



Etudes Recherches Matériaux

ERM

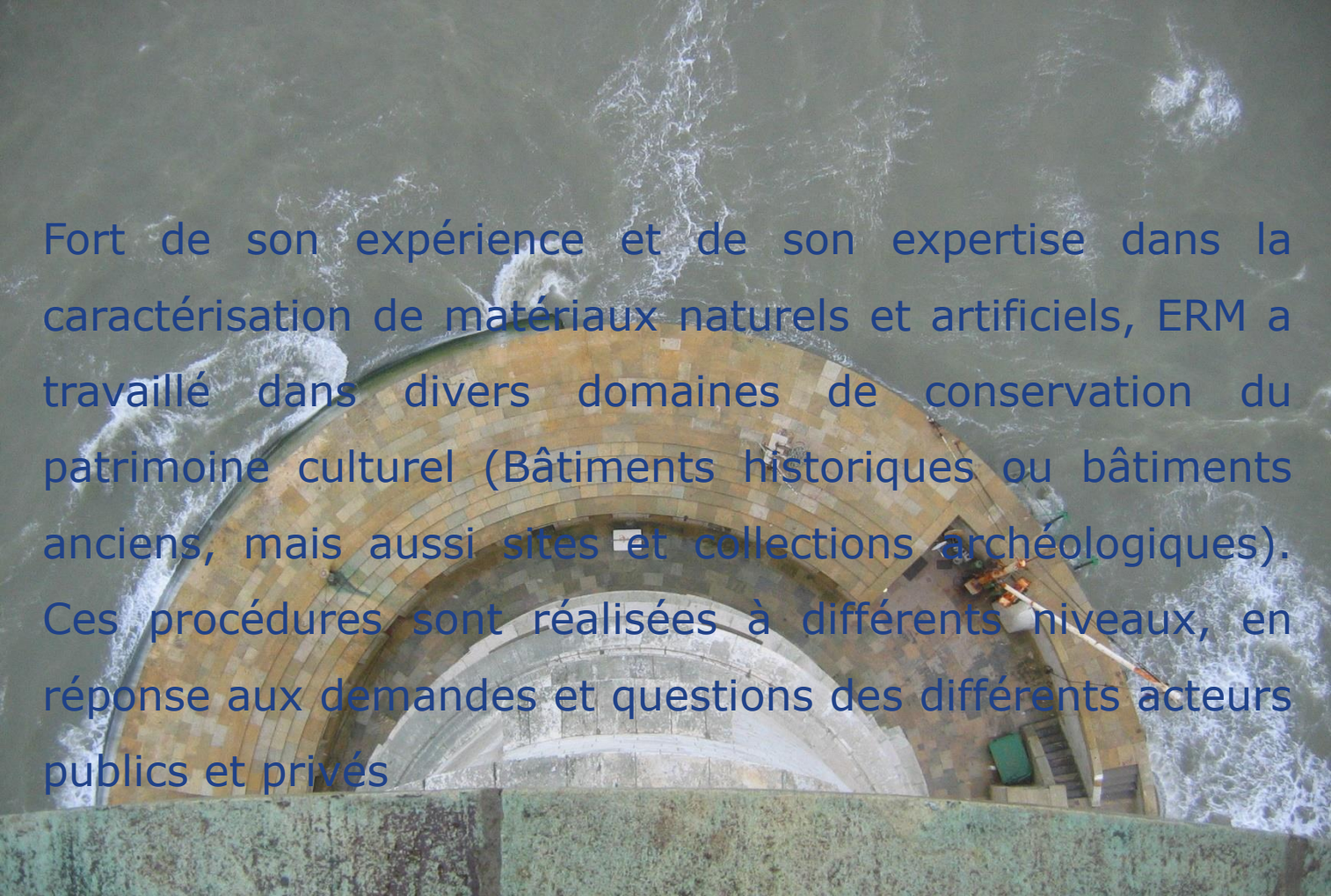
Laboratoire privé d'études des matériaux du patrimoine

Caractérisation des altérations des pierres du bâti ancien

Etudes de cas

F. RASSINEUX

Monuments historiques et bâtis anciens



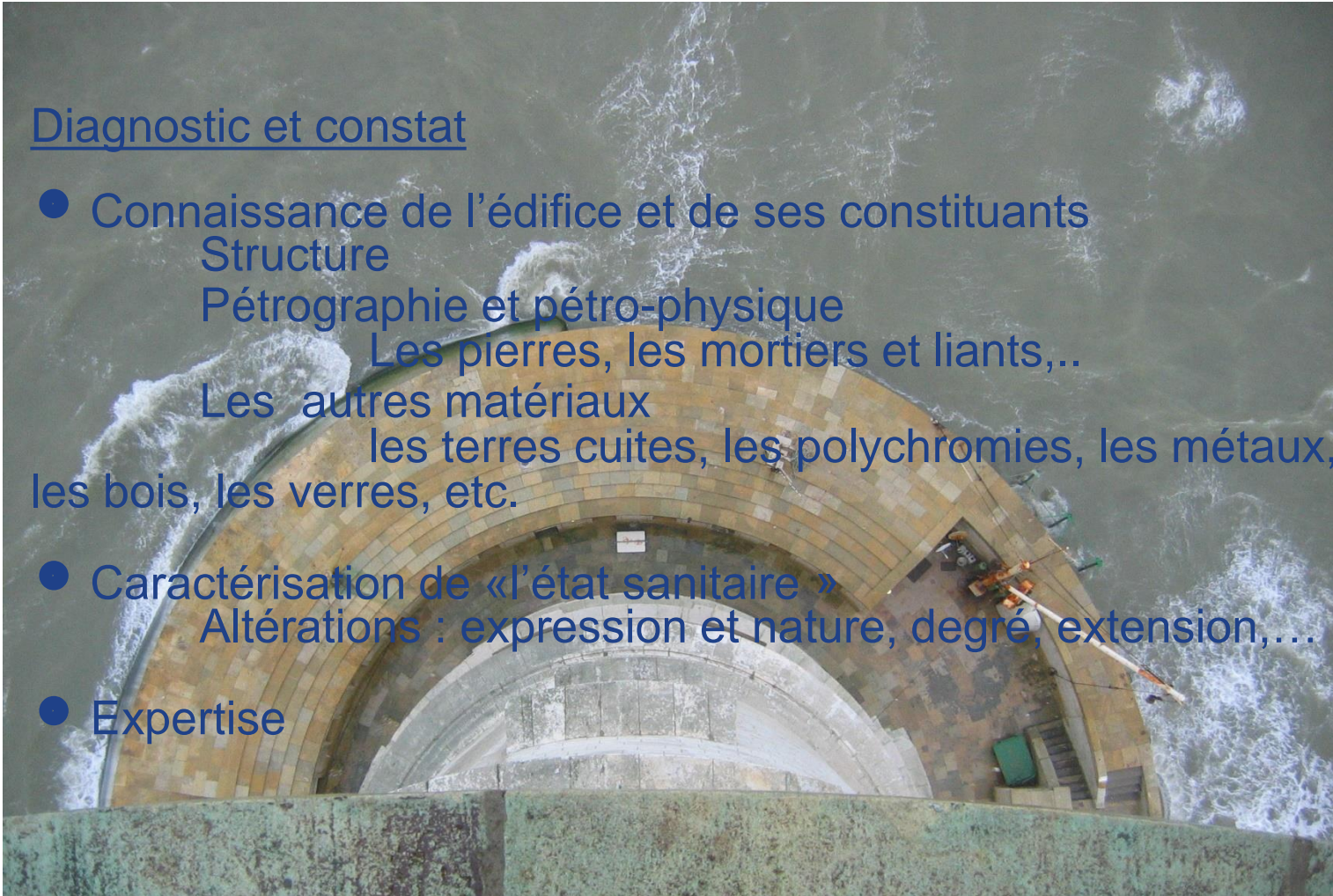
Fort de son expérience et de son expertise dans la caractérisation de matériaux naturels et artificiels, ERM a travaillé dans divers domaines de conservation du patrimoine culturel (Bâtiments historiques ou bâtiments anciens, mais aussi sites et collections archéologiques). Ces procédures sont réalisées à différents niveaux, en réponse aux demandes et questions des différents acteurs publics et privés

Monuments historiques et bâtis anciens



Diagnostic et constat

- Connaissance de l'édifice et de ses constituants
 - Structure
 - Pétrographie et pétro-physique
 - Les pierres, les mortiers et liants,...
 - Les autres matériaux
 - les terres cuites, les polychromies, les métaux, les bois, les verres, etc.
- Caractérisation de «l'état sanitaire »
 - Altérations : expression et nature, degré, extension,...
- Expertise





