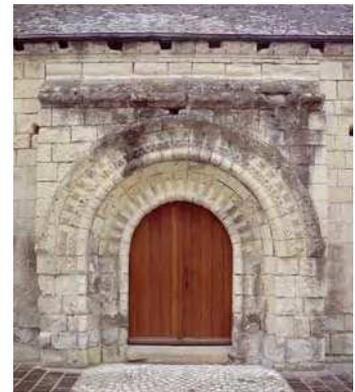
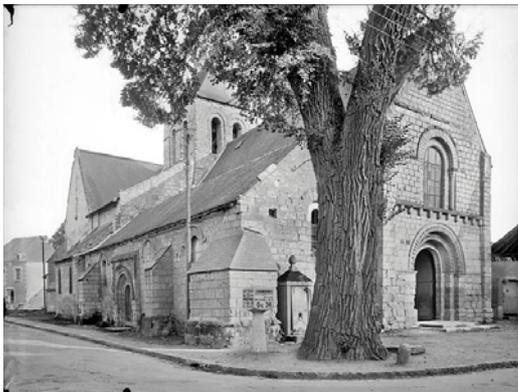


**Olivier ROLLAND**  
restaurateur de sculptures  
3 rue du Gué  
37270 Montlouis  
SIRET 379514 391 00034  
tél. 02 47 45 14 56; fax 02 47 45 14 60  
mobile 06 80 42 87 74  
e.mail: [olivierrolland@wanadoo.fr](mailto:olivierrolland@wanadoo.fr)

**Arnaud de SAINT-JOUAN,**  
Architecte en Chef des Monuments  
Historiques,  
5 quai Paul Bert,  
B.P.7245  
37072 Tours cedex 2,  
tél. 02 47 41 46 72, fax 02 47 51 93 36.  
[archi@saintjouan.com](mailto:archi@saintjouan.com)

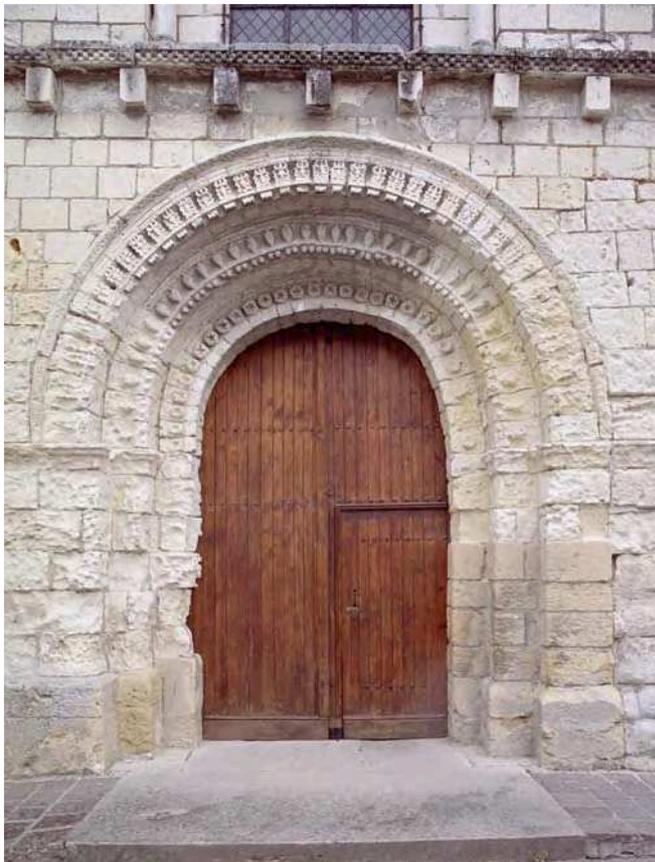
**Indre et Loire, L'ILE BOUCHARD,  
église Saint-Gilles, portails ouest et nord  
étude préalable à la restauration**  
Marché public de services N° 0572015002024554 du 27 mai 2005



Montlouis le 28 juin 2006

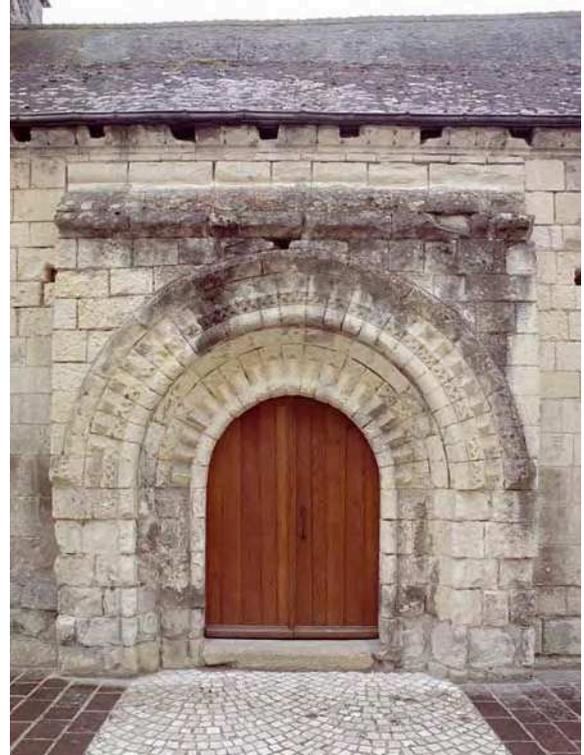


1. ↑ L'église Saint-Gilles, 2003, vue du nord-ouest. 2003-04-11-0020



2. ← Portail ouest. 2003-04-11-0013.

3. ↓ Portail nord. 2003-04-11-0008



## I) IDENTIFICATION, CONDITIONS DE CONSERVATION

Parties de monument citées en objet (figures 1 à 3 page 0, 4 et 5 page 1).

Dimensions portail ouest : hauteur 4,54 m, largeur 4,37 m, profondeur extérieure 1,07 m de l'extérieur du larmier d'archivolte au bois de la porte (dont larmier 0,14m), 0,27 m de ce point au mur intérieur.

Dimensions portail nord : hauteur 3,29 m du haut du larmier au sol, largeur 3,70 m, profondeur extérieure 0,91 m de l'extérieur du larmier d'archivolte au bois de la porte, 0,48 m de ce point au mur intérieur.

L'église est construite dans le lit majeur de la Vienne, une petite rivière, la Manse, passe à une vingtaine de mètres à l'est du chevet, dans un moulin dont le niveau d'eau supérieur est à deux mètres environ sous le niveau du sol de l'église. Le portail ouest est exposé aux pluies et au soleil, contrairement au portail nord ; les deux sont très ventilés. Les deux portails ont subi une pollution automobile importante dans la seconde moitié du vingtième siècle (source de gypse, voir note 3 page 17), avant l'actuel plan de circulation. On note une tache d'humidité persistante sur le contrefort nord du portail central (figures 6 à 8 page 2, et relevé figure 45 page 16). Le plâtre est très abondant sur le monument : voûtes (figures 9 et 10 page 3) et enduits intérieurs (figures 41 et 42 page 15) réalisés vers 1880 (voir éléments de documentation historique page 27), ragréages et rejointoiements de date indéterminés, scellements divers. Le sol autour est dallé de pavés de granite et marbre jointoyés de ciment ou chaux très hydraulique. Une lézarde le long de la façade sud traverse aussi la voûte au-dessus (figures 10 et 11 page 3).

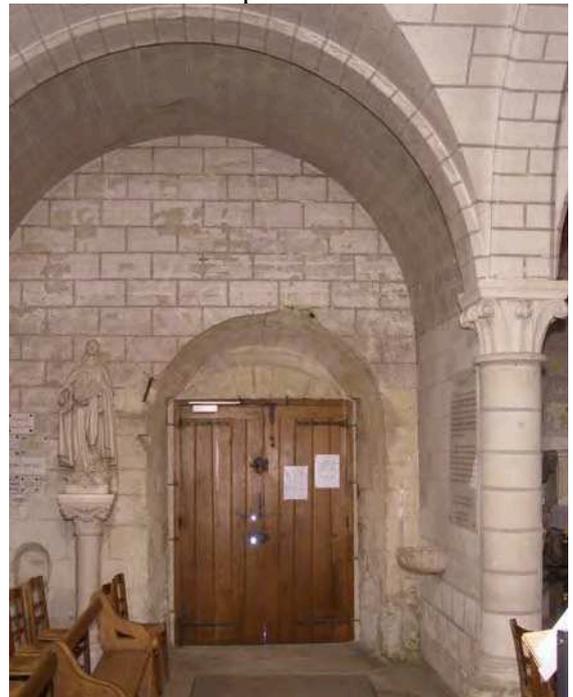
L'église est très fréquentée, avec des messes quotidiennes et la visite de nombreux pèlerins (voir éléments de documentation historique page 27), ses portes souvent ouvertes assurent une ventilation importante (relevé climatique figure 17 page 5)

La phase sur site de l'étude décrite ici s'est déroulée du 20 avril au 22 juin 2006.

