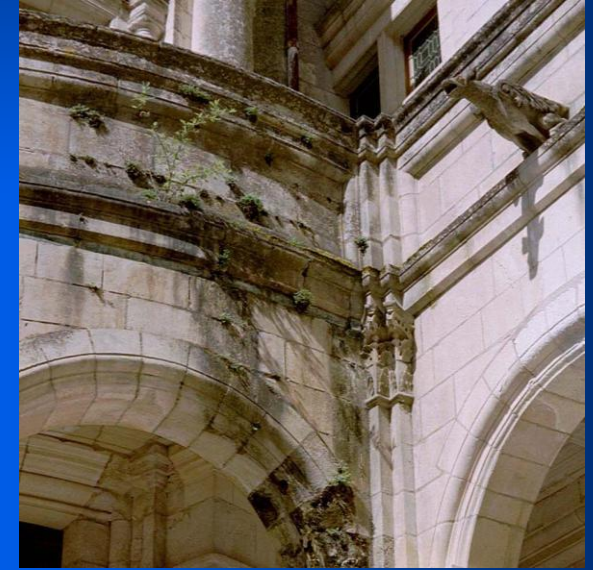
$$\rho_s = 2,65 \text{ g.cm}^{-3}$$

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

# 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 !

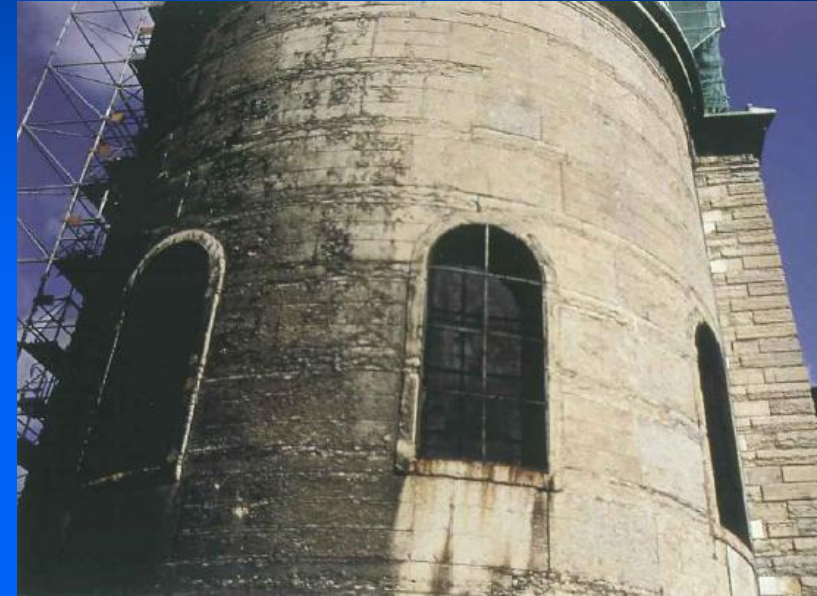
C'est une altération mais pas une dégradation à  
proprement dite, bien qu'elle soit souvent  
initiatrice des futures dégradations ...

# 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

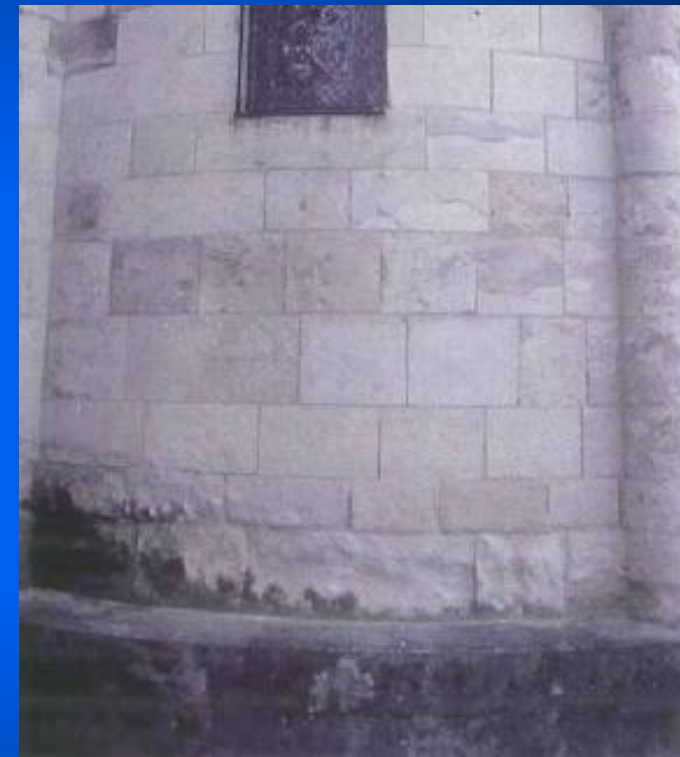
## Les désagrégations sableuses (The granular disintegrations)

### 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



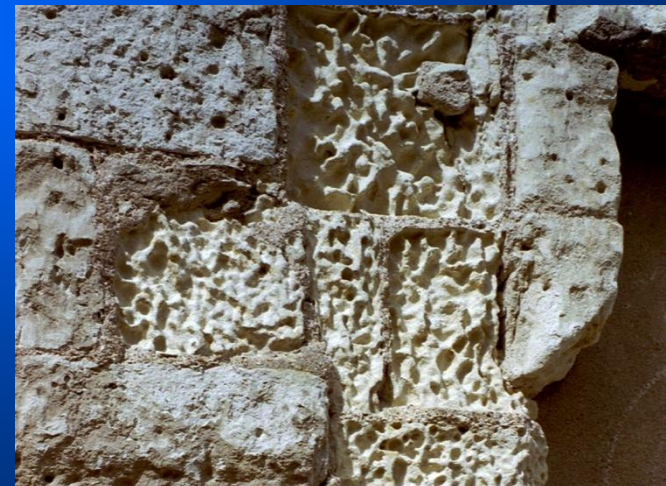
Château des Ducs de Bretagne  
Nantes

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

## Les alvéolisations (The alveolizations)



Château des Ducs de Bretagne  
Nantes



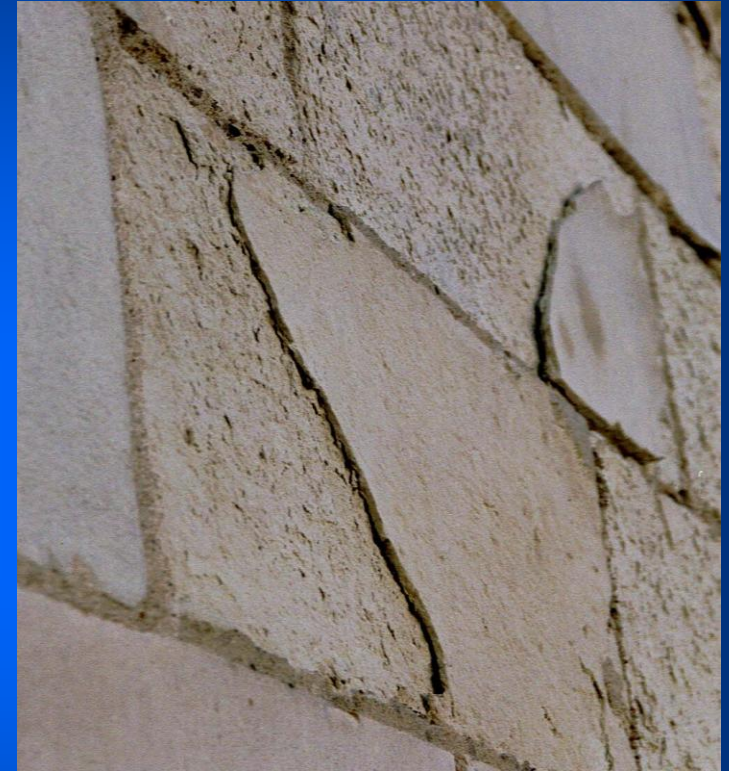
Maison à Nantes

# Les différents types d'altérations

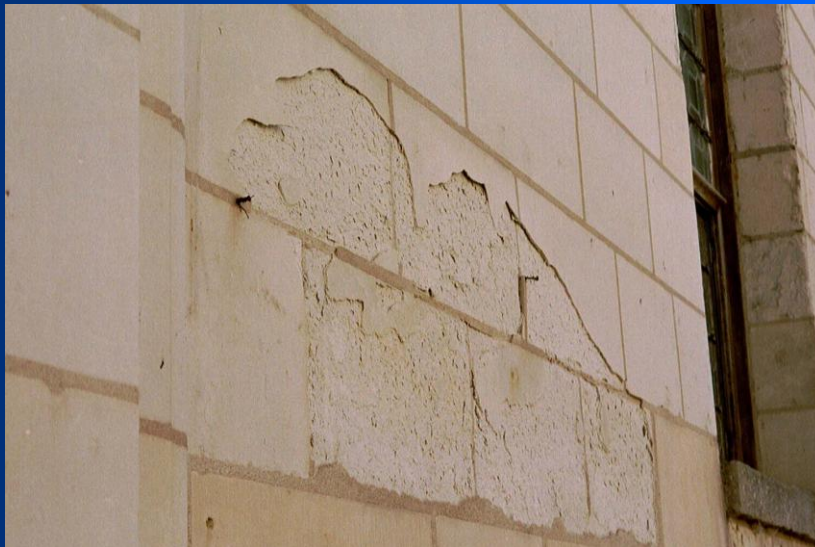
## Les desquamations en plaques (The coutour scaling)