Etudes Recherches Matériaux



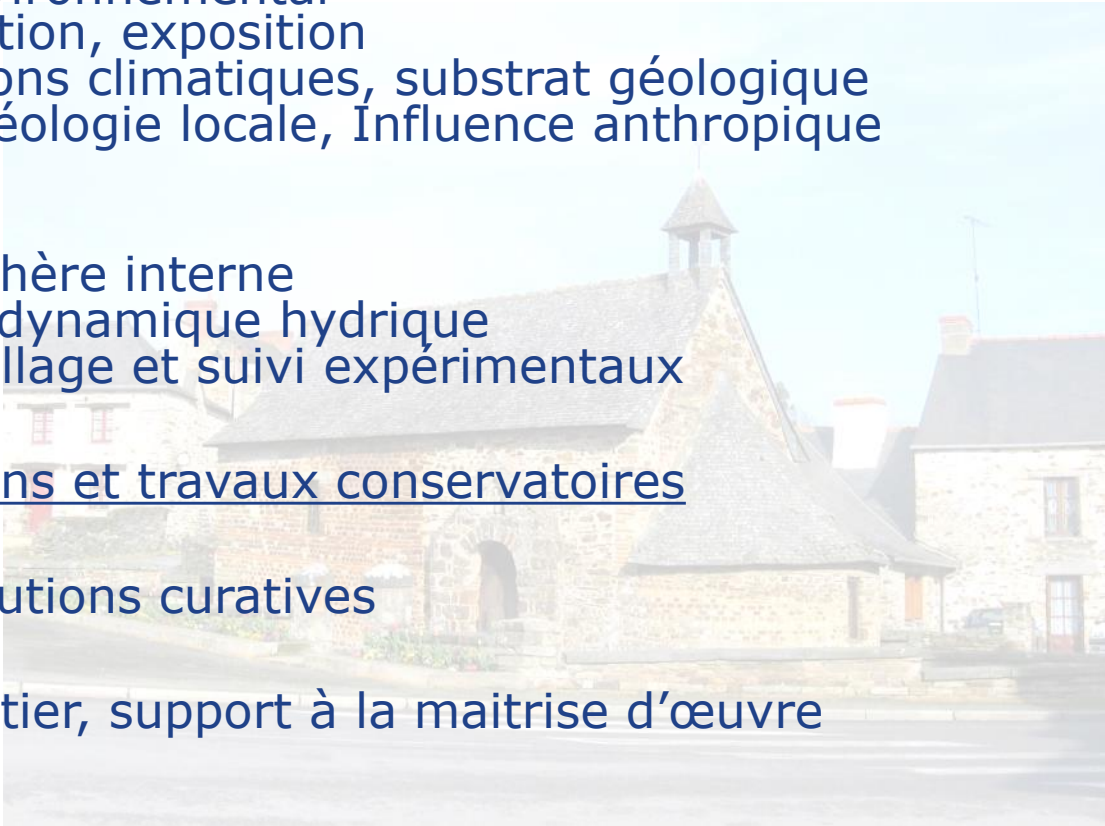
Compréhension du système

- Contexte environnemental
Orientation, exposition
Conditions climatiques, substrat géologique
Hydrogéologie locale, Influence anthropique
- Le site
Atmosphère interne
Etat et dynamique hydrique
Appareillage et suivi expérimentaux



Aide aux décisions et travaux conservatoires

- Choix des solutions curatives
- Suivi de chantier, support à la maîtrise d'œuvre



LES ALTÉRATIONS DES MAÇONNERIES EN PIERRE

1 – LES AGRESSIONS PUREMENT PHYSIQUES

- La température

- Température haute – Incendie (le plus fréquent)

Jusqu'à 1100°C lors d'un incendie, les dégâts sont fonction des propriétés physiques et de la minéralogie de la roche.

➤ Microfractures et éclatement fonction des propriétés de conductivité thermique de la roche et de l'intensité.

- Température moyenne - Insolation

➤ Minéraux comme la calcite, l'aragonite, le gypse ou encore le quartz sont anisotropes,

➤ L'échauffement entraîne une dilatation selon des directions préférentielles et donc des contraintes aux limites des cristaux.

➤ Décohésion granulaire

- Température basse – Le gel

➤ La transformation de l'eau en glace s'accompagne d'une augmentation de volume (+ 9% à 0°C et 13.2% à -22°C puis diminution) La pression développée par la formation de la glace induit de fortes pressions .

- 6 bars à 0°C, 610 bars à -5°C, 1130 bars à -10°C, 1590 bars à -15°C, 1970 bars à -20°C et 2115 bars à -22°C

Les conséquences sur la pierre :

➤ Les pressions entraînées par le changement d'état dépassent les résistances à la traction de la plupart des roches

➤ Fissurations et éclatement

➤ Les effets du gel sont donc fonction de la porosité de la roche et de ses « faiblesses » éventuelles (diaclasses, litage,...), et surtout de la saturation en eau de son réseau poral.

LES ALTÉRATIONS DES MAÇONNERIES EN PIERRE

1 – LES AGRESSIONS PUREMENT PHYSIQUES

- L'érosion par les agents externes

- Le vent, les écoulements d'eau

- En climat subdésertiques ou marin, il entraîne une désagrégation mécanique (sablage).
- Sous nos latitudes, il participe à la frappe d'eau sur les façades,
- il augmente l'évaporation favorisant la migration et la cristallisation des sels solubles.
- il dépose des poussières polluantes (sels, carbonates, suies, et goudrons, pollens,...

- Les écoulements d'eau

- Erosion, usure , dépôts, concrétions...

- « Les sels solubles » (surtout des marqueurs de l'altération)

- dissous dans la solution interstitielle contenue dans les matériaux (porosité) lié à l'altération chimique.
- Lorsque leurs concentrations augmentent (évaporation, dissolution), sursaturation vis à vis d'une espèce (comme dans un marais salant)
- Précipitation

Leur action ?

- Cette transformation s'effectue par cristallisation (croissance de cristaux) dans la porosité ou à la surface du matériau.
- Développement de pressions importantes? (Avis très divergents dans le monde scientifique sur la pression de cristallisation qui ne semble pas exister réellement)
- constats : effet de coin, et rupture des ponts entre les divers éléments constituant le matériau (effets assez similaire à ceux du gel).
- L'alternance répétées de cycles cristallisation-dissolution conduit à une perte de cohérence des matériaux compétents (roche, mortier, brique,...).

LES ALTÉRATIONS DES MAÇONNERIES EN PIERRE

Leur nocivité dépend de

- leur nature, solubilité, hygroscopicité, variable selon le(s) type(s) de sel présent.
- leurs concentrations
- de la dynamique hydrique du site
- de la nature des matériaux

L'origine

- L'environnement
 - origine naturelle (marin, sous-sol, etc...)
 - origine anthropique (industrielle, rejet,...)
 - origine biologique (déjections, bactéries,...)
- Les liants hydrauliques modernes
- Les traitements du bâti : lessive sodique (soude, eau de javel), traitement divers
- La présence diffuse dans la roche (sortie de carrière) ou dans le substratum

Les variétés les plus courantes :

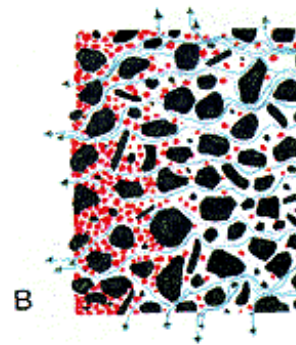
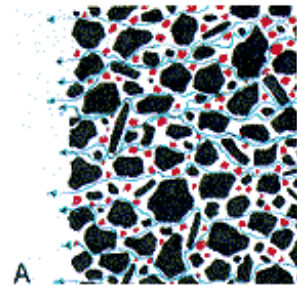
Des sulfates, des chlorures, des nitrates de calcium, magnésium, sodium et potassium, mais aussi des carbonates des oxalates,,

Ces sels portent des noms usuels pour certains d'entre eux : gypse (équivalent naturel du plâtre) ou salpêtre (nitrate de potassium). Les autres ont de « jolis noms » de minéralogie associés à des formules chimiques plus ou moins complexes, par exemple : l'aphthitalite ($K_3Na(SO_4)_2$), Epsomite ($Mg SO_4 \cdot 7H_2O$), la thénardite (Na_2SO_4), le natron ($Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$) ou la halite ($NaCl$, « sel de cuisine »).