4. ↓ Intérieur du portail ouest. P4200109



5. ↓ Intérieur du portail nord. P4200111





6. ← Tache d'humidité autour de la gouttière P4200026.

7. ↓ Vue prise du toit du collatéral vers la façade. Des débris s'accumulent dans le chéneau. P4280206



8. ← La descente de gouttière semble libre ; selon des témoignages oraux recueillis sur place elle refoule par temps de pluie ; un mètre ruban acier descend toutefois à l'intérieur à 50 cm sous le sol ; elle pourrait donc être bouchée plus loin ; le pied de cette descente de gouttière est scellé au ciment dans la trappe de visite au sol, ce qui rend la visite régulière pratiquement impossible. P4280192.



9. ← Voûtes du collatéral sud: briques posées et enduites au plâtre (photo prise depuis la trappe de visite sur la pente sud du toit ; le portail nord ouvre sous la voûte partiellement visible à gauche ; la fragilité des voûtes ne permet pas la visite). P5300005

10. ↓ Partie sud de la voûte de la nef, juste derrière la façade; photo prise du haut vers le bas, le sommet de la voûte est en haut sur la photo, l'ouest et le pignon sont à gauche, le mur sud est en bas, le toit en bas également; on remarque la lézarde montant du mur sud dans la voûte de brique et plâtre. P5300025



11. ↓ On retrouve la même lézarde, réouverte depuis un dernier rejointoiement, le long de la façade en haut du mur sud. P5240002



12. ↓ Voûte de la baie au-dessus du portail ouest: restes de rejointoiement au plâtre. P5020018 .



13. ↓ Grossi cinq fois environ, joint au-dessus du 1er claveau sud de la même baie (au centre de la figure 12) après prélèvement de LEML4 (voir document joint page 53 et suivantes) : aspect de la cassure fraîche et de la surface dissoute. P5020035



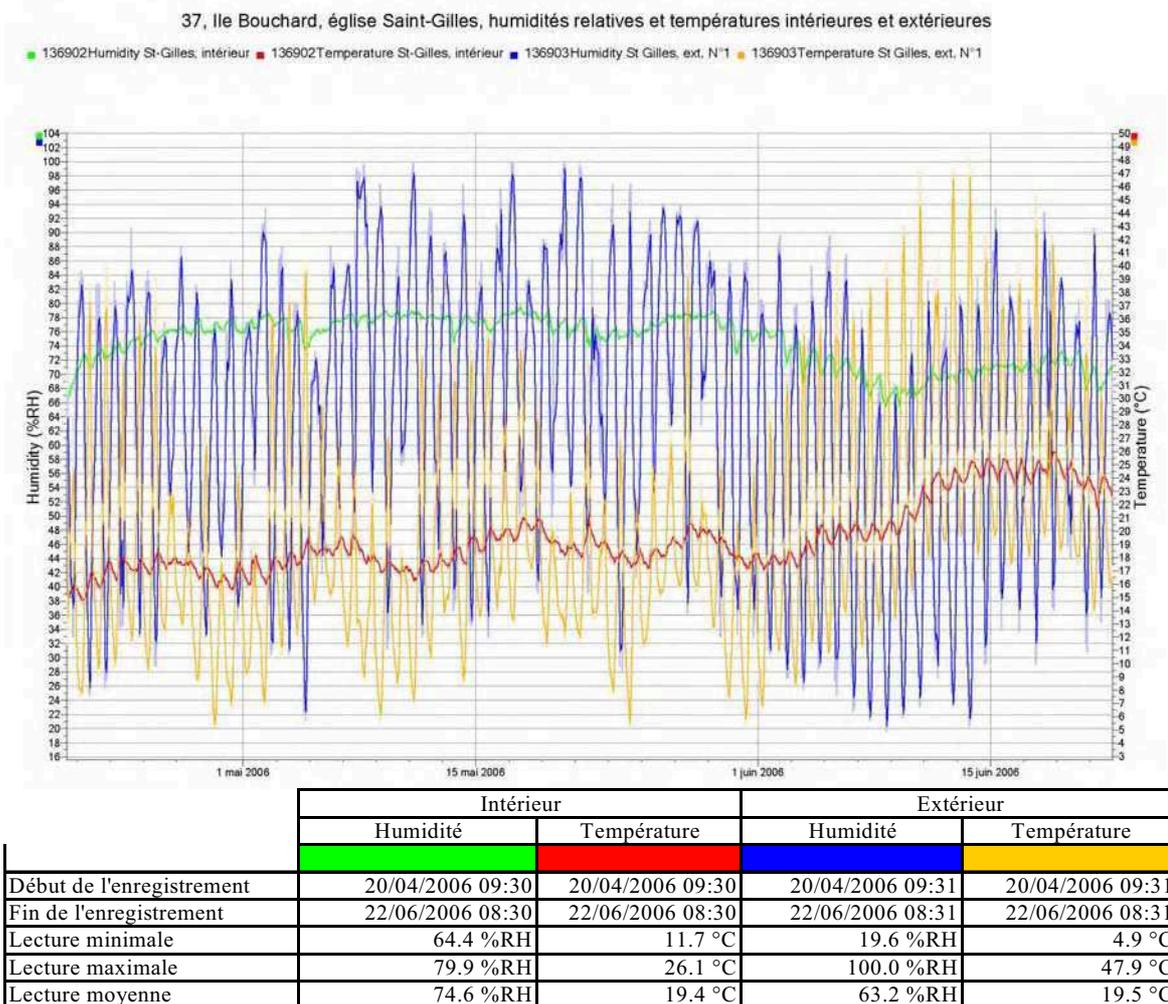
14. ← Façade ouest du collatéral, 6ème assise, joint vertical entre 2ème et 3ème bloc à gauche du contrefort, emplacement du prélèvement P5 (voir annexe : détermination de sels solubles et de matériaux, pages 47 et suivantes): restes de ragréage et rejointoiement à base de plâtre. Trop éloigné ici du portail probablement pour le contaminer, ce type de mortier a pu être plus abondant et disparaître ailleurs par dissolution. P4200028



15. → Détail grossi cinq fois environ, aspect « en éponge » typique du plâtre dissous par l'eau de ruissellement.



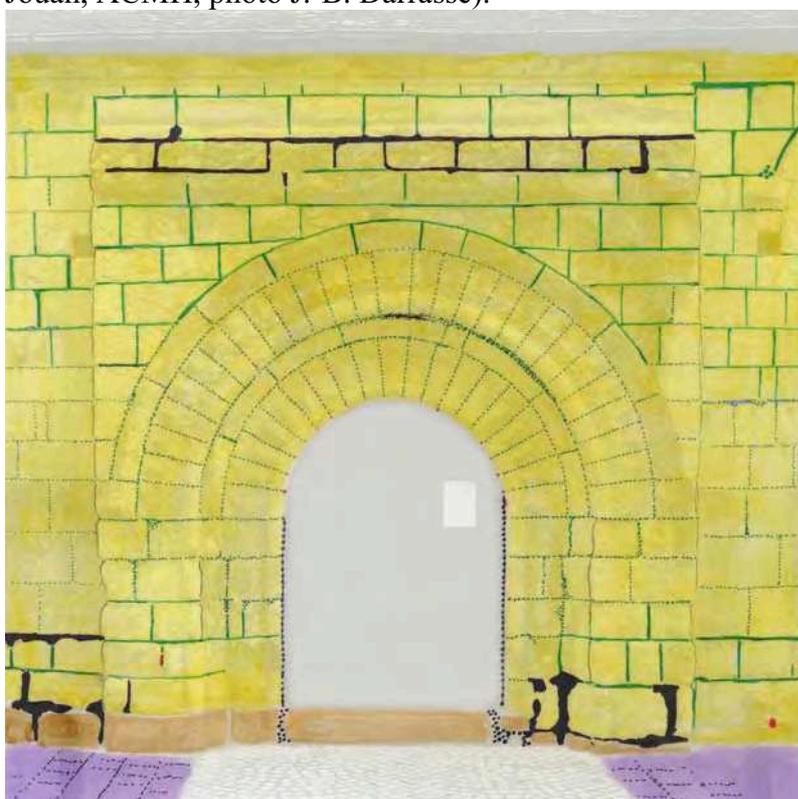
16. ← En bas de la baie ouest du collatéral: un autre type de mortier également à base de plâtre, de couleur grise, sur un plâtre blanc pratiquement pur, les deux avec un aspect « en picots » typique du plâtre exposé directement aux précipitations ; le tuffeau autour est profondément désagrégé très probablement par le gypse provenant du plâtre. Même remarque que figure 14. P4200090