Château de Blois



Château de Chaumont



Château de Chambord

*zones lessivées*

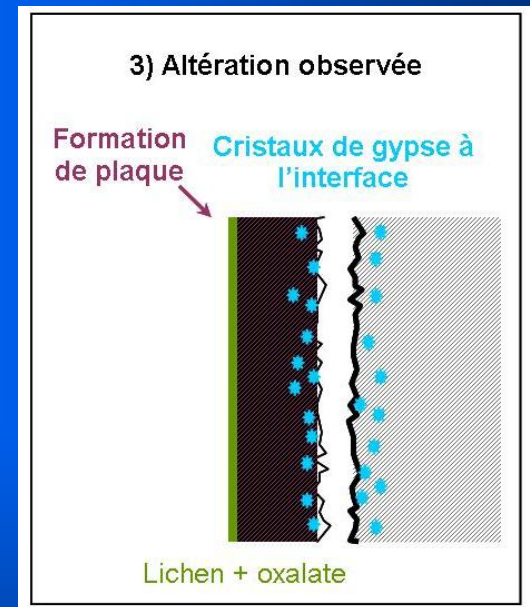
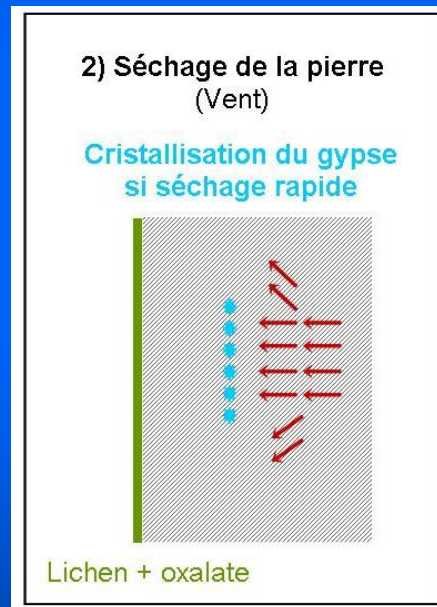
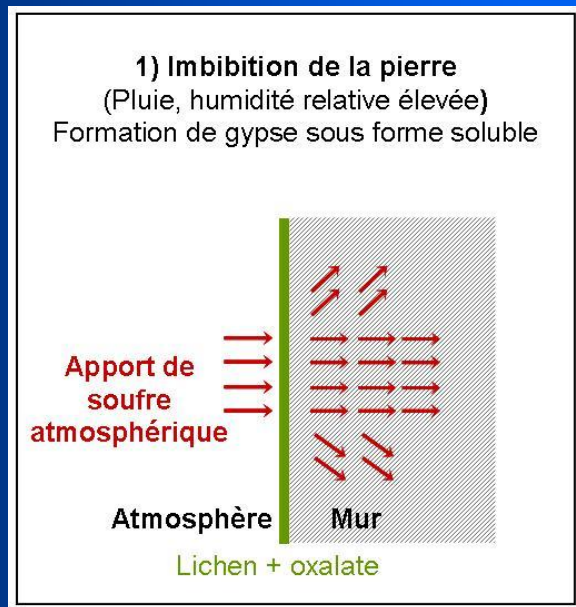
*avec*

*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 !**

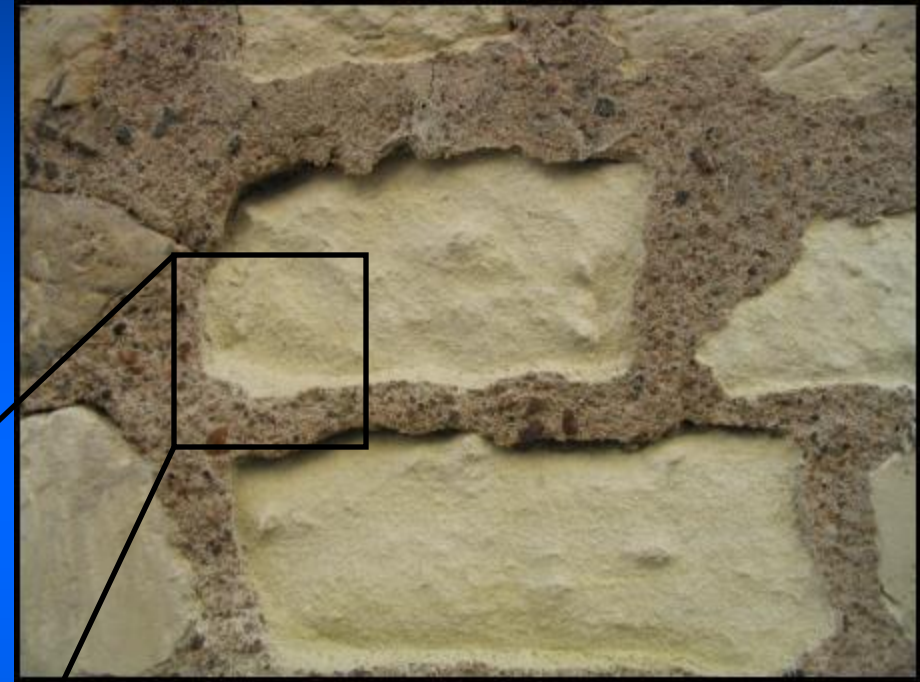
Une pierre laissant faiblement circuler l'eau juxtaposée à une pierre favorisant sa circulation va empêcher le bon drainage de l'eau. Et la pierre va être fortement imprégnée d'eau chargée de sels et autres polluants qui vont s'y accumuler.





# 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
<b>Sulfate de sodium</b> (mirabilite, thénardite)	Ciments de type Portland, mortiers au ciment, lessives, briques...
<b>Carbonate de sodium, de potassium</b>	Ciments type Portland, mortiers au ciment, lessives, résidus de nettoyage chimique...
<b>Chlorure de sodium</b> (halite)	Eau de mer, embruns, sels de déverglaçage, sel de salaison...
<b>Chlorure de potassium</b> (sylvite)	Sol...
<b>Sulfate de calcium</b> (gypse, anhydrite, bassanite)	Plâtre, mortiers contenant du plâtre, ciments, mortiers au ciment, SO <sub>2</sub> atmosphérique, embruns, activités bactériennes
<b>Nitrate de sodium</b>	Sol, engrais, matières organiques décomposées, activités bactériennes
<b>Nitrate de potassium</b>	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  $\text{NaNO}_3$
  - **Niter** (salpêtre)  $\text{KNO}_3$
  - 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  $\text{K}_2\text{SO}_4$
  - **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  $\text{CaCO}_3$
  - 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*

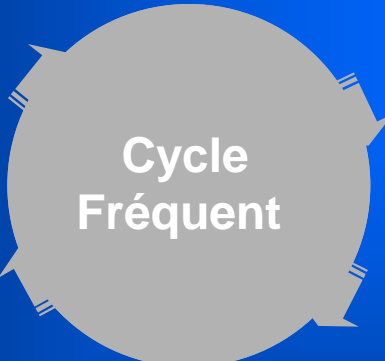


**Dégradation**

**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*



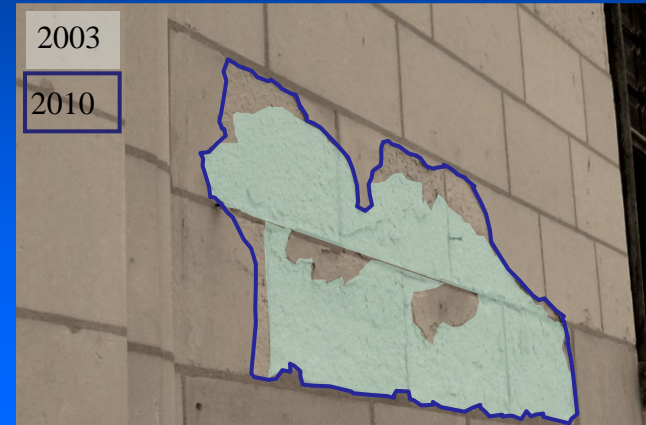
**Mesures au laboratoire:  
Teneur en eau,  
Teneur en eau  
hygroscopique,  
analyses de sel (DRX, Cl, ...)**

**Diagnostic**

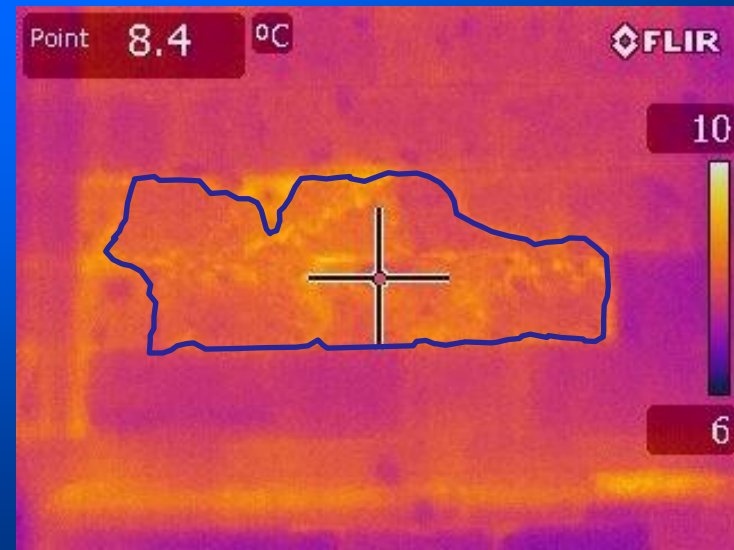
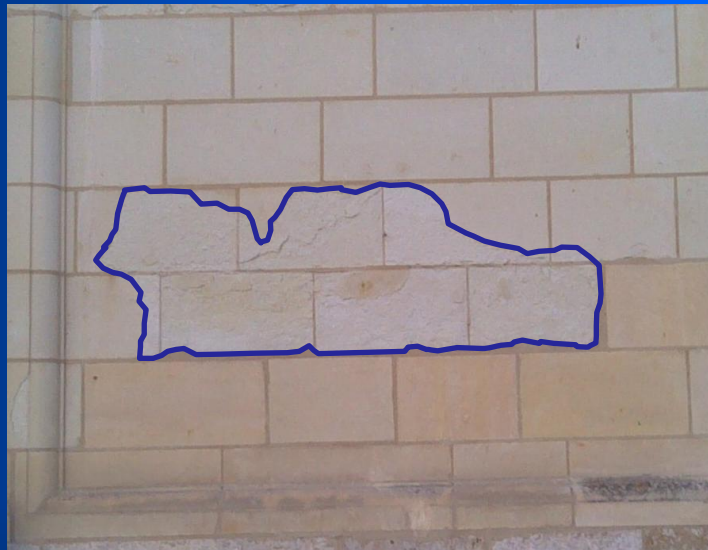
**Préconisation et méthodes de restauration:  
faisabilité, application suivi.....**

# 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

SCHEMA METHODOLOGIQUE DE L'ETUDE D'UN EDIFICE

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"> <li>• à l'échelle de la structure</li> <li>• à l'échelle du matériau</li> </ul>
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 ( $\phi$  30 à 100  $\mu$ m) sous faible pression (avec ou sans eau)*



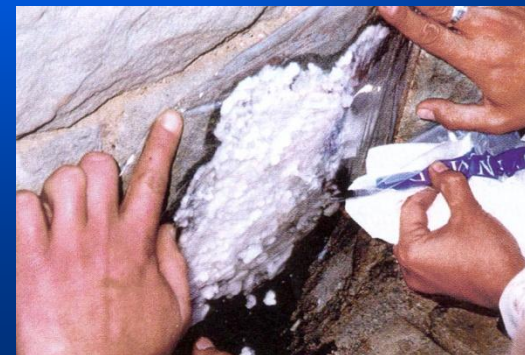
- Le nettoyage laser

*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

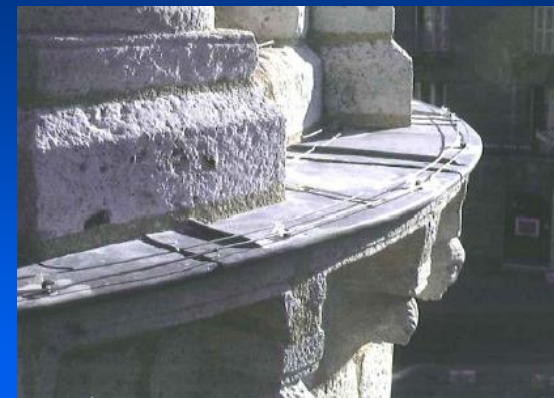
- Les silicate d'éthyle, la chaux ...
- Les résines acryliques ...
- La bio-reminéralisation ...