LES ALTÉRATIONS DES MAÇONNERIES EN PIERRE

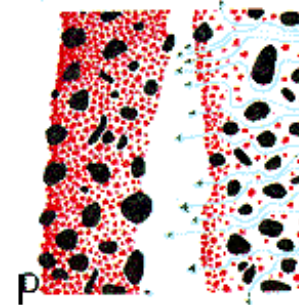
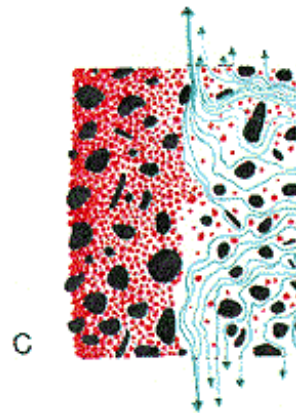
Principe très schématique de la desquamation d'une pierre

Évaporation,
Transport dans
la solution



Concentration,
Cristallisation,
Pseudomorphose, ...

Formation du croûte
Superficielle
propriétés différentes



Rupture mécanique
Détachement, cloquage
Perte de matière

(D'après RAUTUREAU, 2001)

LES ALTÉRATIONS DES MAÇONNERIES EN PIERRE

2 – LES AGRESSIONS CHIMIQUES

- L'eau

- Solvant puissant et universel
- Permet l'hydratation de minéraux, les réactions d'hydrolyse ou d'acidolyse,
- Milieu de transport qui conditionne l'action néfaste des sels,
- Permet le développement d'organismes vivants,

- Les gaz atmosphériques

Composés d'oxydation du carbone (CO_x), du soufre (SO_x) et de l'azote (NO_x).
Dissolution dans l'eau (pluie, brouillard, eau interstitielle des milieux poreux)

⇒ Formation d'acide carbonique, sulfurique et nitrique

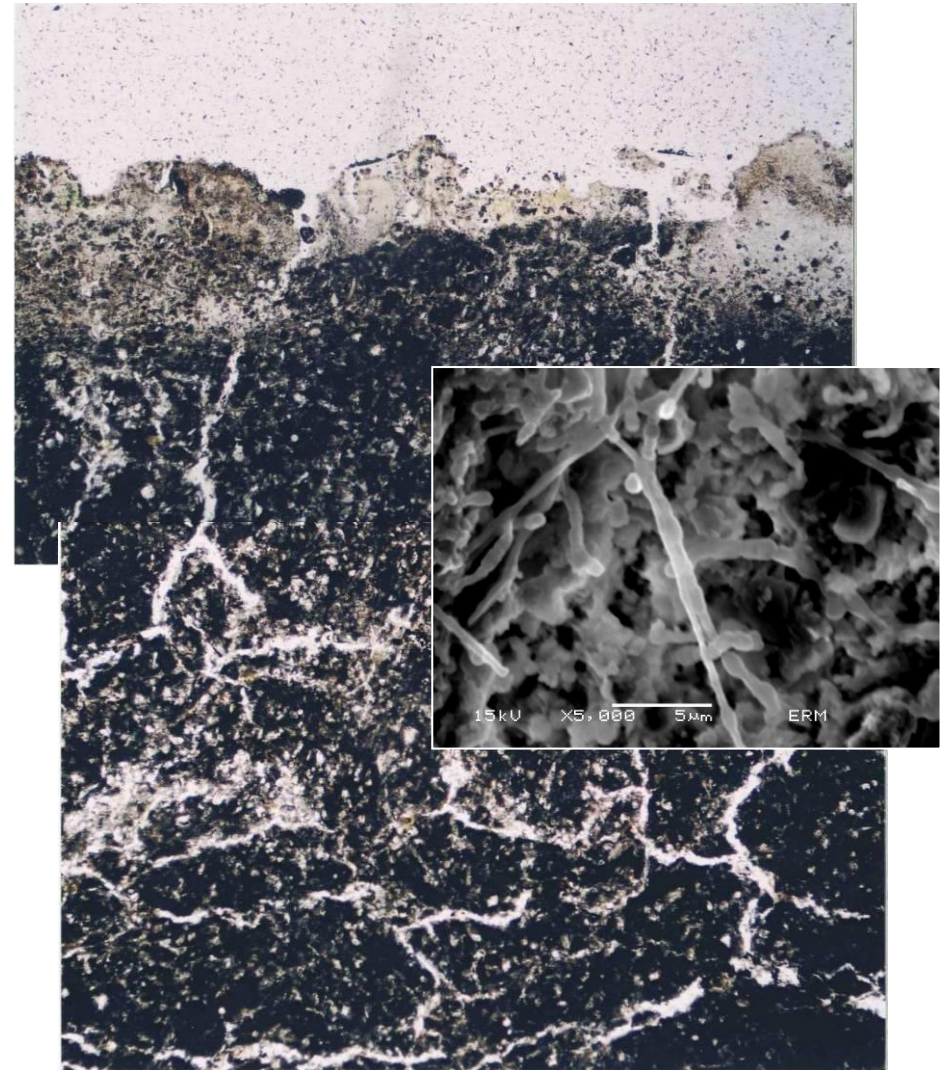
⇒ Pluies acides ou attaque directe des substrats (phénomène de sulfatation des calcaires)

LES ALTÉRATIONS DES MAÇONNERIES EN PIERRE

3 – LES AGRESSIONS BIOLOGIQUES

- Bactéries, algues et champignons...

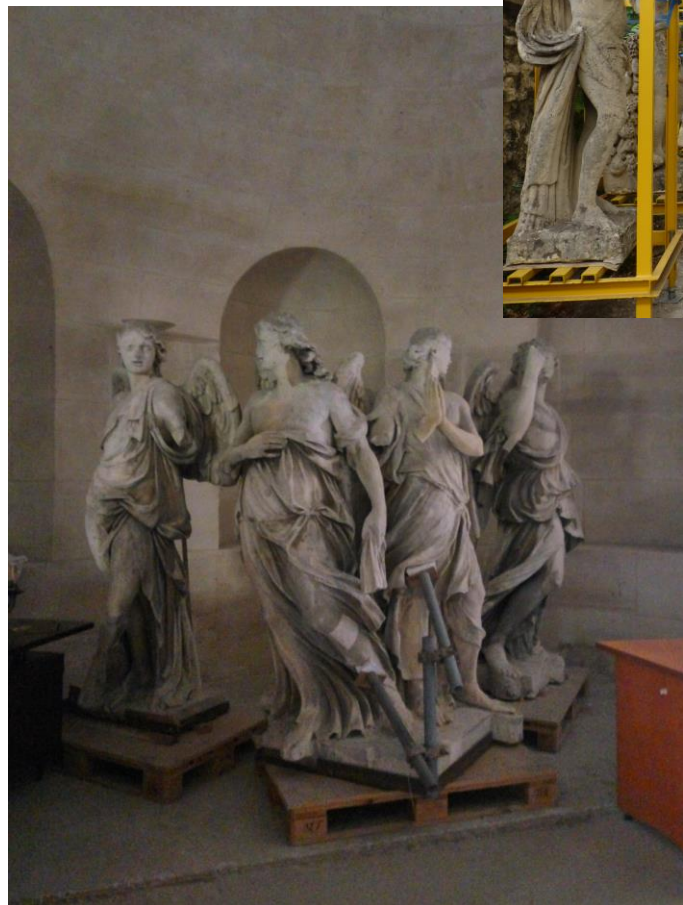
- thiobactéries aérobies, anaérobies,
- nitrobactéries et bactéries autotrophes,
- les bactéries calcifiantes,
- les champignons.
- les algues (cyanophycées, chlorophycées),
- les lichens,
- les mousses,
- les plantes supérieures.



QUELQUES ILLUSTRATIONS DE CHANTIER

Eglise Val de Grace :

Restauration des génies du tambour du dôme et des groupes sculptés du chevet



Maitrise d'ouvrage OPPIC sous la maitrise d'œuvre
de Stefan MANCIULESCU, ACMH

Eglise Val de Grace :

Restauration des génies du tambour du dôme et des groupes sculptés du chevet

Deux problématiques distinctes

Les génies des tambours

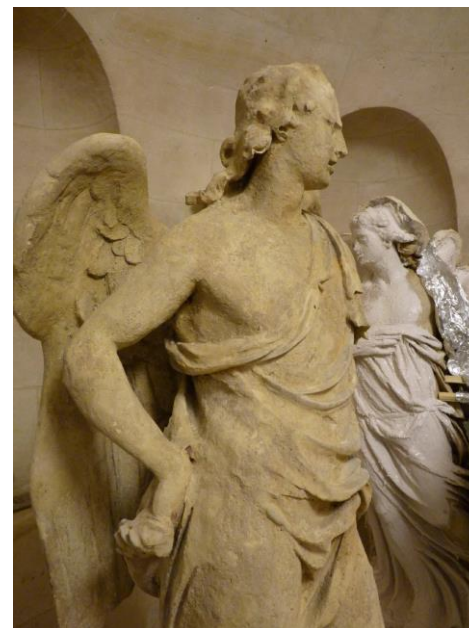
Très altérés – restauration minimale des mieux conservés

Sculpture neuve en remplacement



Les anges du Chevet

Groupes sculptés très altérés et fragiles
Copies par moulage et restauration des originaux



Eglise Val de Grace :

Restauration des génies du tambour du dôme et des groupes sculptés du chevet



Les génies des tambours du dôme



Reconnaissance des types de calcaire
Pétrographie, porosité ouverte, densité apparente..
Bancs du Lutétien Moyen du bassin Parisien :
« banc de Saint Leu » caractérisé par la présence de
fossiles typique
Mesures de la contamination saline et
microbiologiques
Étude de l'encrassement et de l'altération superficielle

Eglise Val de Grace :

Restauration des génies du tambour du dôme et des groupes sculptés du chevet

Recherche des bancs en exploitation en carrière avec dimension compatible et propriétés voisine
Obtention et des paramètres pétrophysiques..