17. ↑ Relevé de température et d'humidité intérieure et extérieure du 20 avril au 22 juin 2006. Capteur extérieur accroché sur le 3<sup>ème</sup> modillon de la corniche au-dessus du portail ouest, capteur intérieur au milieu en bas du garde-corps de la tribune d'orgue dans la nef, à environ 3 m du sol derrière la façade. Globalement dans cette période, l'intérieur de l'église est un peu plus humide, avec des variations de température et d'humidité très atténuées. La température maximale de 47,9° atteinte à l'extérieur s'explique par l'ensoleillement de la partie concernée. Les variations internes, atténuées, suivent assez bien les variations externes en raison de la ventilation relativement importante de l'édifice.



18. ↑ Relevé de constitution du portail ouest. (Dessin O.Rolland sur fond A.de Saint-Jouan, ACMH, photo J.-B. Darrasse).



19. ← Relevé de constitution du portail nord (même source).

Légende du relevé de constitution:

- Tuffeau
- Calcaires durs à grain fort (dalle devant portail ouest différente)
- Ardoise
- Tuile
- Bois (voussure portail nord uniquement)
- Fer (contour vide: acier inoxydable)
- Pavés de granit récents (marbre non représenté)
- Mortiers de gros sable, gravier et chaux, avec inclusions blanches
- Mortiers de sable et chaux (confusion possible avec mortiers précédents)
- Mortiers de gros sable et chaux
- Mortier de sable fin et chaux hydraulique
- Mortier de sable et chaux hydraulique
- Mortier imitation tuffeau indéterminé
- Plâtre pur (portail nord uniquement, hors zone de relevé pour portail ouest)
- Mortier imitation tuffeau: sable fin, poudre de pierre et chaux hydraulique ?
- Mortiers de ciment gris, avec plus ou moins de sable
- Mortier de sable fin et ciment gris
- Mortier de gros sable et ciment gris

## II) CONSTITUTION

### 1) Constitution d'origine ou éléments très anciens

#### a) Pierres, appareil

Sur le portail ouest, seuls les petits claveaux, le larmier, et les petits blocs de parement sont très probablement d'origine (bien visibles en haut à gauche sur la figure 18 page 6) ; les blocs de plus grande dimension autour des deux portails pourraient être des pierres d'un ou plusieurs remplacements anciens, événements qui pourraient également expliquer le décrochement et les trois blocs d'assise en sifflet, surmontés de cales de tuiles et d'ardoises, sur la façade ouest (15<sup>ème</sup> et 16<sup>ème</sup> assise à droite du portail figure 18 page 6) ; ces remplacements pourraient expliquer aussi la discontinuité d'appareil entre ébrasements et parement. Des ardoises dans les joints à la limite des deux appareils pourraient avoir été posées dans le but d'arrêter des remontées de salpêtre.

Sur le portail ouest comme, surtout, sur le portail nord, des blocs de faible épaisseur sur les ébrasements pourraient aussi correspondre à des remplacements de pierre (figures 20 et 21 page 8).

Dans tous les cas il s'agit d'un tuffeau clair type « tuffeau de Bourré », avec fossiles particulièrement abondants (exemples figure 14 page 4 et figures 48, 49 page 18, figure 50 page 19).

Les soubassements sont d'une pierre plus dure, jaunâtre, à grain plus fort (figures 22 et 23 page 8). Dans le portail ouest la différence de hauteur des assises de cette pierre dans les soubassements pourrait, elle aussi, correspondre à des remplacements anciens.

Seuils de pierre dure peut-être identique à celle des soubassements.

#### b) Mortiers

Mortiers de pose d'origine ou rejointoiements très anciens de chaux aérienne et sable:

- Mortier(s) de gros sable, gravier et chaux avec inclusions blanc-jaunâtre de chaux (figures 24 et 25 page 9, prélèvements P4 et P18 voir annexe page 47 et suivantes).
- Quelques amas de terre plus ou moins mêlée de chaux, provenant peut-être de la fosse où la chaux éteinte dut être conservée (figure 26 page 9, prélèvement P18b voir annexe page 47 et suivantes).
- Mortier(s) de sable et chaux qu'il n'a pas été possible de distinguer de mortiers plus tardifs sauf lorsqu'ils sont juxtaposés (figure 27 page 9, prélèvements P16 et P17 voir annexe page 47 et suivantes).
- Peut-être un mortier de jointoiement ou rejointoiement imitant le tuffeau (figures 34 et 35 page 13), de datation incertaine<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Ce type de mortier en couche très mince est observé sur divers monuments en tuffeau, notamment sur l'escalier du château d'Azay le Rideau, élevé au 16<sup>ème</sup> siècle.



20. ← Portail nord, ébrasement est : les blocs désignés par des flèches, 4<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> assises dans le prolongement du bandeau, sont très peu épais (on distingue le joint vertical au creux du bandeau). P5240034



21. Même portail, ébrasement ouest: même remarque 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> assise pour les P5240033



22. ← Portail ouest, ébrasement nord, 2<sup>ème</sup> assise, pierre dure d'origine ou ancienne, grandeur nature. P4200080

23. ↓ Détail grossi cinq fois environ. P4200081





24. ← Façade ouest, joint au-dessus de la 3<sup>ème</sup> assise à gauche du portail, 2<sup>ème</sup> bloc en partant de la droite. Mortier de pose supposé d'origine, grandeur nature: sable et chaux, cette dernière parfois visible en grosses inclusions blanc-jaunâtre. A gauche, rejointoiement au ciment. P4200047



25. ← Portail ouest, ébrasement nord, joint au-dessus de la 4<sup>ème</sup> assise, même type de mortier. P4200053

26. ↓ Portail ouest, 6<sup>ème</sup> assise du parement à droite, contre les pierres dures : terre mêlée de chaux. P5020043



27. ↓ Portail ouest, voussure, 3<sup>ème</sup> rouleau nord, coin supérieur du premier petit claveau, deux mortiers de sable et chaux, dont rejointoiement plus clair et plus récent en bas. P4280229.



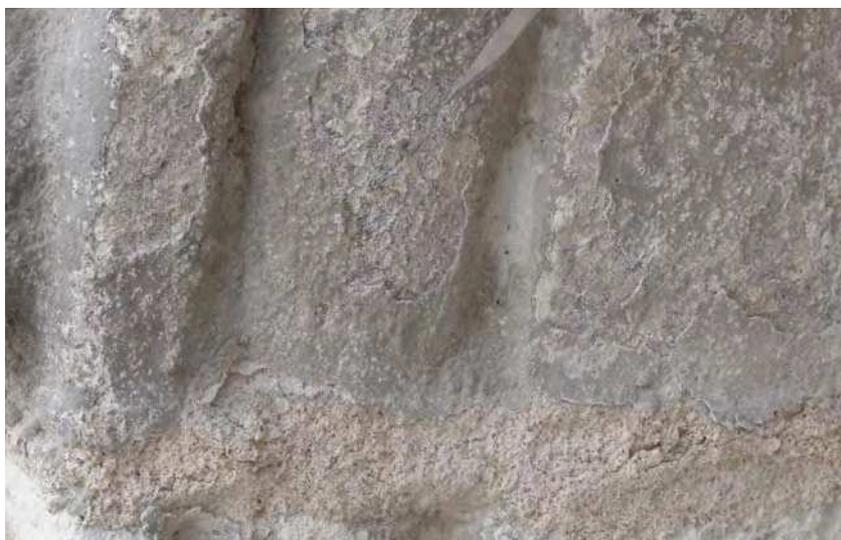


28. ← Portail ouest, vousure, 2<sup>ème</sup> rouleau, côté nord, photo centrée sur les 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> claveaux, détails ci-dessous : restes d'ocre rouge et éventuelle couche sombre, à confirmer. P5150002