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

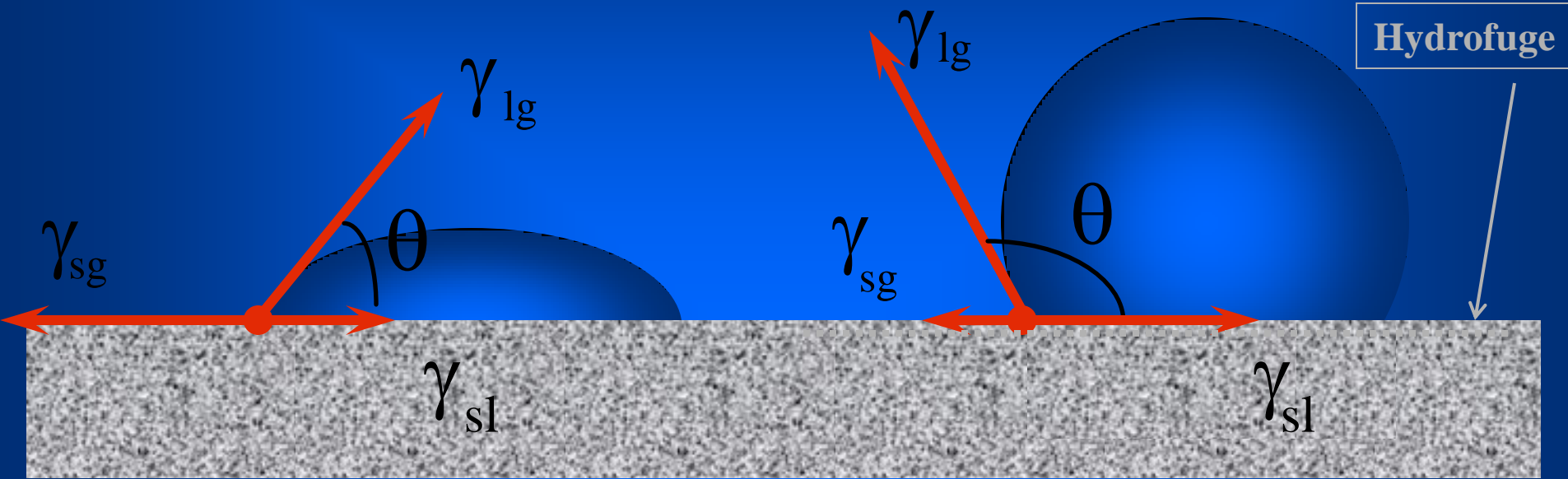
# Hydrofugation



# 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  $\gamma_{sg}$   
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	Vieillissement par chocs thermiques	NF EN 14066	Tenue à l'environnement
	Résistance au gel	NF EN 12371	
	Essais de cristallisation des sels	NF EN 12370	
	Vieillissement sous SO <sub>2</sub>	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 »

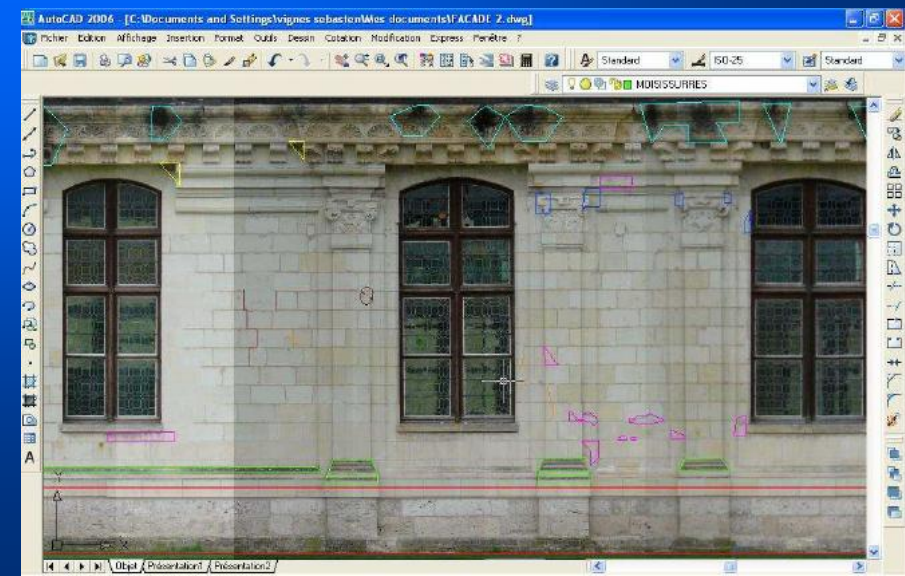
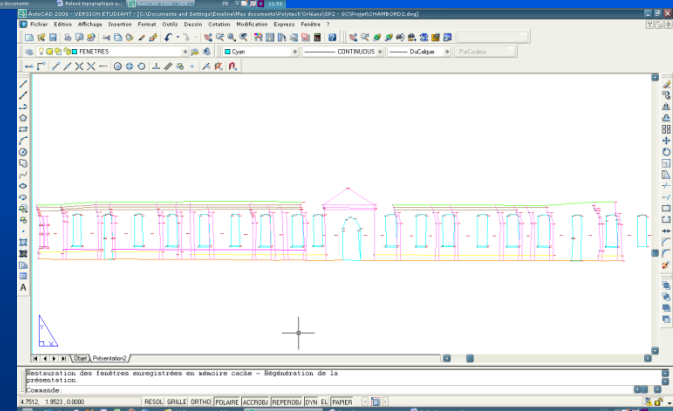
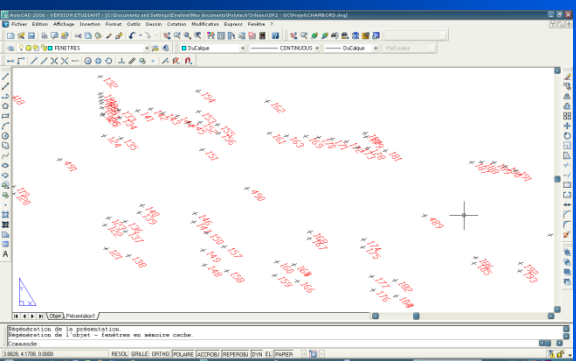
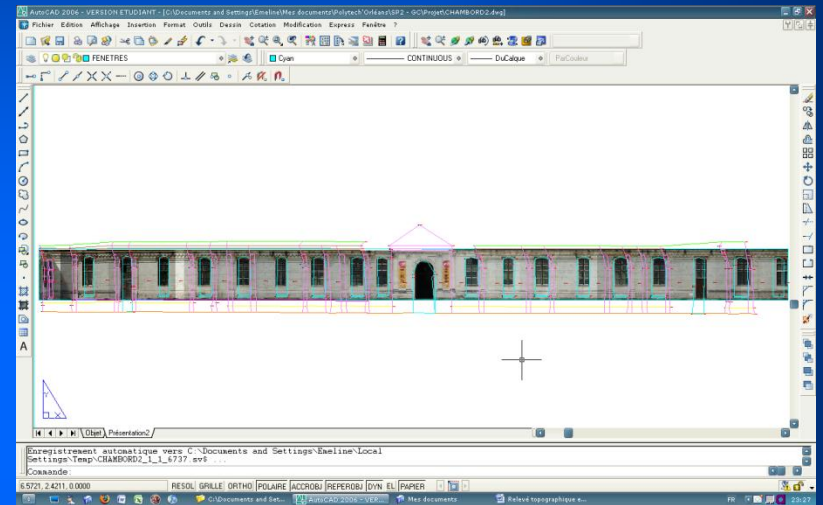
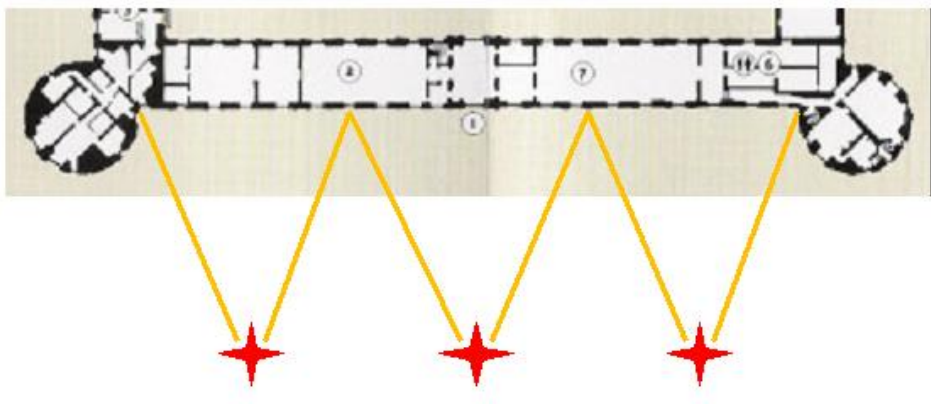
**Suivi des Altérations, Caractérisation et  
Restauration des monuments en pierre calcaire**