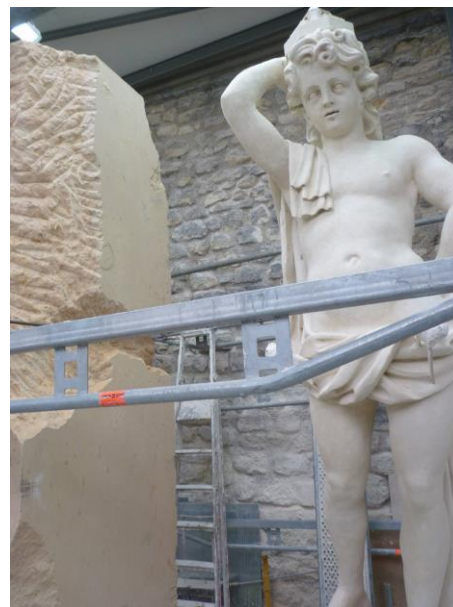


	épreuve 1	épreuve 2
Masse volumique apparente (Moyenne des mesures sur huit fragments).	1 981 Kg/m ³	1 972 Kg/m ³
Porosité ouverte à l'eau (Moyenne des mesures sur six fragments).	25,6 %	25,8 %
Mesure de la vitesse de propagation des ondes sonores (Moyenne de mesures des 3 axes sur éprouvettes)	2 880 m/s	3 159 m/s
Mesure de la résistance en compression	16,05 MPa ⊥ au lit	26,20 MPa // au lit

Echantillon	Masse volumique apparente (ρ _a en kg/cm ³)	Porosité totale (p en %)	Résistance à la compression en MPa	Vitesse du son (m/s)
Saint Maximin* Liais dur	2400-2600	5-6	100-120	2400-2600
Saint Maximin* Roche fine	1600-1800	30-40	8-15	2500-3200
Saint Maximin* Roche de construction	1700-1800	30-40	7-11	2500-3500
Pierre de Noyant* Aisne	1600-1750	35-40	7-13,7	2600-2800
Saint Pierre d'agle* Dure coquillée	2310	14,4	60	4200
Saint Pierre d'agle* Demi-dure	1870	30	14,3	2830
Saint-Vaast*	1500-1700	37-44	5-10	1900-2220
Clamart** Cliquart	2455	-	45-66	-
Clamart*** Roche	2300	-	20-68	-
Saint-Leu***	1560-1790	33-45	5-21	1700-2600
Villiers Adam***	1710	-	8-10	-
Roche et banc franc de Gentilly et d'Arcueil**	2067	-	22,5	-
Banc franc de Vitry**	2160	-	31,8	-
Liais de Bagneux**	2485	-	68,8	-
Pierre de Bagneux**	2210	-	27	-

Eglise Val de Grace :

Restauration des génies du tambour du dôme et des groupes sculptés du chevet



Les génies des tambours du dôme

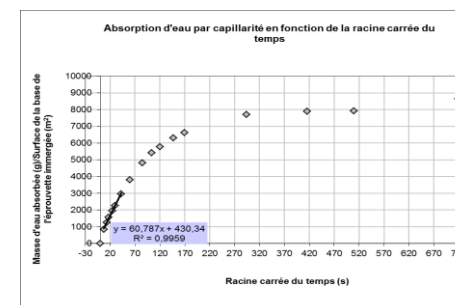
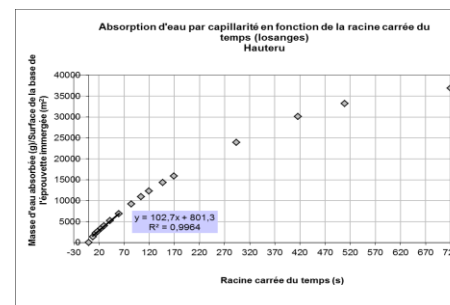
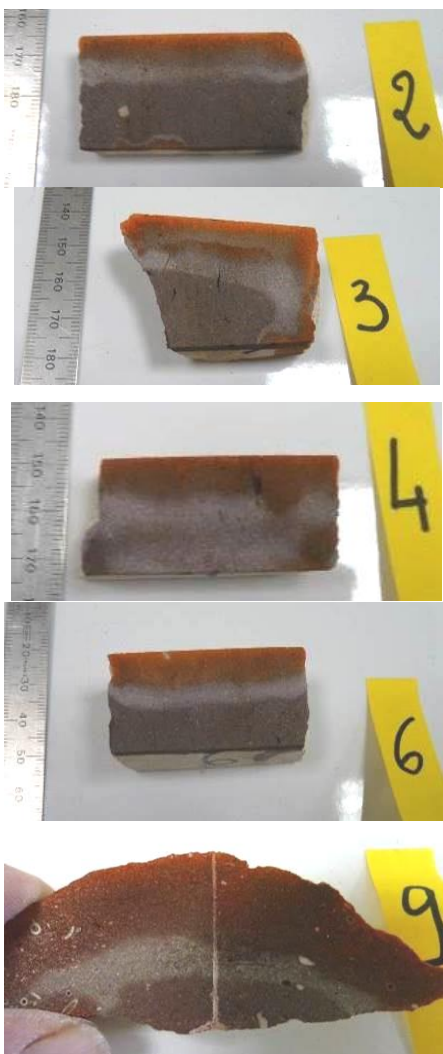
Suivi de l'approvisionnement, recherche des défauts avec les sculpteurs



Eglise Val de Grace :

Restauration des génies du tambour du dôme et des groupes sculptés du chevet

Optimisation des protocoles de conservation,
Nettoyages, consolidations, ragréages



Courbes d'absorption capillaire en g/m² en fonction du temps sur deux éprouvettes de mortier Altar moulagé (ECP).

	Mortier ECP	Mortier CESA
Masse volumique apparente (Kg/m ³)	1 660 (3)	1 800 (3)
Porosité ouverte à l'eau (%)	31,4 (3)	29,9 (3)
Vitesse du son	2 198 (6)	2 748 (6)
Résistance en compression (MPa)	9,2 (2)	11,0 (2)

Eglise Val de Grace :

Restauration des génies du tambour du dôme et des groupes sculptés du chevet

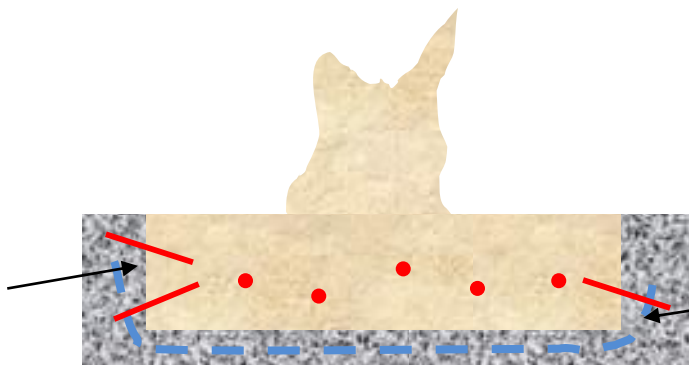


Eglise Val de Grace :