29. ↓ Grandeur nature, détail de la figure 28, limite entre 6<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> claveau, détail ci-contre. P5150013



30. ↓ Grossi cinq fois environ : deux badigeons blancs couvrent des restes d'ocre rouge sur une couche blanche mince, sur un mortier de sable et chaux. P5150016



31. ← Grandeur nature, détail de la figure 28, bas du 7<sup>ème</sup> claveau, intrados : des sondages antérieurs à cette étude découvrent une couche sombre très lacunaire, à préciser par un complément d'observation sous microscope binoculaire. P5150016

c) **Polychromie**

Des restes d'ocre rouges sur sous-couche blanche sur les joints dans les parties très abritées du portail ouest (figures 28 à 30 page 10, figures 32 à 33 page 12), et éventuelle couche sombre à préciser (figure 31 page 10).

2) **Autres interventions**

Outre les éléments très anciens mentionnés ci-dessus :

- Au moins trois badigeons de chaux (figures 32 à 33 page 12).
- Rejointoiement très partiel et réparations de gros sable et chaux tout en bas du portail ouest.
- Restes de jointoiement ou rejointoiement dans la voussure du portail ouest, imitation de tuffeau à base de chaux, chronologiquement entre deux badigeons de chaux (figures 36 et 37 page 13, prélèvement P26a).
- Cheville de bois, de fonction indéterminée, dans le portail ouest (figure 38 page 14).
- Reste de mortier imitant la pierre et son appareil sur le parement en haut à gauche du portail ouest, apparemment à base de chaux, peut-être légèrement hydraulique ou additionnée de ciment blanc (figures 41 et 42 page 15, prélèvements P27 voir annexe page 47 et ERML3 voir document joint page 53 et suivantes) ; ce mortier est antérieur à 1890 (voir éléments de documentation historique page 27, figure 69 page 26).
- A l'intérieur de l'église, notamment au dos des portails, enduit de mortier imitation pierre en faux appareil ; contrairement au précédant celui-ci contient apparemment du plâtre (figures 41 et 42 page 15, prélèvement P27 voir annexe page 47 et prélèvement ERML3 voir document joint page 53 et suivantes) ; cet enduit date très probablement de 1880 ; il a en partie disparu au bas des murs, peut-être notamment suite aux inondations (voir éléments de documentation historique page 27).
- Reste de rejointoiement au plâtre dans des parties très abritées sur le portail nord (figure 43 page 15).
- Très nombreux clous, industriel pour la plupart (exemple figure 36 page 13), quelques uns de fer forgé, accrochages de décors temporaires anciens (rameaux, mariages, pompes funèbres etc.).
- Plusieurs rejointoiements de chaux hydraulique et sable ou en bas des portails, de ciment additionné de plus ou moins de sable (figure 44 page 15).



32. ← Portail ouest, voussure, 1er rouleau, côté sud, 9ème claveau, grandeur nature: restes de badigeons et poussières, détail figure 33. P4280294



33. ← Grossi cinq fois environ, détail de la figure 32: la poussière recouvre un badigeon blanc épais très irrégulier, sur une nouvelle couche de poussière épaisse, sur un badigeon plus mince, sur un encrassement ocre, sur un

badigeon blanc mince, lui-même peut-être sur une quatrième couche blanche, le tout sur des restes d'ocre rouge ou de rouge, sur une sous-couche claire. On remarque la teinte plus grise et plus sombre de la couche de poussière la plus récente tout en haut. P4280296

34. ↓ Portail nord, sur les petits blocs au-dessus de l'extrémité est du 3ème bloc de la troisième assise du talus au-dessus du portail, détail figure 35. P5300060



35. ↓ Détail grossi cinq fois environ: en haut sur la photo, badigeon de chaux ; en bas : restes, apparemment d'un jointoiment très mince, imitant le tuffeau, peut-être d'origine, sur un mortier de sable et chaux. P5300067.



36. ↑ Portail ouest, voussure, côté sud, 1<sup>er</sup> rouleau, côté nord, restes de jointoiment ancien imitant le tuffeau, détail figure 37. P4280290

37. → Grossi cinq fois environ, partie en bas à droite sur la figure 36. Le jointoiment ancien imitant le tuffeau, un peu plus jaune que ce dernier ici, passe sur un badigeon blanc, il n'est donc pas d'origine, il est recouvert par un second badigeon blanc. Ce mortier est plus épais que celui de la figure 35. P4280292





38. ← Portail ouest, voussure, 1<sup>er</sup> rouleau, côté sud, 6<sup>ème</sup> claveau, cheville de bois de fonction indéterminée (était couverte par un mortier analogue à celui de la figure 37 page 13, elle est donc antérieure ou contemporaine). P4280298



39. → Façade ouest, à gauche du portail, 4<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> assise au-dessus de la petite corniche : grand ragréage ancien imitant le tuffeau. Détail figure 40. P4200094



40. ← Détail grossi cinq fois environ, sondage sur le bas du ragréage de la figure 39 : le mortier imitant le tuffeau, à droite sur la photo, est en fait posé sur le même mortier qui dessine les faux joints (un faux joint ici en bas). P4200098.



41. ↑ Portail ouest, intérieur, ébrasement sud, contexte de la figure 42. P4200112



42. → Détail, au milieu de la figure 41, grossi cinq fois environ, après prélèvement P27 (voir annexe page 47) et LEML3 (voir document joint page 53 et suivantes), mortier datant de 1880, imitant le tuffeau, probablement au plâtre : aspect de la cassure. P4200115.

43. ↓ Portail nord, voussure, 1<sup>er</sup> rouleau, côté est, 1<sup>er</sup> claveau : restes de bouchages et de rejointoiement au plâtre. P5240026



44. → Portail ouest, ébrasement nord, 5<sup>ème</sup> assise, reste de rejointoiement partiel à base de ciment. On remarque le recul du tuffeau, rongé sur plusieurs centimètres d'épaisseur depuis la pose du mortier. P4200042



45. ↑ Relevé des altérations du portail ouest. (Dessin O.Rolland sur fond A.de Saint-Jouan, ACMH, photo J.-B. Darrasse).



46. ← Relevé des altérations du portail nord. (Même source).

Légende du relevé des altérations:

-  Perte de matière
-  Cassure, fissure profonde ou joint ouvert
-  Désagrégation due aux sels, profonde à superficielle
-  Désagrégation sous déplaquage
-  Fissure superficielle liée aux sels, bord de déplaquage
-  Boursoufflures, cloques dues aux sels
-  Desquamation due aux sels
-  Exfoliation due aux sels
-  Epiderme induré par les sels
-  Poussière
-  Humidité
-  Mousse
-  Lichens ou algues vertes
- Non représenté: érosion

### III) ALTERATIONS

#### 1) Sels et pertes de matière consécutives

Altérations typiques de l'action de sels solubles:

- désagrégation prenant deux aspects bien distincts :
  - o désagrégation superficielle ou pulvérulence évoluant très rapidement (figure 47 page 18, figure 44 page 15)
  - o désagrégation profonde, évoluant souvent plus lentement (figures 50 et 51 page 19, 52 et 53 page 19)
- fissuration superficielle (figures 48 et 49 page 18, figures 50 et 51 page 19, figures 54 à 56 page 20)
- déplaquage,
- exfoliation,
- boursoufflures et cloques sans induration notable, liée à une désagrégation plus ou moins profonde et souvent une exfoliation, en hauteur,
- induration superficielle, parfois boursoufflée et cloquée, près du sol.

Le tuffeau est plus touché que la pierre dure.

Les analyses (voir annexe page 47 et suivante, et rapport ERM en document joint page 53 et suivantes) montrent qu'il s'agit de chlorures, nitrates et sulfates, c'est à dire la quasi-totalité des anions les plus couramment impliquées dans ce type d'altération.