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

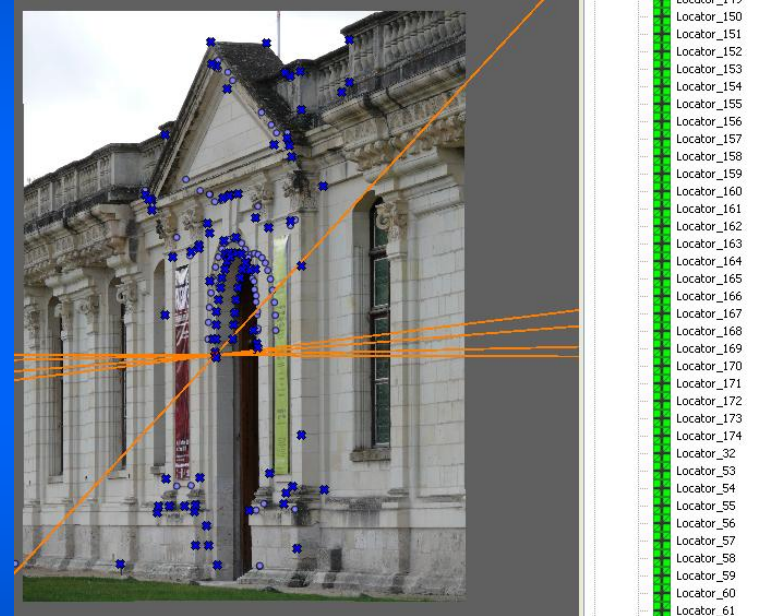


# SACRE : étape 1

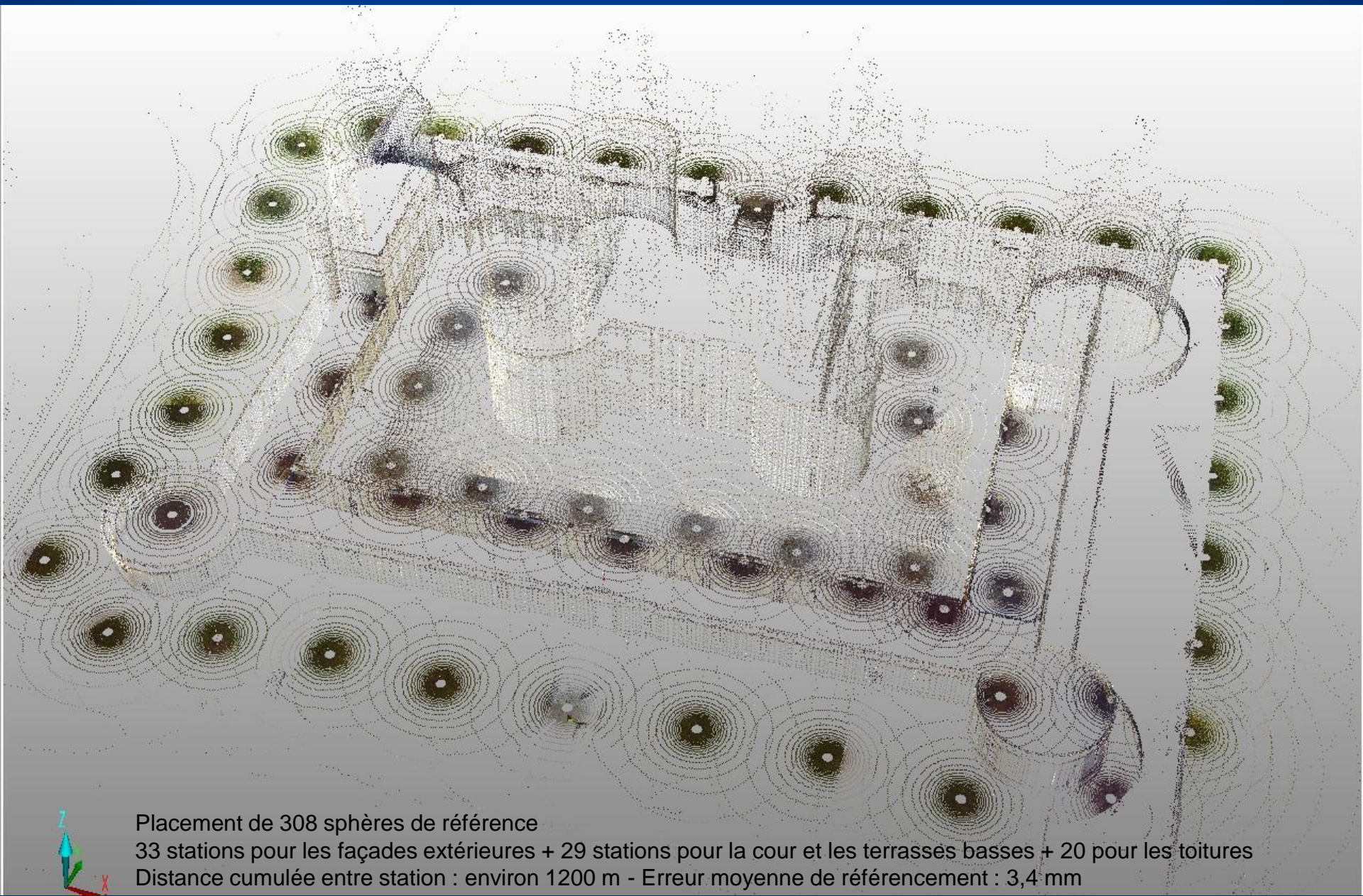


# SACRE : étape 1

## photogrammétrie



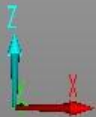
# Relevé au scanner laser du château de Chambord



Placement de 308 sphères de référence

33 stations pour les façades extérieures + 29 stations pour la cour et les terrasses basses + 20 pour les toitures

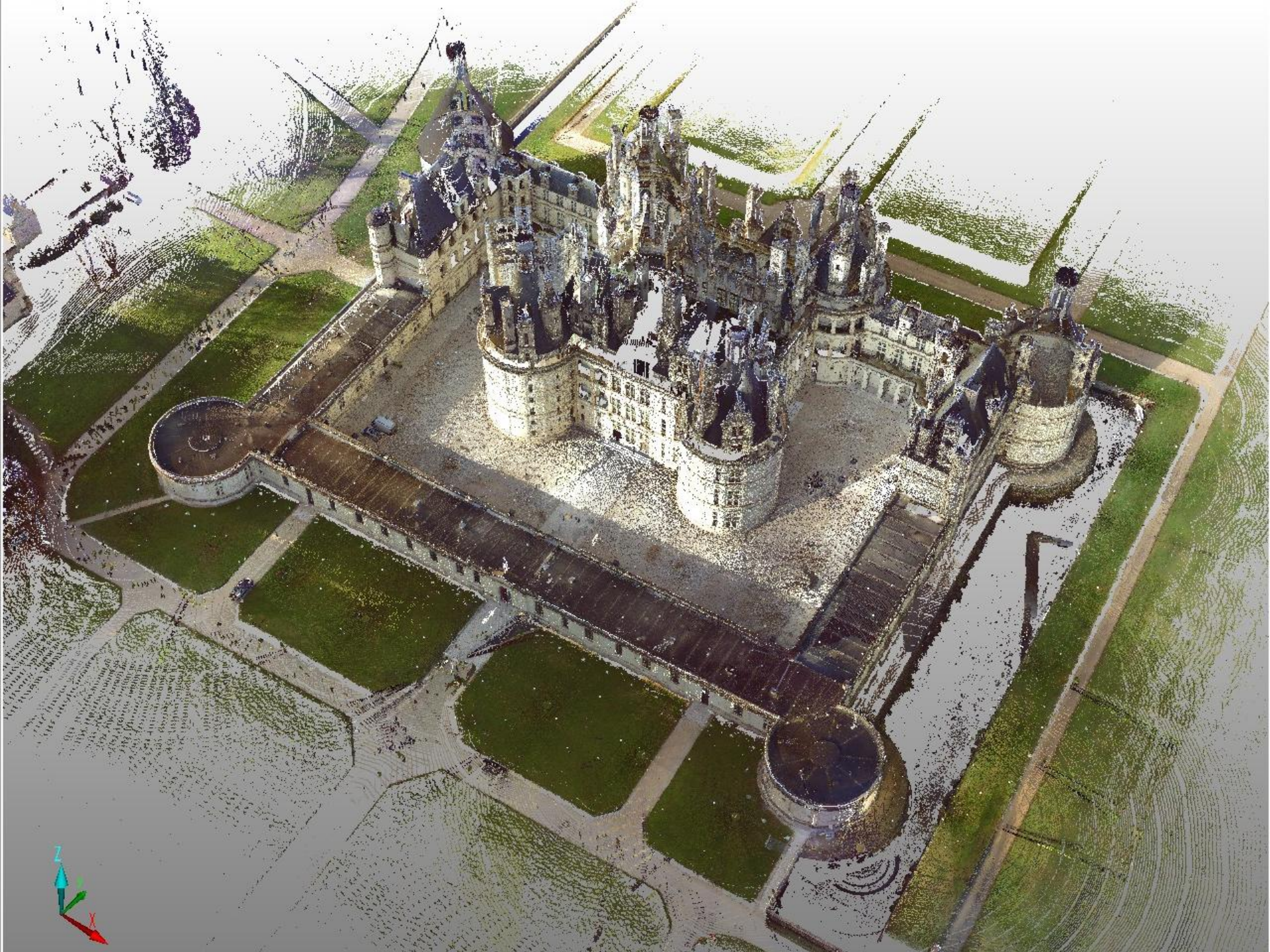
Distance cumulée entre station : environ 1200 m - Erreur moyenne de référencement : 3,4 mm