Restauration des génies du tambour du dôme et des groupes sculptés du chevet

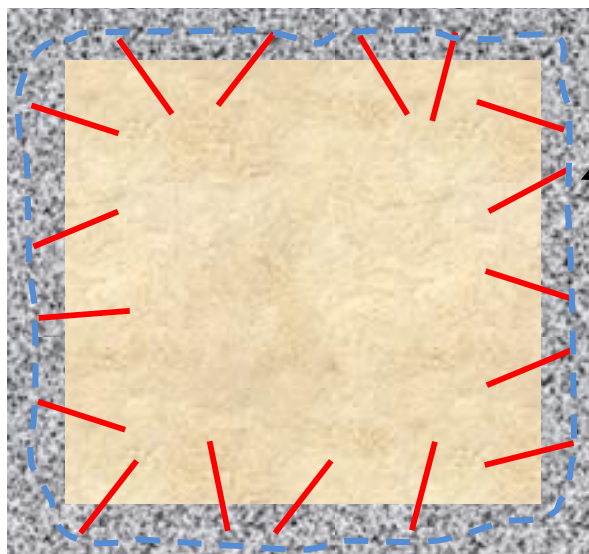
Vue en coupe

Goujon
fibre de verre

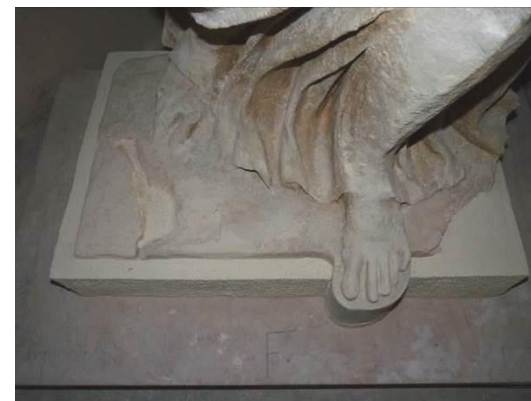


Armature polymère et verre
(grillage à maille carré)

Vue sommitale



Mortier de moulage



Eglise Val de Grace :

Restauration des génies du tambour du dôme et des groupes sculptés du chevet



Aspect et traitement par compresses de l'ange D après démoulage

Eglise Val de Grace :

Restauration des génies du tambour du dôme et des groupes sculptés du chevet



Exposition aux conditions atmosphériques des sculptures au fur et à mesure de leur réalisation (3ans de chantier)

Eglise Val de Grace :

Restauration des génies du tambour du dôme et des groupes sculptés du chevet

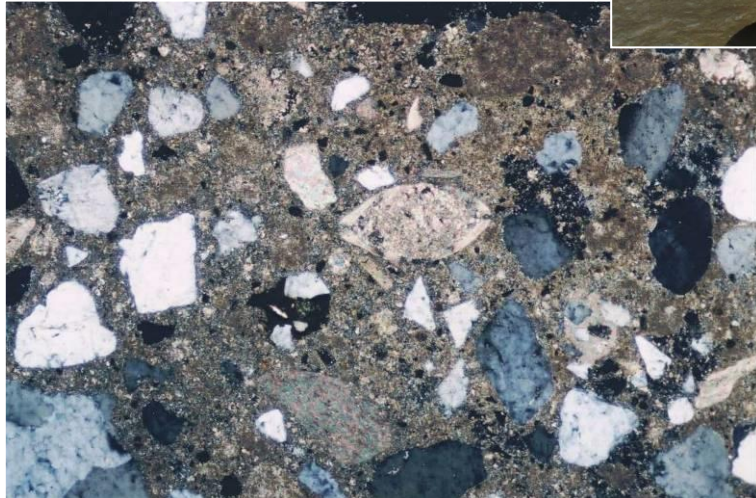
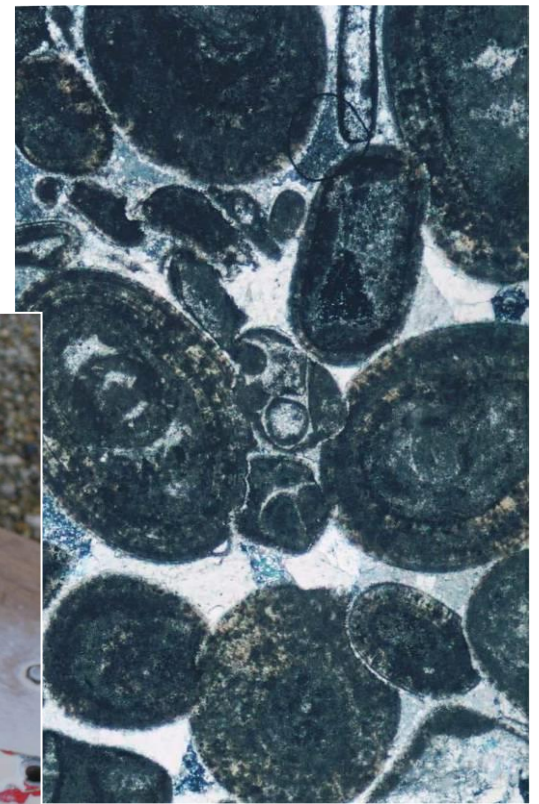




Chantier de la ville de Besançon sous la maîtrise d'œuvre de Paul Barnoud, Architecte en chef des monuments historiques

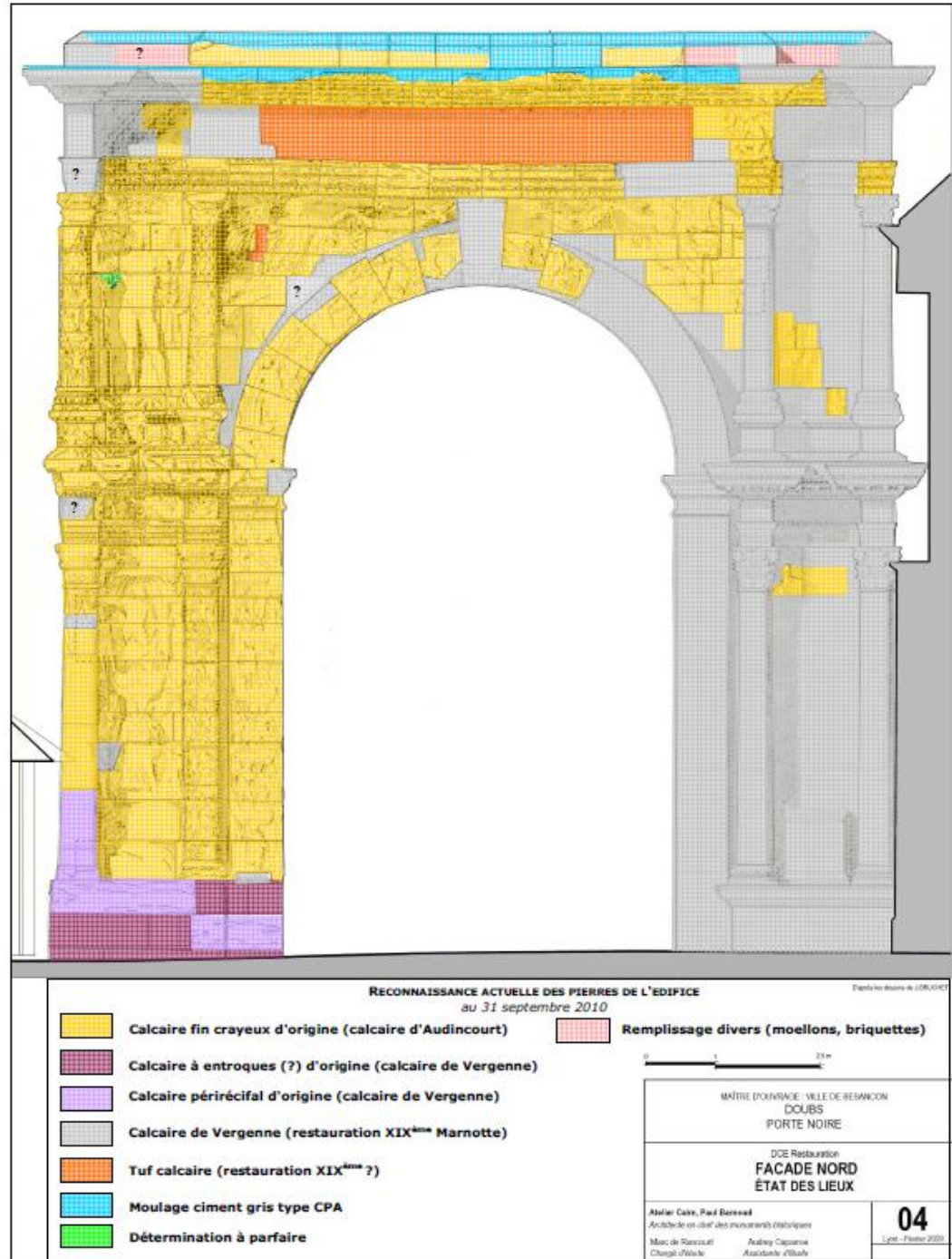


La Porte Noire de Besançon



Caractérisation des divers matériaux présents
pierres, mortiers XRD, MO, MEB-EDS,
caractéristiques pétrophysiques,....