Les nitrates et chlorures semblent liés surtout à la désagrégation superficielle évoluant très rapidement, alors que les sulfates semblent liés à la désagrégation profonde, évoluant souvent plus lentement ; cette séparation est particulièrement nette sur le portail ouest (figures 60 et 61 page 22). En hauteur, nitrates et chlorures sont relativement moins abondants que le gypse, un sulfate moins soluble qu'eux, alors qu'ils montent normalement plus haut par remontée capillaire<sup>2</sup>. Ceci indique que nitrates et chlorures proviennent du sol par remontée d'eau capillaire, alors que le gypse provient de sources plus élevées : pollution atmosphérique et nombreuses interventions au plâtre mentionnées plus haut probablement<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> Andreas ARNOLD: « Evolution des sels solubles dans l'altération et la conservation des monuments » dans ICOMOS : *Enduits dégradés par les sels : pathologies et traitements, dossier technique n°6-2004/*

<sup>3</sup> Le gypse est le minéral constituant le matériau plâtre. C'est un sulfate de calcium bi-hydraté. Soluble dans l'eau à raison de 2,7 g/l, il est stable en milieu sec mais, en milieu humide, il peut produire des dommages analogues à ceux du salpêtre (un nitrate de potassium hydraté, autre sel encore beaucoup plus soluble). Le sel est transporté par l'eau et cristallise où celle-ci s'évapore ; c'est la poussée des cristaux de sels dans la surface de la pierre qui la désagrège. Les sculptures sont particulièrement touchées en raison de leur rapport surface/volume qui favorise l'évaporation, et des nombreux endroits semi-exposés qu'elles présentent, souvent humidifiés mais jamais lavés par la pluie. L'emploi du plâtre est malheureusement traditionnel tant en couverture qu'en taille de pierre dans le Val de Loire au dix-neuvième et vingtième siècle ; le gypse peut également provenir de la pollution, par réaction sur la pierre des dérivés du soufre contenu dans les résidus de combustion des produits pétroliers ou du charbon ; enfin, le gypse est parfois naturellement présent dans la pierre de carrière, ou peut se former par la dégradation des pyrites naturellement présentes.



47. ← Portail ouest, ébrasement nord, tuffeau rongé par une désagrégation superficielle pulvérulente évoluant très rapidement. Le scalpel en haut pointe le recul du tuffeau depuis le dernier rejointoiement à base de ciment. P4200052



48. → Portail ouest, larmier, 2ème bloc à gauche, fissuration liée aux sels solubles, détail ci-dessous. P4200105



49. ←  
Détail  
gros  
cinq  
fois  
environ:  
très  
nombreuses  
fissures  
plus ou  
moins  
parallèles  
produisant  
un  
feuillete  
dans le  
tuffeau  
P4200105



50. ← Portail ouest, voussure, 3ème rouleau, côté nord, 14ème claveau, angle inférieur gauche, grandeur nature: fissuration superficielle et désagrégation liée aux sels solubles, détail ci-dessous. P5150032

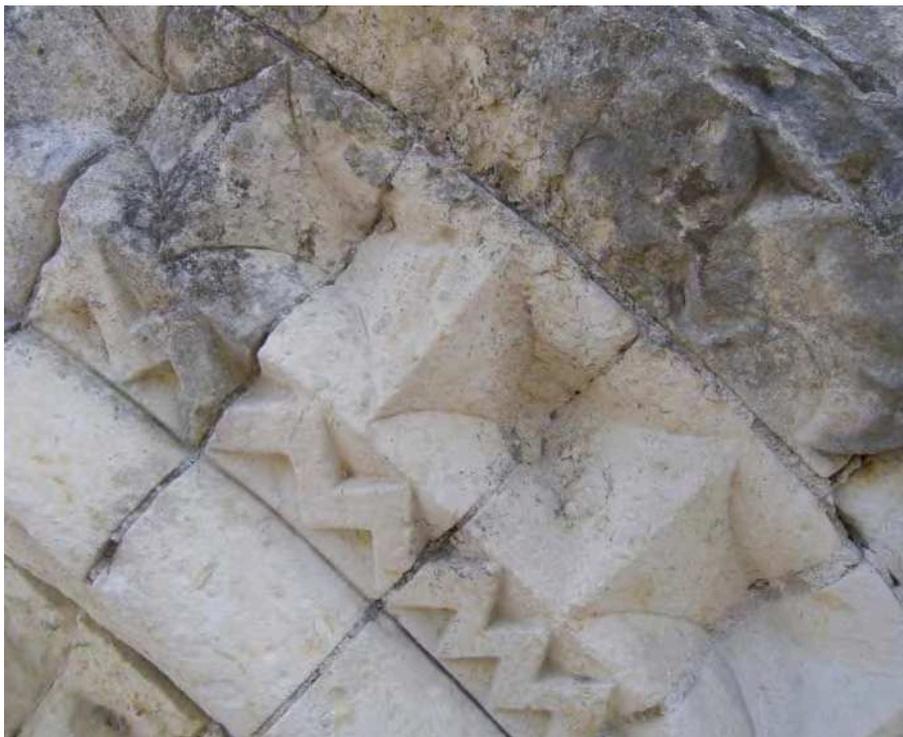
51. Détail grossi cinq fois environ. P5150028.



52. ← Juste sous la grande corniche au-dessus du portail ouest, contre le 9<sup>ème</sup> modillon (partiellement visible à gauche sur la photo, largeur du champ 20 cm environ) : tuffeau désagrégé, boursoufflé par l'action des sels solubles, sulfates en particulier : voir ERMD2 figure 60 page 22. P4280272



53. ← Détail grossi cinq fois environ du tuffeau sous une feuille de tuffeau détachée pour le prélèvement ERM2 mentionné ci-dessus. On distingue les cristallisations blanches des sels solubles. P4280275



54. ← Portail nord, voussure, 2<sup>ème</sup> rouleau, 8<sup>ème</sup> claveau, exfoliation au centre de la photo et sur le larmier en haut, fissuration sur le motif en zigzag (détails figures 55 et 56). P6220001



55. ← Détail grandeur nature. P6220003

56. ↓ Grossi cinq fois environ. P6220006





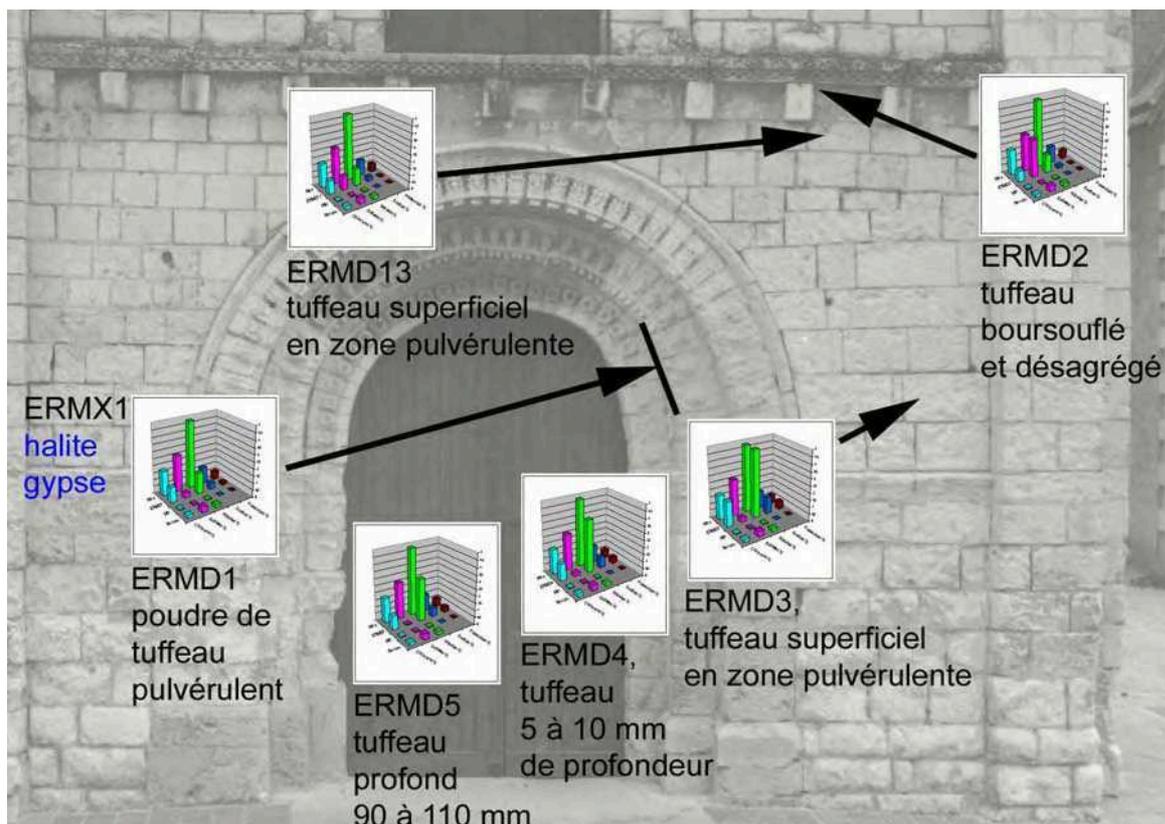
57. ← Portail nord, voussure, 1<sup>er</sup> rouleau : les deux types de désagrégation sont ici à l'œuvre : désagrégation superficielle évoluant rapidement et désagrégation profonde. P5300071