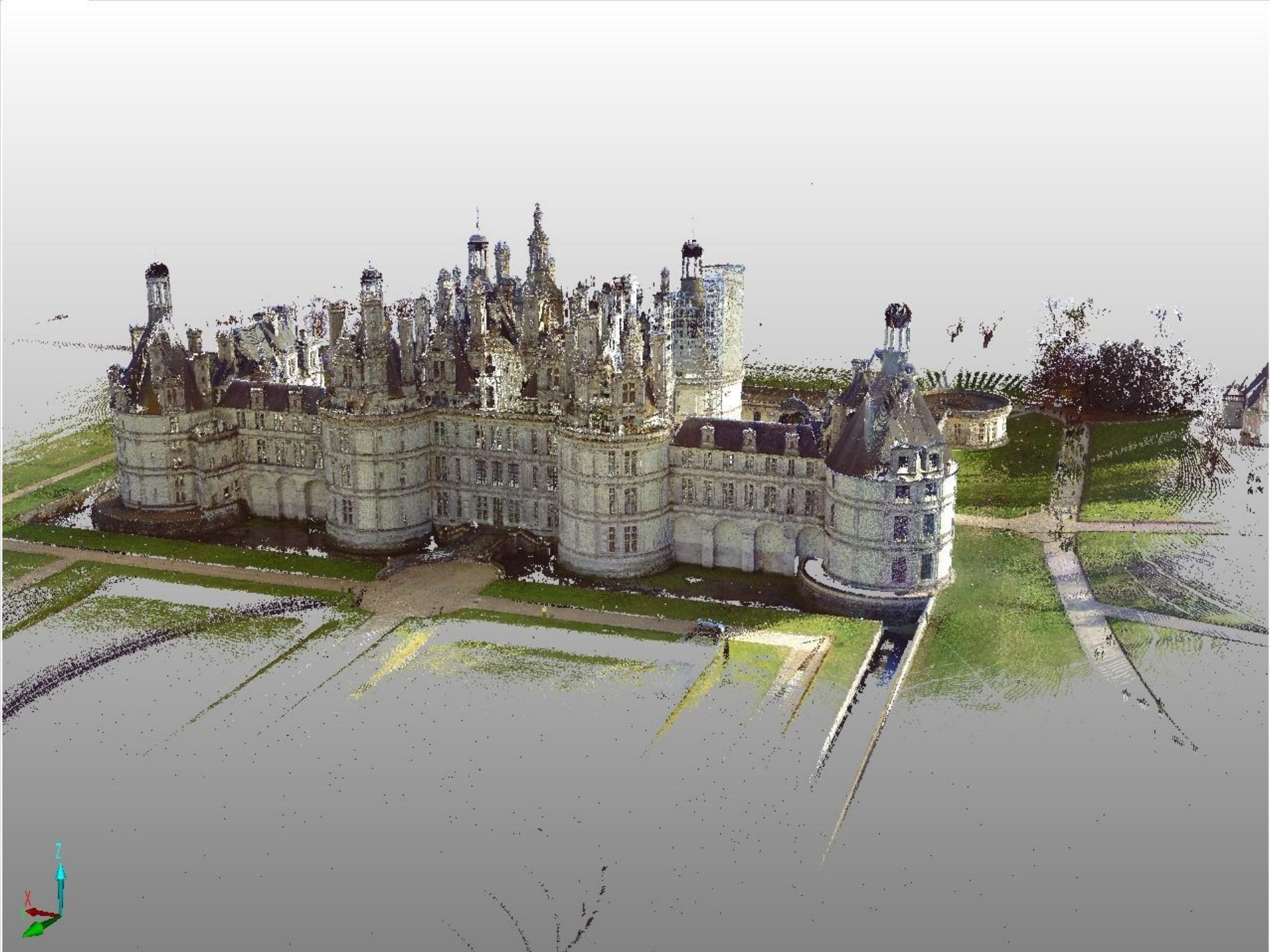


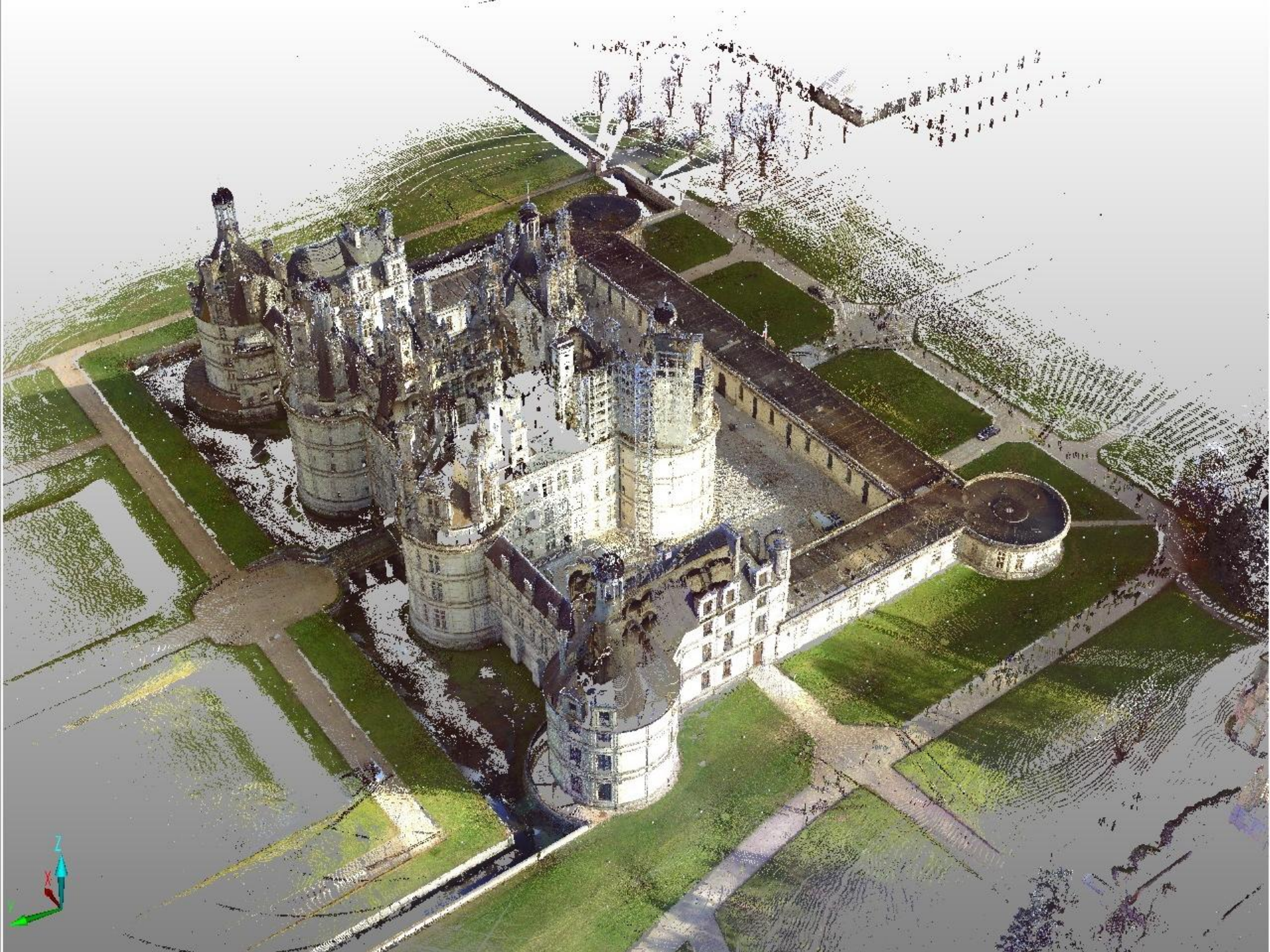








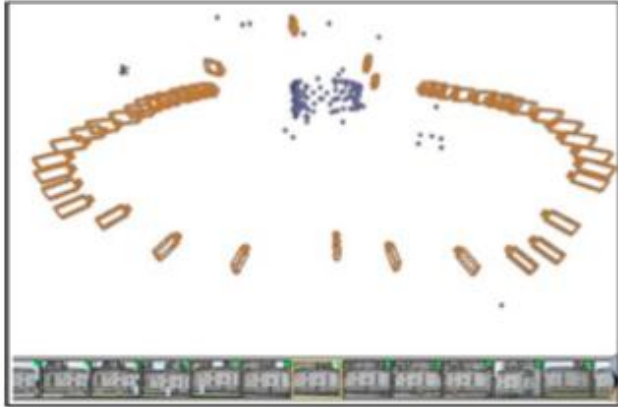




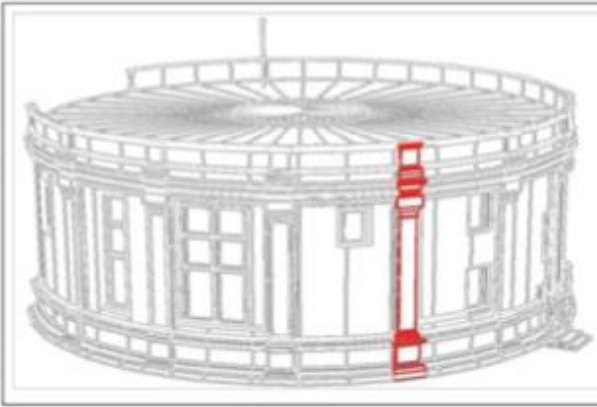


# SACRE : étape 1

Position des caméras



Modèle filaire des surfaces

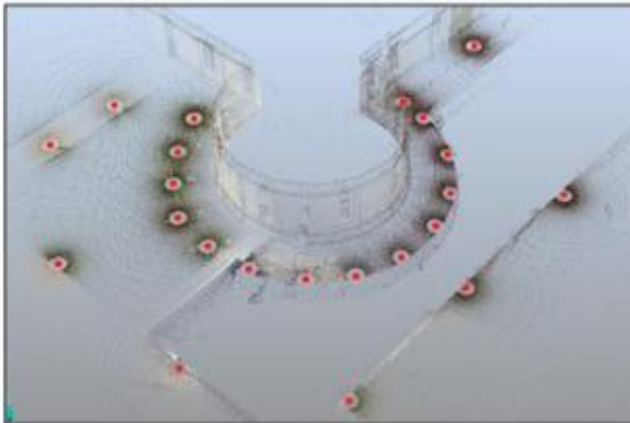


Modèle 3D texturé



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



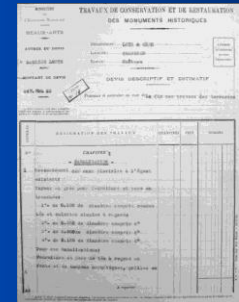
**COMBINAISON DES DEUX METHODES DE MODELISATION 3D POUR AMELIORER L'ETUDE ET L'ANALYSE**

# 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<sup>ème</sup> moitié du XX<sup>ème</sup> siècle)

**Archives départementales du Loir-et-Cher, Blois**

Fond Robert-Houdin – correspondance (1<sup>ère</sup> moitié du XX<sup>ème</sup> siècle)

Devis de travaux et restauration (XIX<sup>ème</sup> siècle)

→ Dessins, plans et devis associés

Actes notariés (XVI<sup>ème</sup> – XIX<sup>ème</sup> siècle)

**Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine**

Devis et travaux de restauration (1<sup>ère</sup> moitié du XX<sup>ème</sup> siècle)

Photothèque

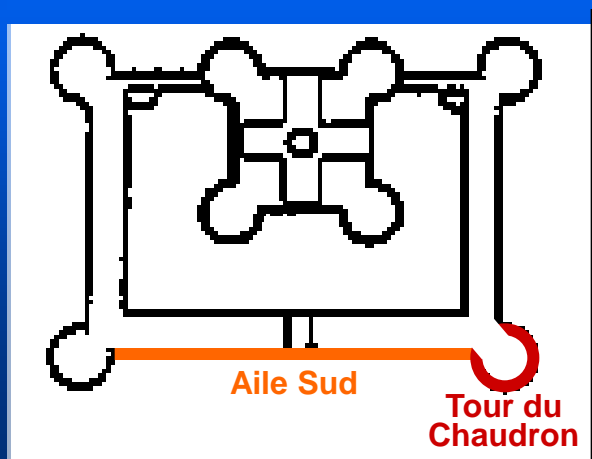
## • Documents produits

- *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 <sup>er</sup>	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'Apremont (Apremont-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 <sup>1</sup> -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