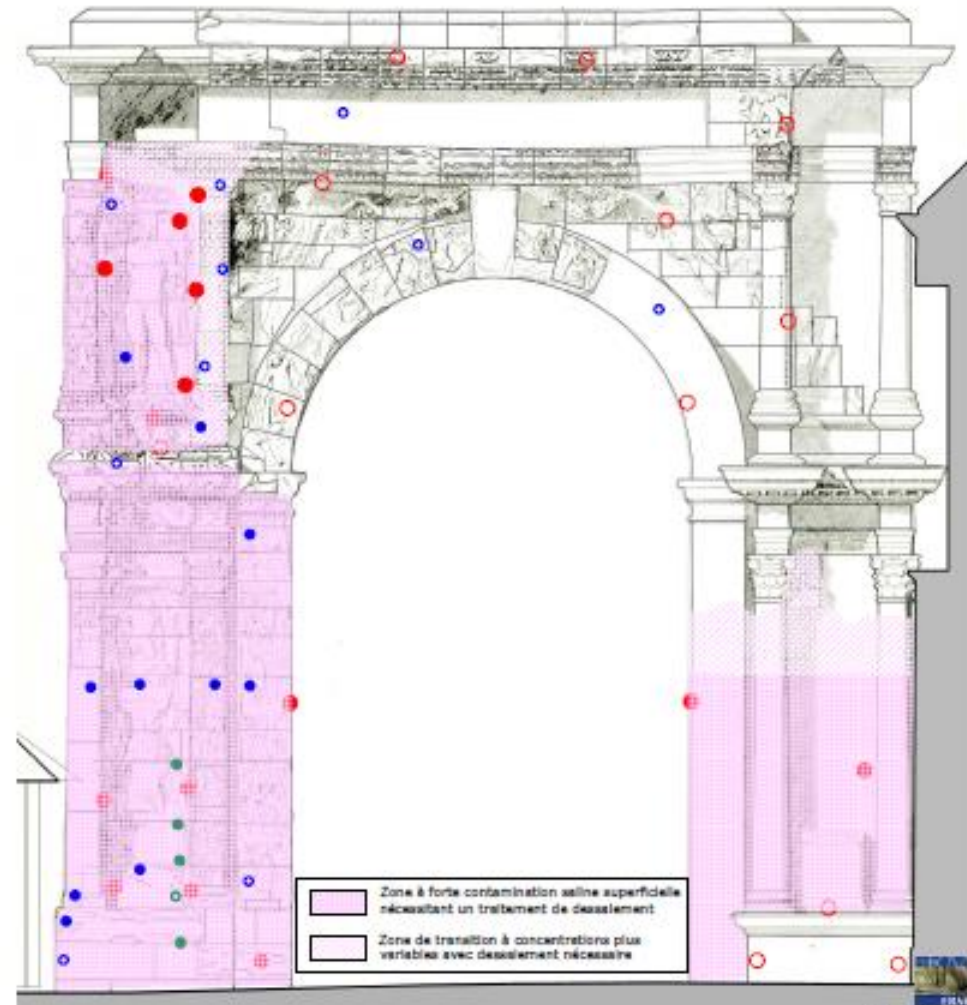
Identification et caractérisation des
 différentes pierres du bâtiment,
 Recherche de l'origine
 Recherche de pierres avec des
 propriétés compatibles pour les
 quelques rares remplacements :
 (Propriétés physiques, mécaniques et
 apparence)



Campagne de prélèvements et de mesures quantitatives des sels solubles présents dans la pierre en surface et en profondeur

Mesure de la porosité superficielle de la roche « in situ » (pipette de Karsten, test à la goutte ou à l'éponge)

Carte de répartition pour prédire et localiser la possibilité d'un traitement de dessalement



Description des prélèvements :

- Prélèvements présentant des teneurs élevées en chlorures et/ou nitrates (cette étude).
- Prélèvements à faible contamination (cette étude).
- Prélèvements "contaminés" de l'étude préalable de 1990 - Gérard Aubert et Lionel Leblève
- Prélèvements à faible contamination (1990)
- Prélèvements "contaminés" de l'étude préalable de 1994 - M. PRUNET et J.D. MERTZ
- Prélèvements à faible contamination (1994)

MUR DE CONVOIEMENT, ÎLE DE SEBASTIEN
DOUBBS
PORTE NORD

DCS Restauration
FACADE NORD
ETAT DES LIEUX

Maître d'œuvre : Paul Girardot
Architecte en chef des monuments historiques :
Maître de l'œuvre : Claude J. Buisson Architecte : André Goussier
Assistante d'architecte : Béatrice J. Buisson

04
Lieu : 2004-2008



Figure 2 : Illustration des essais sur des parties très altérées. Vue générale et détail : localisation du prélèvement effectué (cadre vert)



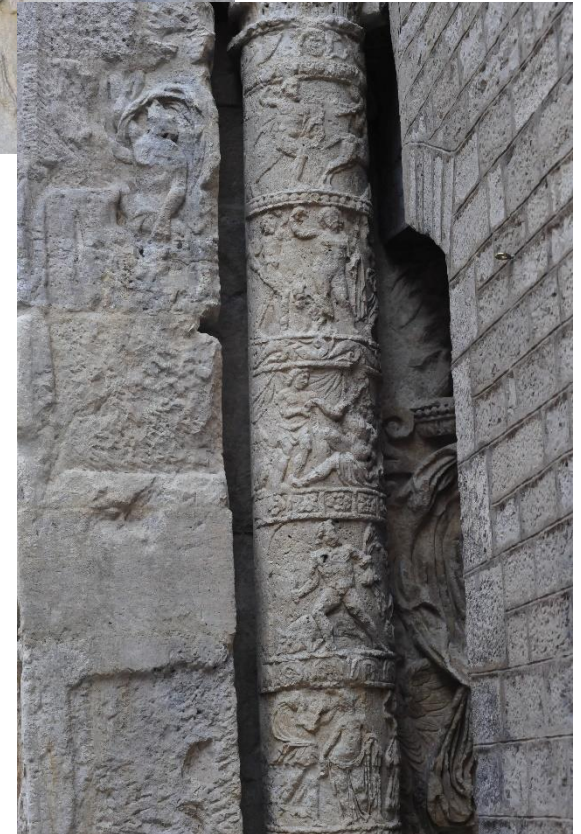
recommandation des techniques de nettoyage et d'enlèvement des croutes noires les plus adaptées après la réalisation de différents tests sur plusieurs sites et après analyses de contrôle in situ et en laboratoire





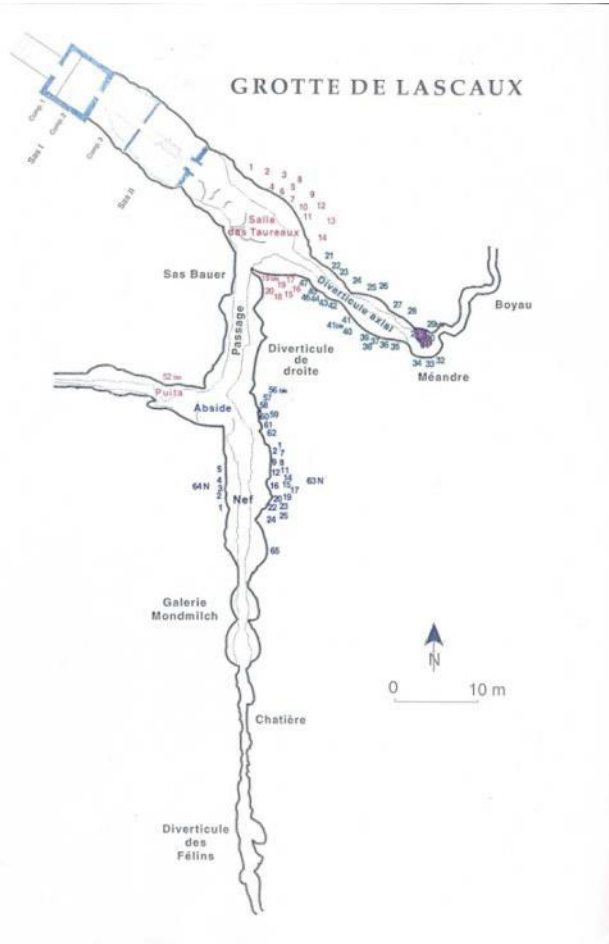
Analytical control and monitoring of various stages of implementation of various restoration