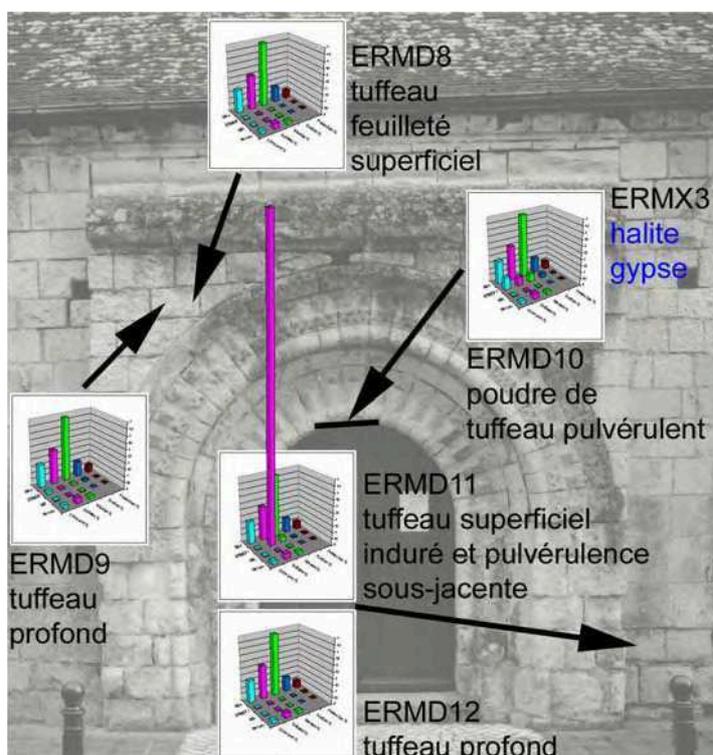
58. ← Façade ouest, 6<sup>ème</sup> assise au-dessus de la petite corniche, à gauche du portail. Pyrite altérée ? Emplacement du prélèvement P9 (voir annexe page 47 et suivantes) P4200101

59. ↓ Détail grossi cinq fois environ : efflorescences blanches. L'analyse de P9 indique une forte teneur en nitrate et chlorure, une faible teneur en sulfate. P4200103





60. ↑ Portail ouest, visualisation des résultats des dosages du laboratoire ERM (légende ci-dessous) : faible teneur en sulfate des zones pulvérulentes et du tuffeau profond, forte teneur en sulfate du tuffeau désagrégé à près de 5 m de haut (sulfate ERMD2 maximum sur le monument), forte teneur en nitrate et chlorure du tuffeau superficiel en zone pulvérulente (chlorure et nitrate ERMD3 maximums sur le monument) et du tuffeau profond, à près de 3 m de haut (ERMD5). (O.Rolland sur fond A.de Saint-Jouan, ACMH, photo J.-B. Darrasse).



61. ← Portail nord, idem (même source): très forte teneur en sulfate du tuffeau boursoufflé induré de gypse compact (ERMD11 près du sol, mais des indurations similaires se retrouvent plus haut), teneurs inférieures à celles du portail ouest. Cas ERMD8 : voir commentaire page 53.

Légende des figures 60 et 61 :



en bleu : sels solubles identifiés

Parmi les sources de gypse, le plâtre contenu apparemment dans le mortier imitation pierre à l'intérieur de l'église a notamment pu être mobilisé lors des inondations, de même le plâtre des voûtes, à l'occasion d'infiltrations<sup>4</sup>. La dégradation des pyrites est une source connue, de manière générale, mais dans le seul cas potentiellement important repéré sur le monument, les sulfates sont bien moins abondants que nitrates et chlorures (figures 58 et 59 page 21).

Le gypse est le seul sulfate soluble repéré à l'analyse ; les résultats des tests de dessalement laissent toutefois penser que des sulfates beaucoup plus solubles pourraient être présents (figure 94 page 36).

Les nitrates proviennent probablement ici des engrais agricoles dans la nappe de la Manse et de la Vienne.

Les chlorures proviennent probablement du sel marin appliqué contre le verglas, toutefois d'autres sources peuvent être envisagées : stockage de sel marin (chlorure de sodium et parfois chlorure de calcium), sel déshumidificateur (chlorure de calcium), ou d'eau de Javel (hypochlorite de sodium) souvent employée contre les algues vertes.

## **2) Cassures et pertes de fragments**

Cassures profondes et joints ouverts témoignant de mouvements dans le côté gauche du portail ouest, quelques unes dans le côté gauche du portail nord.

Cassures profondes d'origine à préciser, peut-être le gel après d'importantes infiltrations d'eau, dans le talus du portail nord.

Quelques épaufrures, petits accidents d'échelles pendant l'accrochage de décors temporaires probablement (nombreux clous témoins de ces accrochages).

## **3) Dépôts superficiels**

Poussières en couche épaisse dans les parties peu inclinées et très abritées (figure 31 page 10)

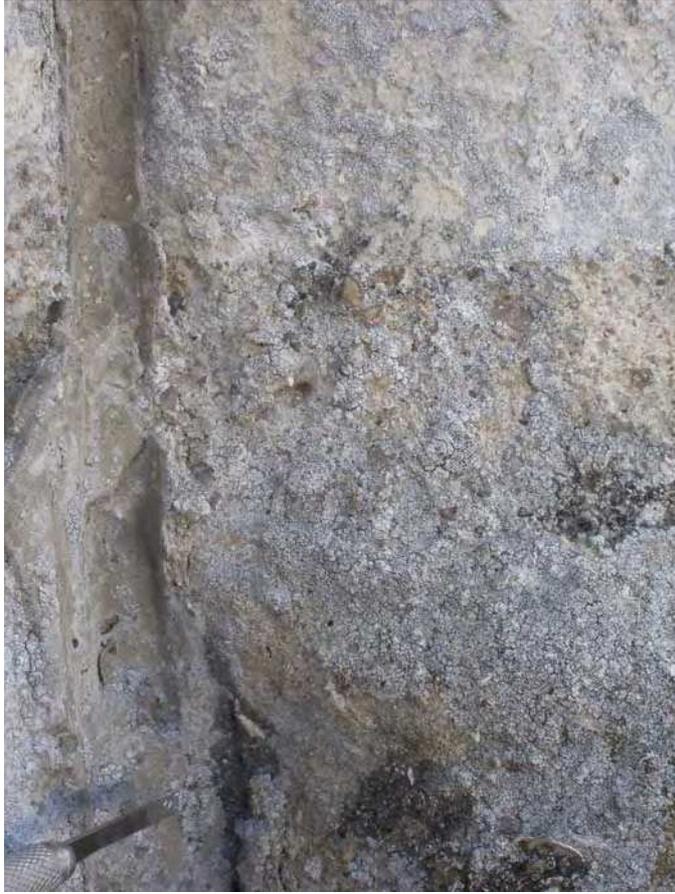
Croûtes noires très peu développées.

Mousses et lichens très discrets en bas, plus développés dans les parties hautes (figures 64 à 68 pages 24 à 25).

---

<sup>4</sup> La faible concentration de sulfate en profondeur ne doit pas faire écarter un origine interne : les sels très solubles peuvent être relativement concentrés dans les solutions circulant dans la pierre, alors que les sels moins solubles, comme le gypse, ne peuvent se concentrer que par l'évaporation des solutions à la surface de la pierre.