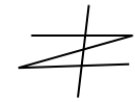
n° 1



n° 2



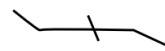
n° 3



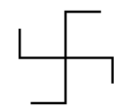
n° 4



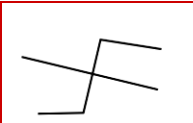
n° 5



n° 6



n° 7



n° 8



n° 9



n° 10



n° 11



n° 12



n° 13



n° 14



n° 15



n° 16



n° 17



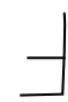
n° 18



n° 19



n° 20



n° 21



n° 22



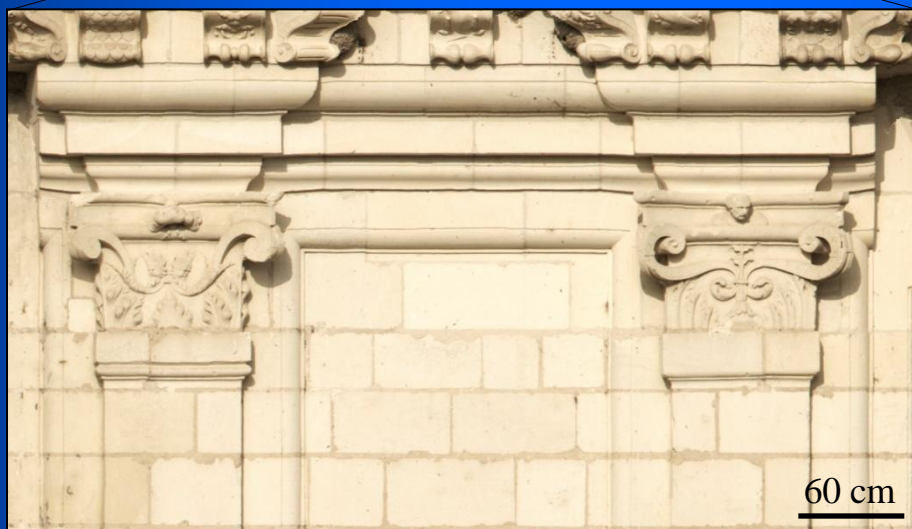
n° 23



n° 24

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

# 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

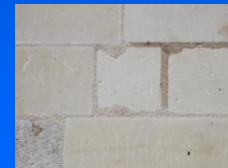


Photographies

### 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

*AILE SUD*

 Pierres remplacées en 1953-55

 Pierres remplacées avec certitude en 1962

 Pierres remplacée à une date incertaine – 1856 ou 1962 ?

Tour des Princes

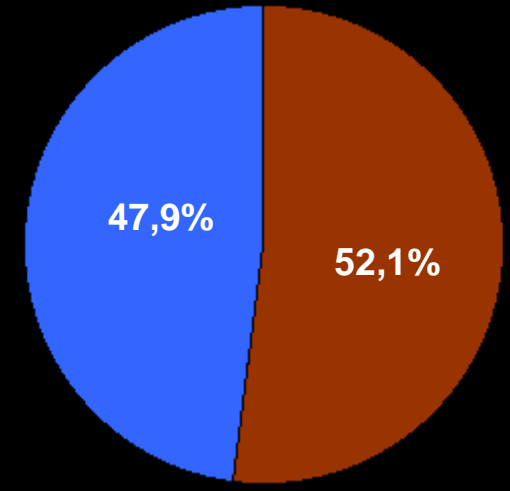
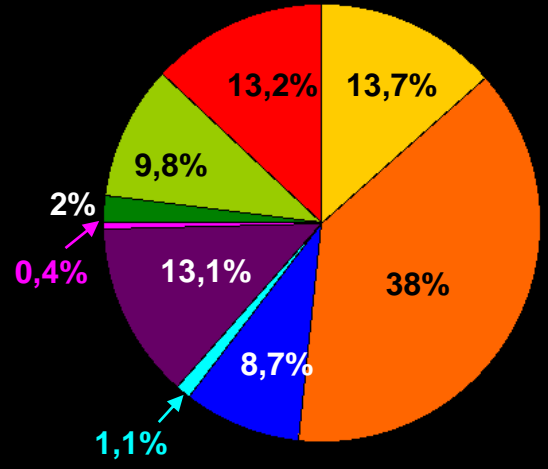


Tour du Chaudron

# Analyse bibliographique d'archives historiques

## Aile Sud

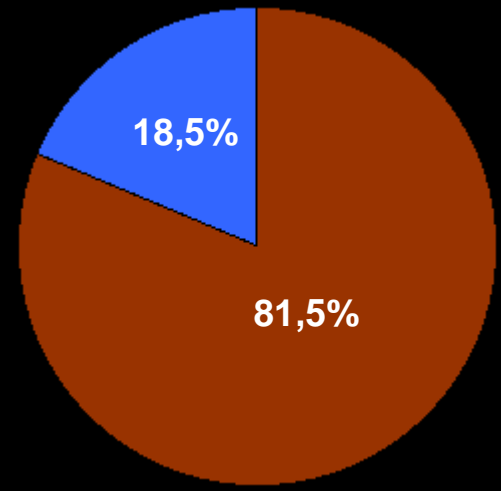
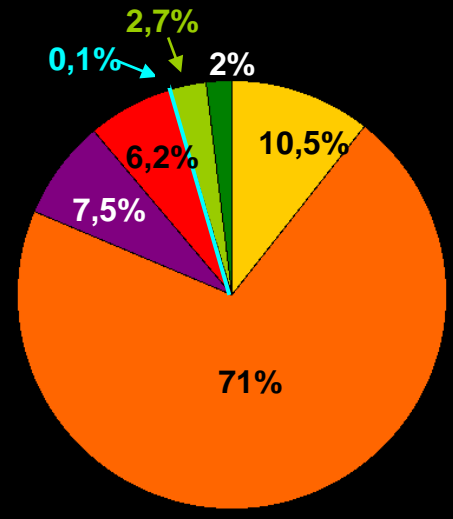
- Signes lapidaires
- Pierres supposées d'origine
- Travaux de 1683
- Travaux de 1856
- Travaux de 1937
- Travaux de 1937 - emplois
- Travaux de 1953-1955
- Travaux de 1962
- Date incertaine - 1856? 1962?



- 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



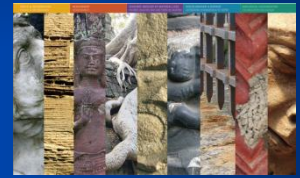
Communs d'Orléans

# 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



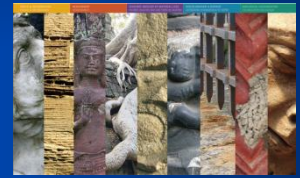
Conseil International des  
Monuments et des Sites

# 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



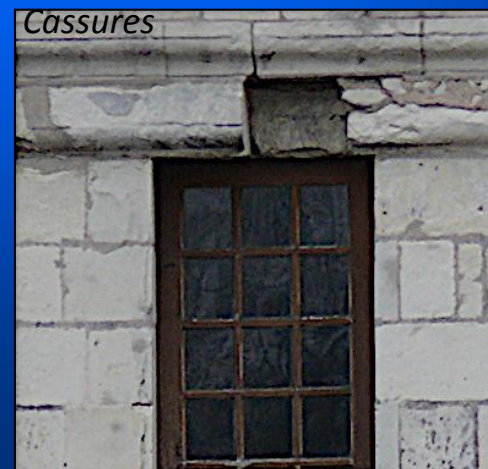
Conseil International des  
Monuments et des Sites



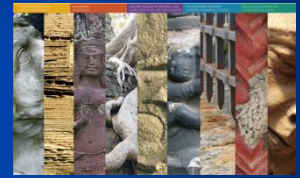
# Relevé et état des lieux d'altérations : cartographie

## 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



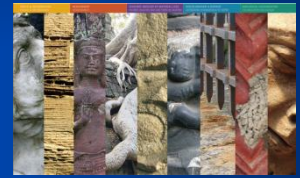
Conseil International des  
Monuments et des Sites

# Relevé et état des lieux d'altérations : cartographie

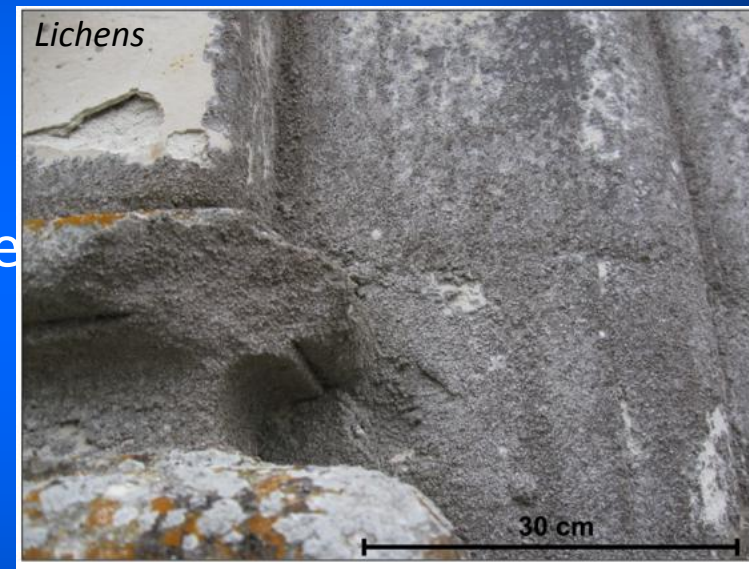
## Formes d'altération

- 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

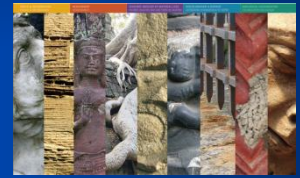
➤ Les colonisations biologiques

- Lichens
- Mousses

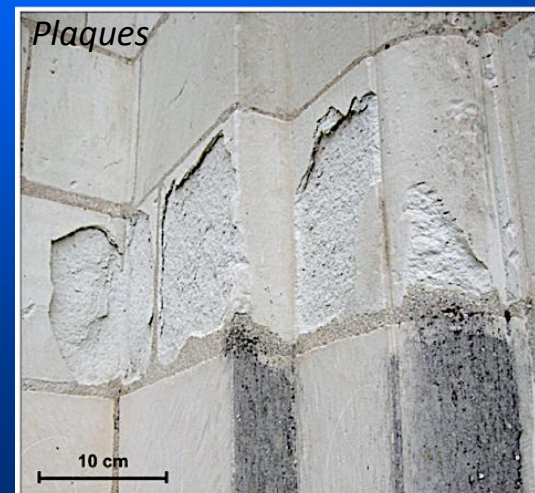
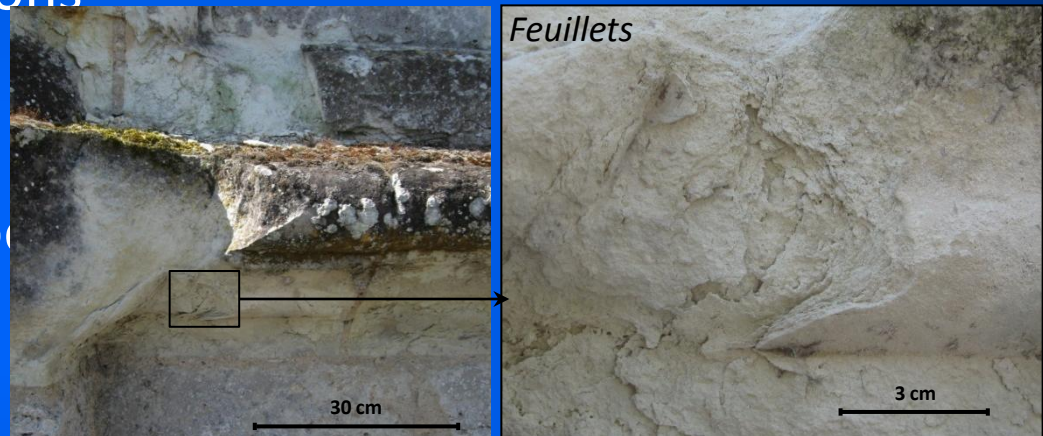
➤ Les détachements