Le rendu final sur la
porte blanche de
Besançon
après 3 ans de
chantier

La grotte de Lascaux



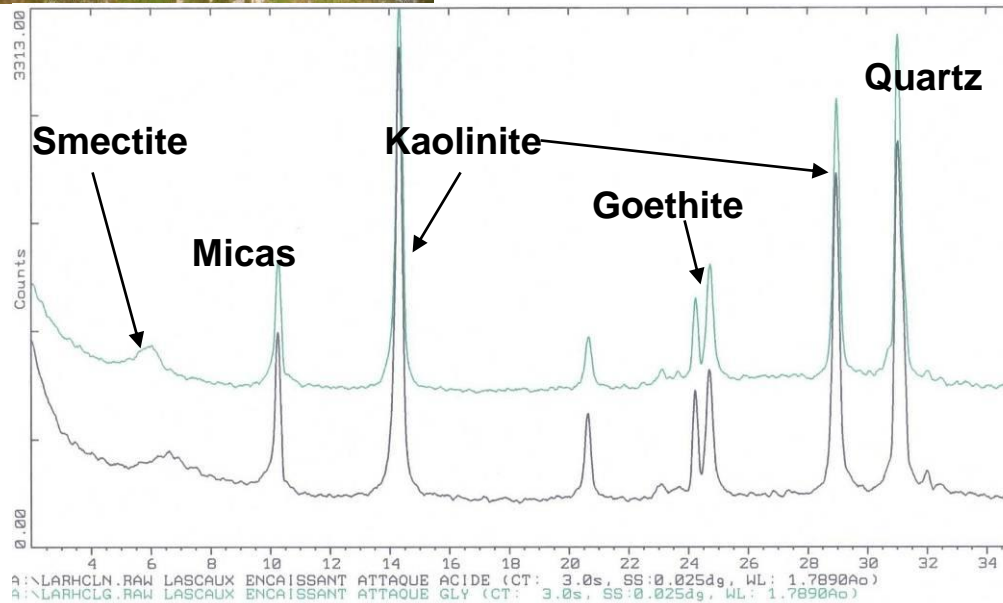
Focus sur la description et la caractérisation de différents matériaux géologiques et figures de l'enveloppe à différentes échelles (point, salle, cavité) En raison des possibilités d'analyse limitées (pas ou peu d'échantillons), recherche d'explications potentielles de phénomènes par analogie, Observations de structures et morphologies apparentes, recollement avec des noms déjà définis (Glossaire) - Intégration d'éléments dans la base de données de l'équipe multidisciplinaire

L'encaissant géologique



Sa composition minéralogique moyenne :

- de 65 à 80 % de carbonates
- 20 à 35 % d'insoluble à l'acide
- sable (quartz , feldspaths rares)
- phyllosilicates micas, kaolinite et argiles gonflantes,
- oxy-hydroxydes

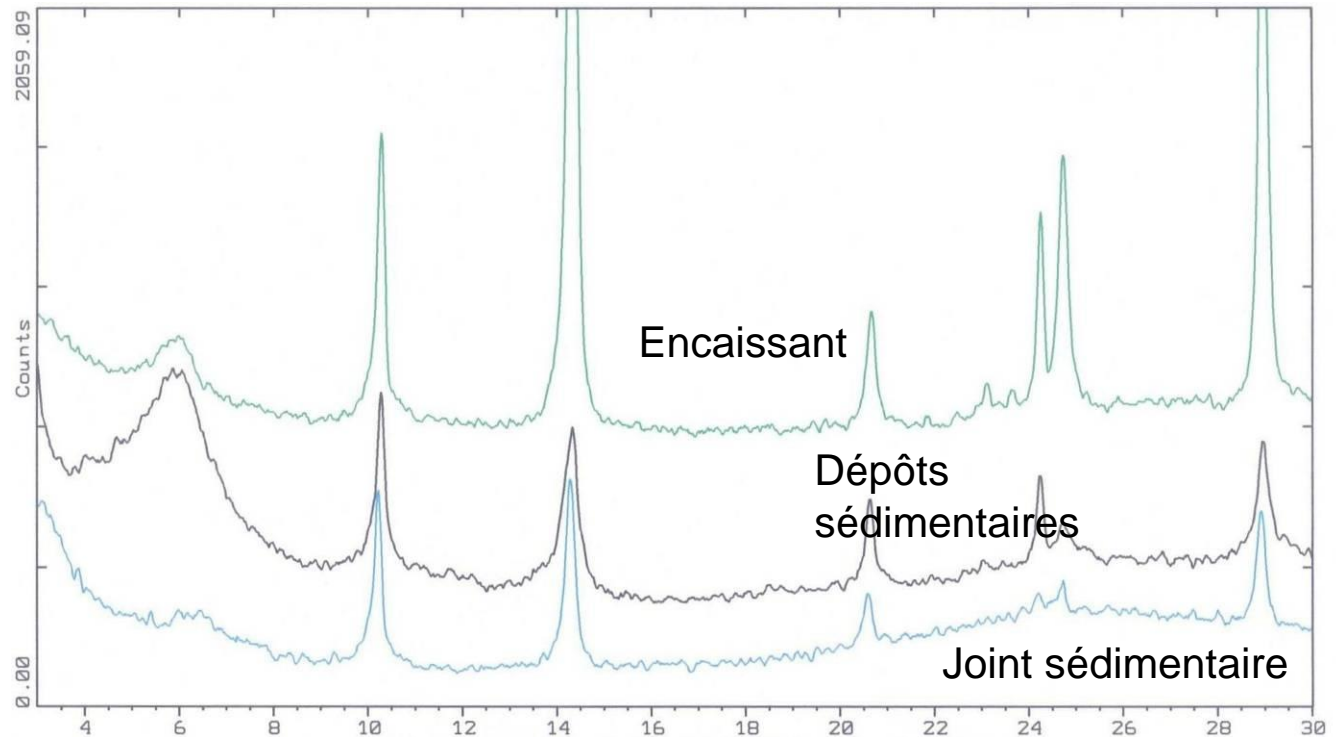


Les caractérisations minéralogiques

Les caractérisations réalisées sur les principales formations contenant des argiles dans la cavité

On remarque une grande similitude dans la nature des cortèges argileux des divers matériaux.

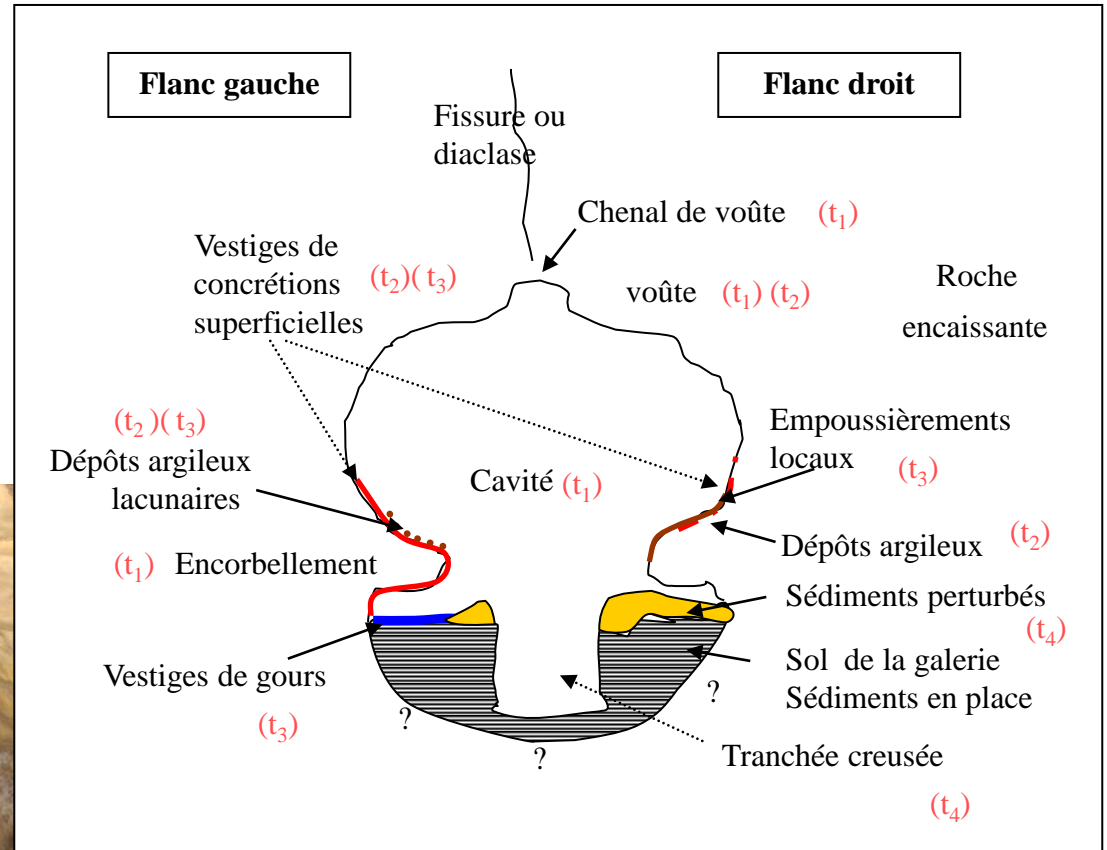
Cette similitude semble indiquer une origine commune de ces matériaux ou du moins