Une recherche financée en partie par le DRAC Centre est actuellement en cours pour déterminer par l'analyse isotopique les parts respectives des différentes sources de sulfates (pollution, plâtre, « ciment romain », pyrite) identifiées sur une sélection de monuments (projet BOS dans le cadre du programme national de recherche sur les matériaux du patrimoine culturel, publication : JM. Vallet (CICRP) C. Gosselin (LRMH-CICRP) P. Bromblet (CICRP), O. Rolland, V. Vergès-Belmin (LRMH), W. Kloppmann (BRGM): *Degradation of stones monuments by soluble salts: First approach in the determination of the salts origins using isotopic tracers*, in: Seventh International Symposium on the Geochemistry of the Earth's Surface GES-7, Aix en Provence, August 23-27, 2005, France).



62. ← Coin supérieur gauche des blocs de pierre dure en bas à gauche du portail ouest: couverture de lichens. P4200049

63. ↓ Grossi cinq fois environ P4200049



64. ← Vue plongeante sur le portail ouest : lichens et mousses sur la corniche. (Rectangles blancs à droite : tests de dessalement par compresses) P5020001



65. ← Grande corniche, au-dessus du 10<sup>ème</sup> modillon: mousses sur la partie horizontale, lichens devant. P4280255

66. ←↓ Grandeur nature, mousses et lichens. P4280256

67. ↓ Grossi cinq fois environ, lichens. P4280259

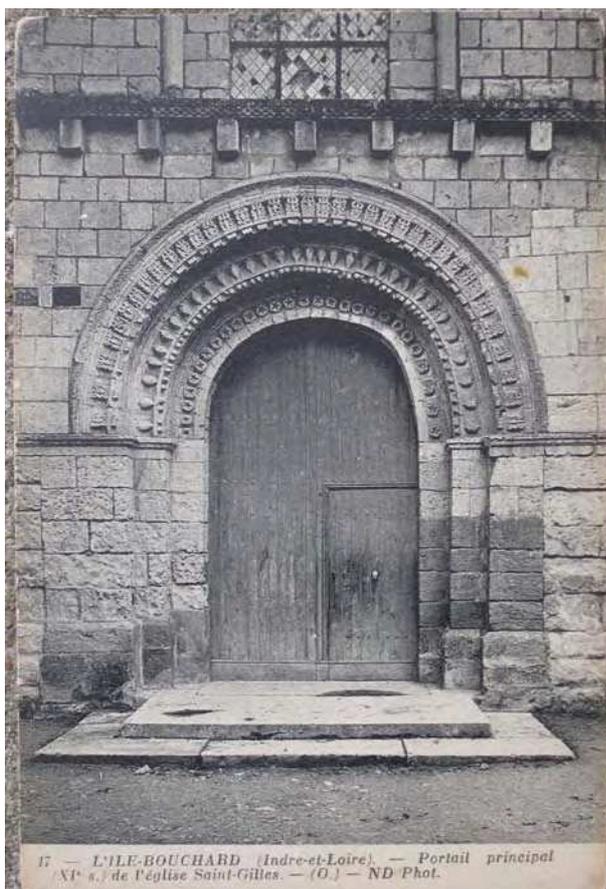


68. ← Vue plongeante sur le portail ouest : lichens et mousses sur le talus et la partie supérieure droite du portail. P5240018



69. ← Portail ouest, vue antérieure à 1890? (Voir figure 75 page 29). Le larmier du rouleau d'archivolte est déjà abîmé en bas à gauche, la désagrégation déjà marquée en bas mais le haut de l'ébrasement gauche comme la voussure sont en bon état ; l'aspect clair d'éléments aujourd'hui désagrégés laisse suspecter un début de désagrégation et/ou des pierres récemment remplacées (cinq blocs entre haut du portail et corniche notamment). Embranchement pas encore modifié, une plaque d'assurance à gauche, sur le mortier de la figure 39 page 14. Photo Médiathèque de l'architecture et du patrimoine © CMN. 06CTVh.

70. ↓ Vers 1900 ? Parvis de terre battue ; pas de trottoir ; ancre du contrefort nord déjà là ; joints creux sauf interventions récentes sous l'horloge, sur les contreforts et entre portail et corniche, rejointoiement au plâtre sur la baie ; vitrail ; embranchement ; arbre. Tampon « vues photographiques L BOUSREZ Tours ». Photo Médiathèque de l'architecture et du patrimoine © CMN. 06CTVi.



71. ↑ Carte postale ancienne, postérieure aux figures 69 et 70 page 26 (nouvelle plaque d'assurance en fer en haut à gauche). Comparé aux figures précédentes, la désagrégation remonte sur l'ébrasement gauche et apparaît en haut sous la corniche au-dessus du portail, zone qui s'est de surcroît encrassé (suies probablement). Collection Monsieur Charreau. P5240046

#### IV )      **ELEMENTS DE DOCUMENTATION HISTORIQUE LIES A L'EVOLUTION DE L'ETAT MATERIEL**

Après 1067, construction de l'église du portail ouest puis, au début du douzième siècle, du collatéral nord et donc du portail nord<sup>5</sup>.

13 juillet 1792 : inondation attestée par une inscription sur le seuil de la porte menant à la sacristie, indiquant une hauteur d'environ 1,05 mètres<sup>6</sup>.

1867 : les délibérations du conseil municipal mentionnent une toiture en très mauvais état et un projet de voûtes en brique<sup>7</sup>, suivies en 1878-1880 de la construction des voûtes de briques et plâtre dans l'église (figures 9 et 10 page 3),<sup>8</sup> enduit intérieur imitation pierre contenant apparemment du plâtre (figures 41 et 42 page 15, 80 page 30). Avant 1890 (peut-être très longtemps avant, peut-être plusieurs fois) : remplacements de pierres (figure 69 page 26, et paragraphe « pierres, appareil » page 7), très probablement déjà en raison de problèmes de sels solubles (voir ardoises mentionnées page 7); la désagrégation est d'ailleurs déjà (à nouveau ?) bien visible en 1890.

Selon des témoignages oraux et une carte postale ancienne (figure 82 page 31), l'église subit plusieurs inondations au 20ème siècle.

1930 jusqu'à nos jours: évolution dramatique (à nouveau ?) des altérations dues aux sels solubles (figures 69 page 26 à 83 page 31).

1947, apparitions de la Vierge à quatre petites filles, origine de l'actuelle fréquentation.

Années 1960-1980 : trafic automobile relativement important devant les portails, jusqu'à la mise en place de la déviation de la départementale 760 par l'actuel quai de la Poissonnerie.

Avant 1987 : nouveaux trottoir et parvis de granite rose et marbre blanc (figure 83 page 31). En 1987 : un courrier de Monsieur Charreau signale l'évolution alarmante du portail ouest<sup>9</sup>.

Les portails peuvent être rapprochés de ceux de l'église paroissiale de Tavant (à 3 kilomètres en aval sur la Vienne), de Saint-Même de Chinon (15 kilomètres en aval sur la Vienne), mais aussi de l'église paroissiale de Crouzille (2 kilomètre en amont sur la Vienne) ; les proportions de ce dernier portail invitent à étudier celle du portail nord de l'église Saint-Gilles : il n'est pas impossible qu'il se soit ouvert à l'origine un peu plus bas (ce qui suppose un emmarchement comblé dans l'église, le portail ouest paraissant pratiquement à son niveau d'origine), des sondages permettraient de s'en assurer.