- 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



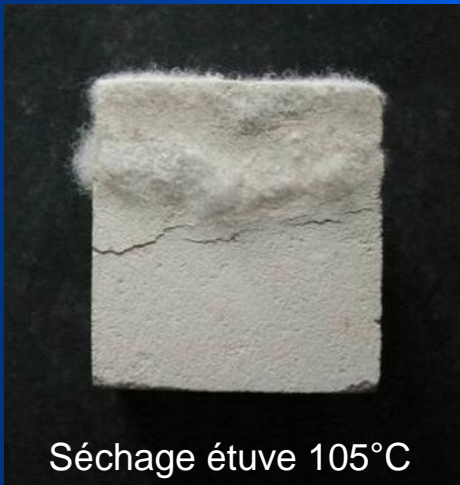
Communs d'Orléans

# SACRE : étape 3

## Vieillessement naturel in-situ VS Vieillessement 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



Séchage étuve 105°C



Séchage air libre

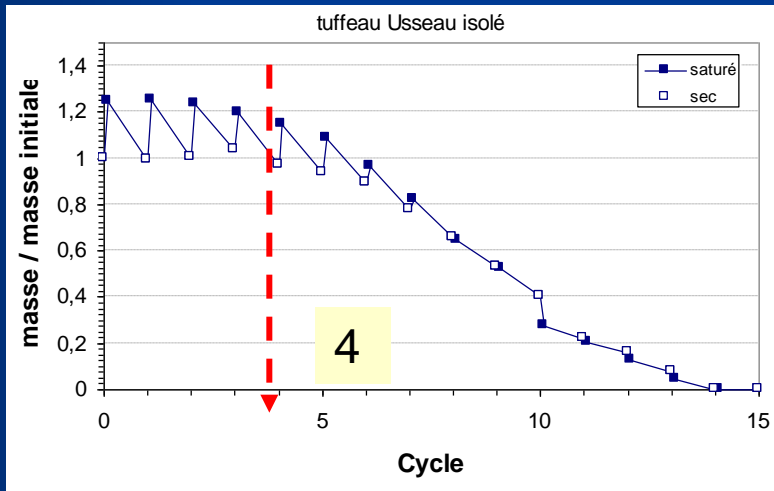


Séchage micro-onde

# D'autres agents d'altération

## Les sels : cas du $\text{Na}_2\text{SO}_4$

$\text{Na}_2\text{SO}_4$   
14%



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

(Norme EN12370)



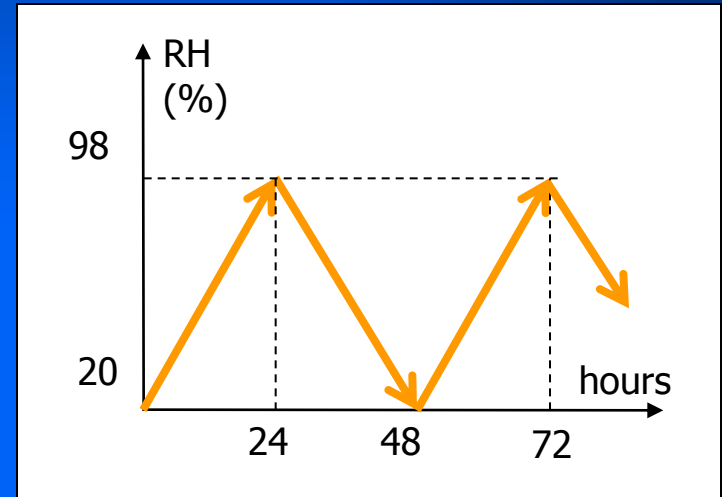
La dégradation  
de la pierre est  
très rapide

*Cas du tuffeau*

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

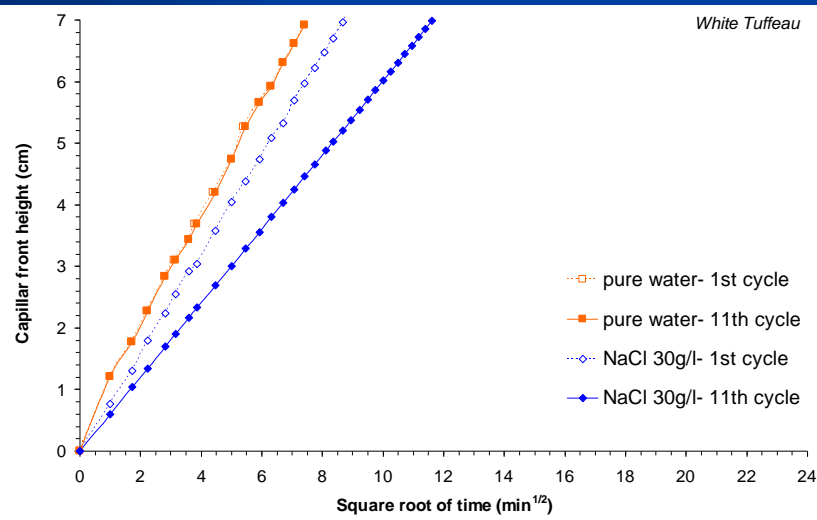


*Cas du tuffeau*

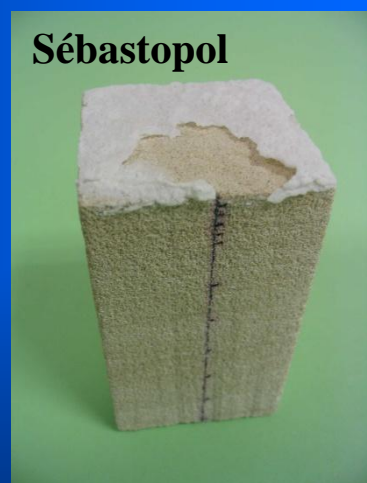
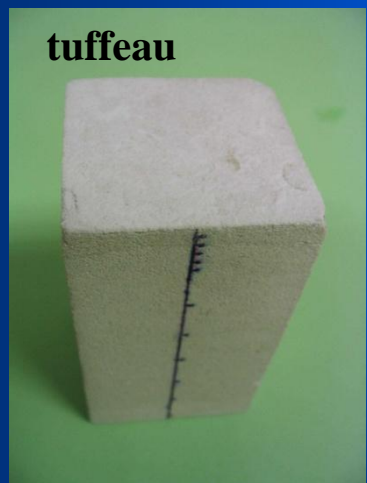
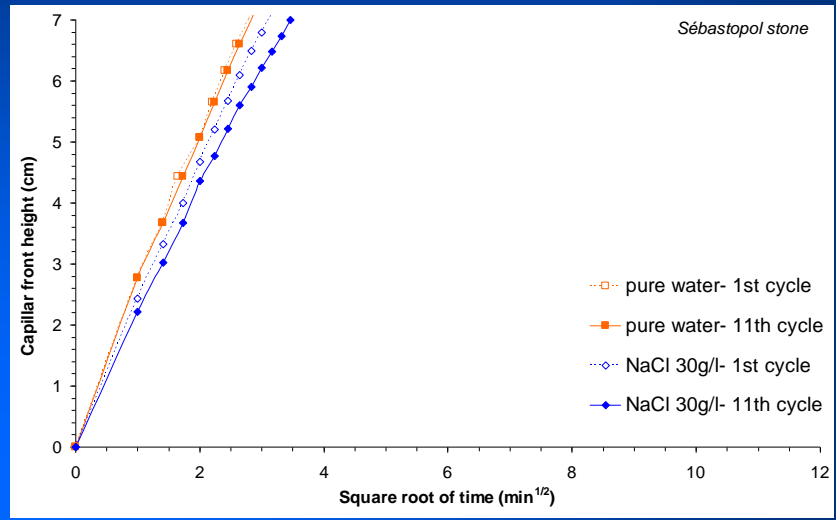


Forte altération en surface provoquée par des simples variations d'humidité dans une pierre légèrement polluée par du sel