Lascaux



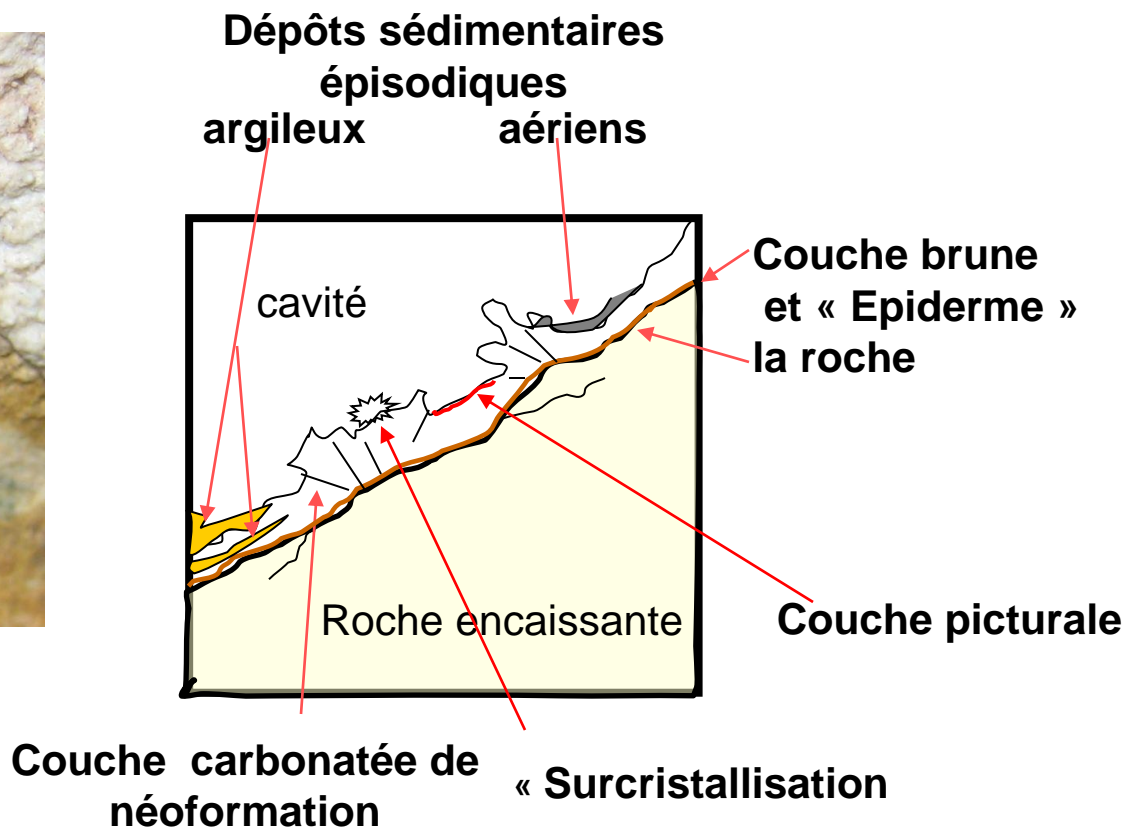
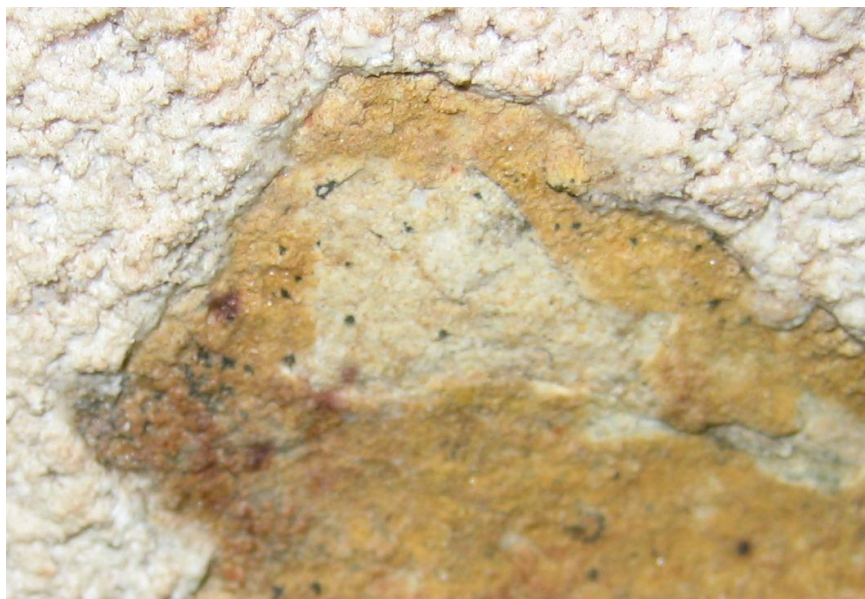
La cavité – Les morphologies



Section schématique du passage et positionnement chronologique supposé

La stratigraphie globale des parois

établie à partir des observations sur les zones moins perturbées





Nombreux types et morphologies d'altération
selon les mécanismes impliqués

Caractérisation des altérations à
différentes échelles
mécanique avec perte de matière :
écailles, fissures, éblouissement,
abrasion, ...
Dissolution chimique,
désintégration, croissance
secondaire, ...
Biologique, et combinaison de
différents facteurs

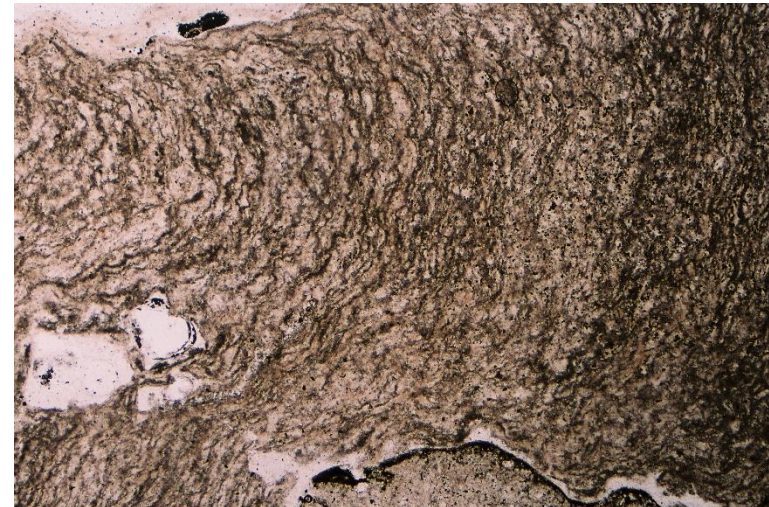
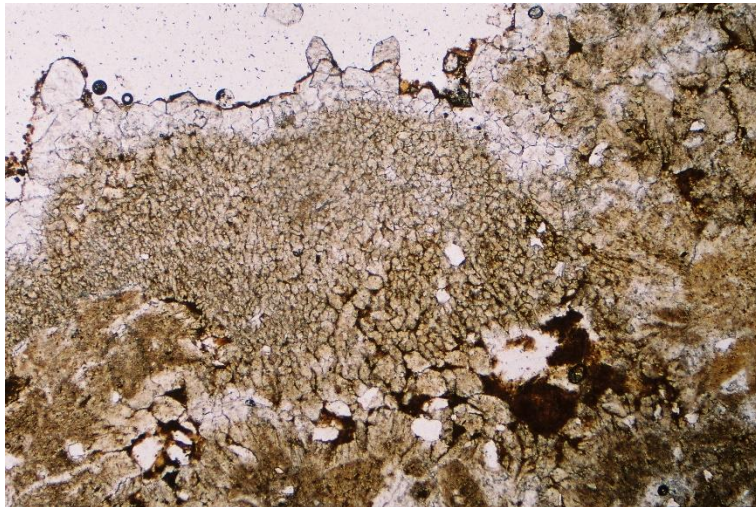


Caractérisation
pétrographiques des divers
dépôts au microscope optique



**Recouvrements argilo-carbonatés
des pans inclinés**

**Recouvrements argilo-
carbonatés des pans inclinés**



**Formation carbonatée appelée Mondmilch
d'origine plus ou moins bactérienne**

Altération:

Variable en fonction de l'échelle d'observation

Figure typique de cycle de dissolution-
croissance sur une «formation de type grain de
riz» (Diverticule Axial)