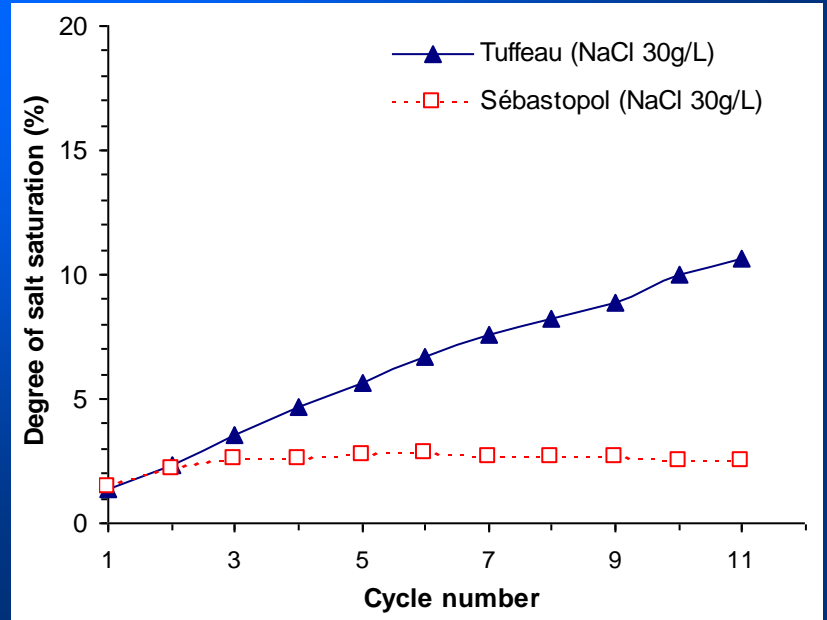
## Tuffeau blanc



## Pierre de Sébastopol



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

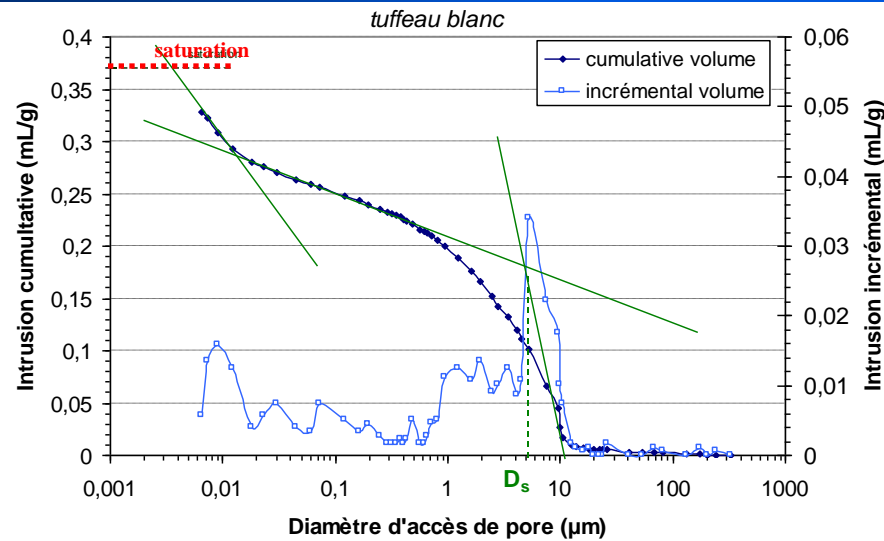


## *Tuffeau blanc*

Porosité totale = 48,6 %

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

Porosité Hg = 42,8 %

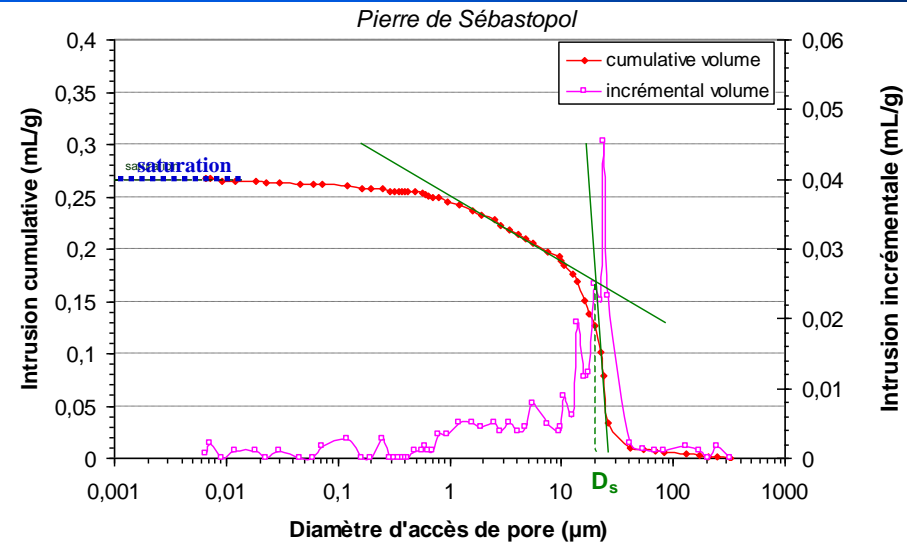


## *Pierre de Sébastopol*

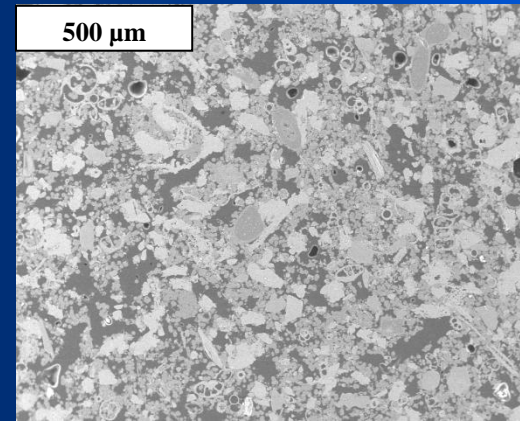
Porosité totale = 41,9 %

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

Porosité Hg = 42,2 %

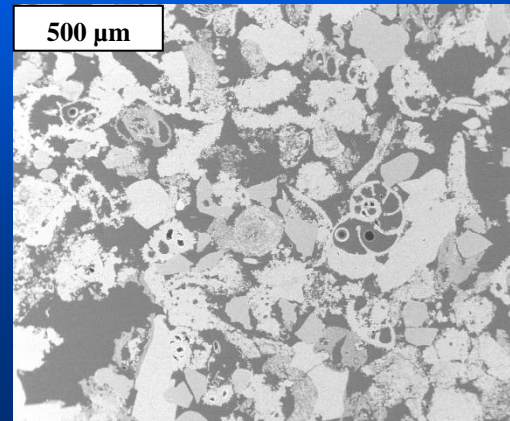


500  $\mu\text{m}$



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

500  $\mu\text{m}$



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

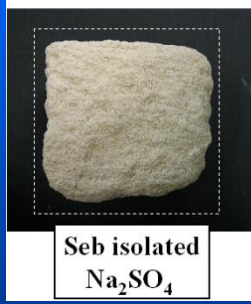
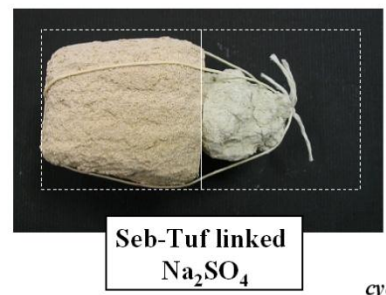
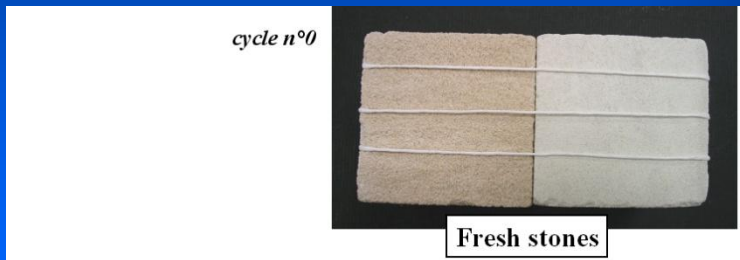
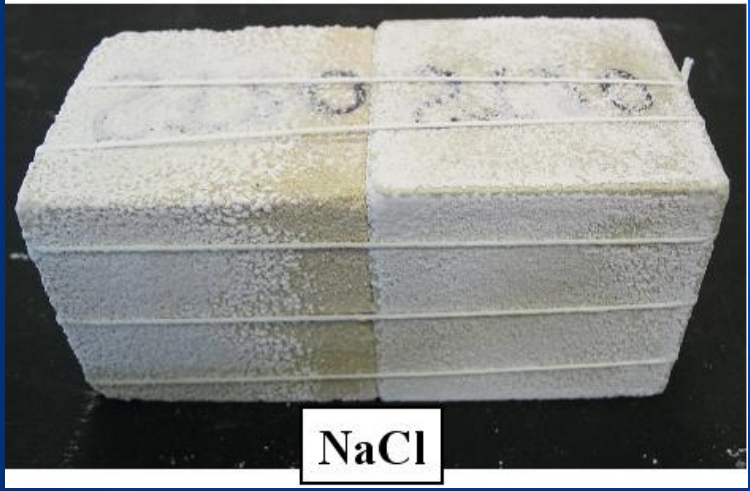
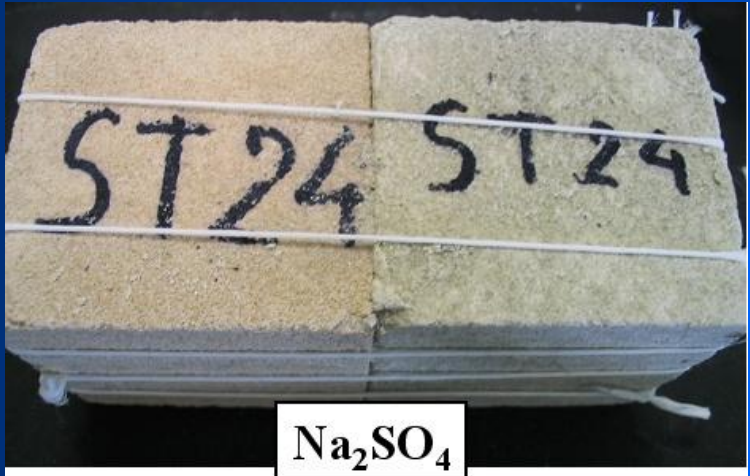
# D'autres agents d'altération

# Les sels : cas du NaCl

NaCl  
Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Pierre  
de Sébastopol

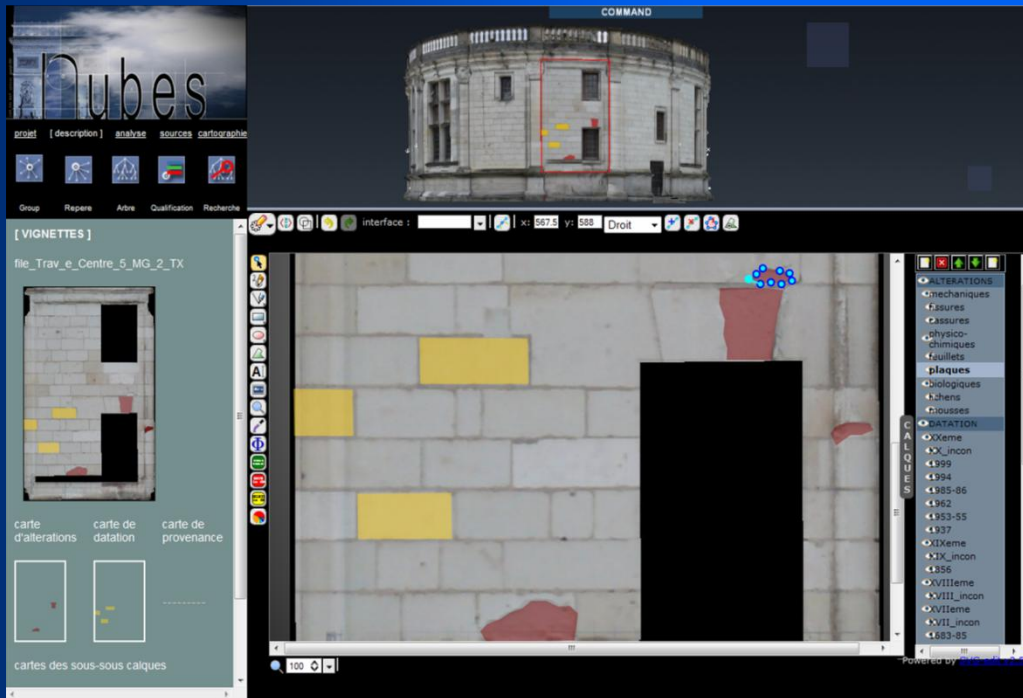
Tuffeau blanc



# 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 !**