---

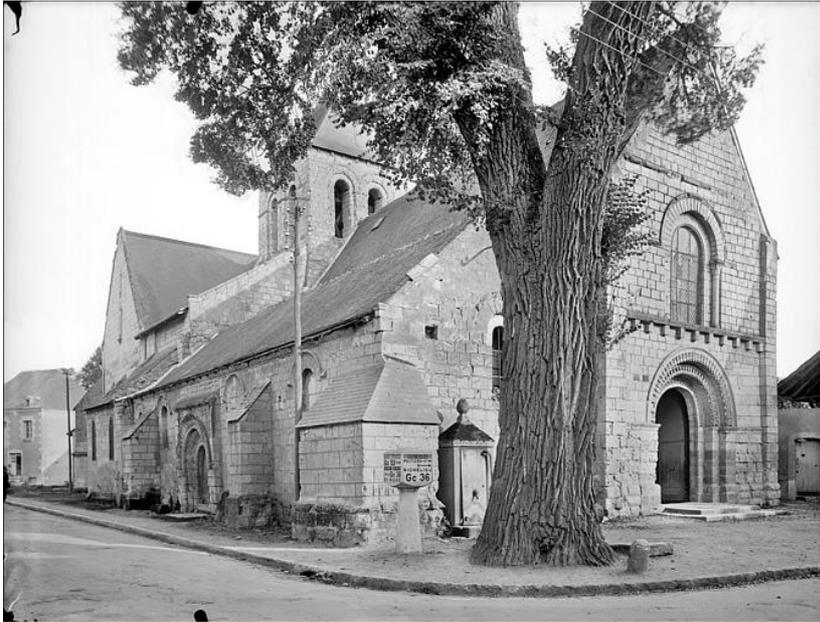
<sup>5</sup> Martine LAINE : L'Ile Bouchard et la vallée de la Vienne, Images du patrimoine - 238. Inventaire général du patrimoine culturel. 2006. R RANJARD: la Touraine archéologique, 4ème édition 1968.

<sup>6</sup> Entretien avec Monsieur et Madame CHARREAU à leur domicile le 24 mai 2006.

<sup>7</sup> Entretien avec Monsieur et Madame CHARREAU à leur domicile le 24 mai 2006. Dans le cadre de leurs recherches sur l'histoire du canton de l'Ile Bouchard, Madame Charreau a recopié à la main une très grande partie des délibérations du conseil municipal. Une délibération de 1861 mentionne la construction de la pompe visible à gauche de la façade (séparée du mur pour que le bruit de la pompe ne gêne pas les confessions dans le confessionnal alors placé juste de l'autre côté du mur dans l'église !)

<sup>8</sup> R RANJARD: la Touraine archéologique, 4ème édition 1968.

<sup>9</sup> Monsieur Charreau à la Société pour la protection des paysages et de l'esthétique de la France, 1987

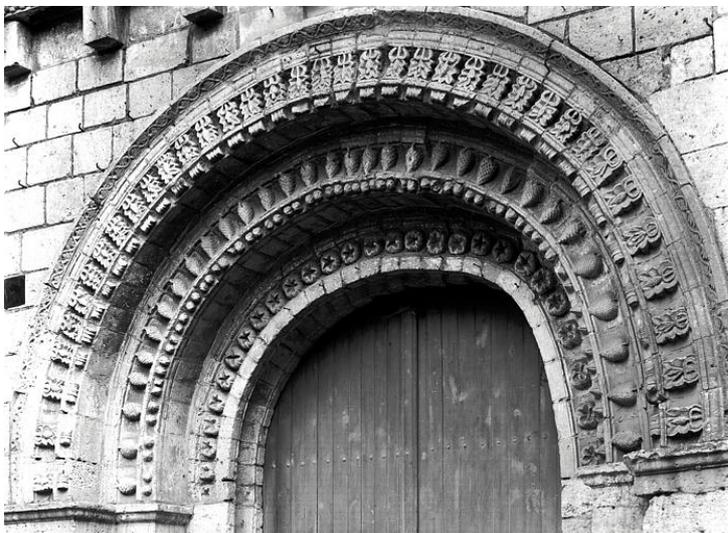


72. ← Vers 1920-1930. Selon un témoignage oral recueilli sur place, l'arbre au premier plan est un « arbre de la liberté » (la rue s'appelle encore « rue de la liberté »). Éléments de datation : emmarchement du portail ouest, route goudronnée, trottoir, borne indicatrice, électricité. Photo Georges Estève, photographe attaché au service photographique des Beaux-Arts (devenu service des Archives photographiques) de 1921 à 1975, débuta professionnellement en 1910 selon [http://www.mediatheque-](http://www.mediatheque-patrimoine.culture.gouv.fr/fr/archives_photo/index.html)

[patrimoine.culture.gouv.fr/ fr/archives\\_photo/index.html](http://www.mediatheque-patrimoine.culture.gouv.fr/fr/archives_photo/index.html). Photo Médiathèque de l'architecture et du patrimoine © CMN.sap01\_mh00097831\_p.



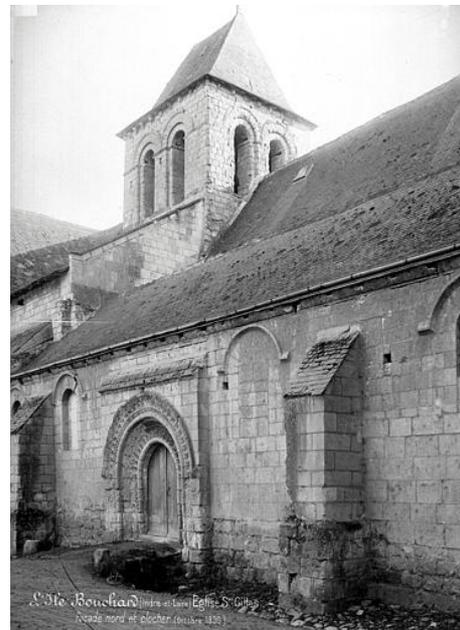
73. ← Même auteur, même période. Postérieure à la figure 71 page 26 (vitrail restauré, protégé par un grillage), la voussure est toujours en bon état, la désagrégation et l'encrassement se développent sous la corniche. On remarque que la désagrégation ne s'est pas encore développée autour de l'inclusion couleur rouille à gauche (figure 2 page 0 et 58 page 21). Photo Médiathèque de l'architecture et du patrimoine © CMN. sap01\_mh00097828\_p.



74. ← Photo Eugène Lefèvre Pontalis (décédé 31 octobre 1923) . Société française d'archéologie et Archives photographiques (Médiathèque de l'architecture et du patrimoine) © CMN. sap01\_lp004879\_p



75. ← Portail nord, avant 1890 ? Ce cliché semble antérieur à celui figure 77 page 29 (restes de badigeons de chaux ici sur les joints de parement en haut un peu à droite au-dessus du portail). Le blanc en bas de l'intrados à gauche correspond à du plâtre visible aujourd'hui (symétrique de la figure 43 page 15). Lichens (en haut), et suies ou croûtes noires (en bas), moins développés qu'aujourd'hui, Désagrégation déjà marquée en bas mais la voussure est en bon état. La référence au crayon en haut à gauche est semblable à celle de la figure 69 page 26 (même date ?). Photo Médiathèque de l'architecture et du patrimoine © CMN. 06CTVg.



76. ↑ Le portail nord en 1890. Mieuxement. Niveau du sol plus bas qu'aujourd'hui au pied du mur nord. Photo Médiathèque de l'architecture et du patrimoine © CMN. sap01\_mh001414\_p.



77. Même auteur même date. Comparé à la figure 75 page 29, le contraste dans la voussure semble un peu plus important : reprise de désagrégation sur la zone claire ? Problème de désagrégation au-dessus du talus juste sous le toit. La définition de la reproduction ne permet pas d'interpréter les taches blanches sur le larmier à gauche. Photo Médiathèque de l'architecture et du patrimoine © CMN. sap01\_mh001415\_p.

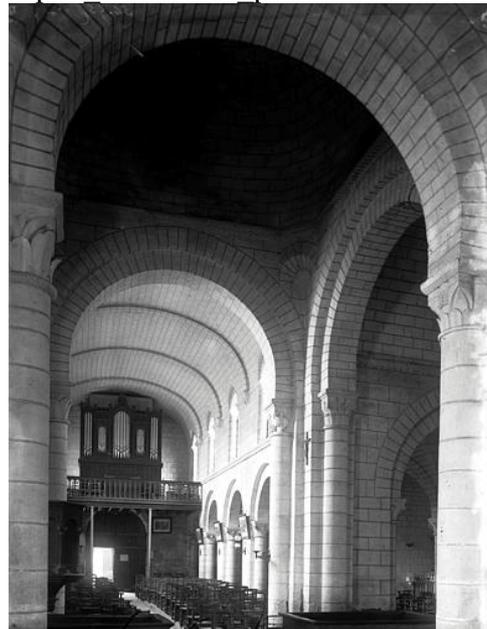


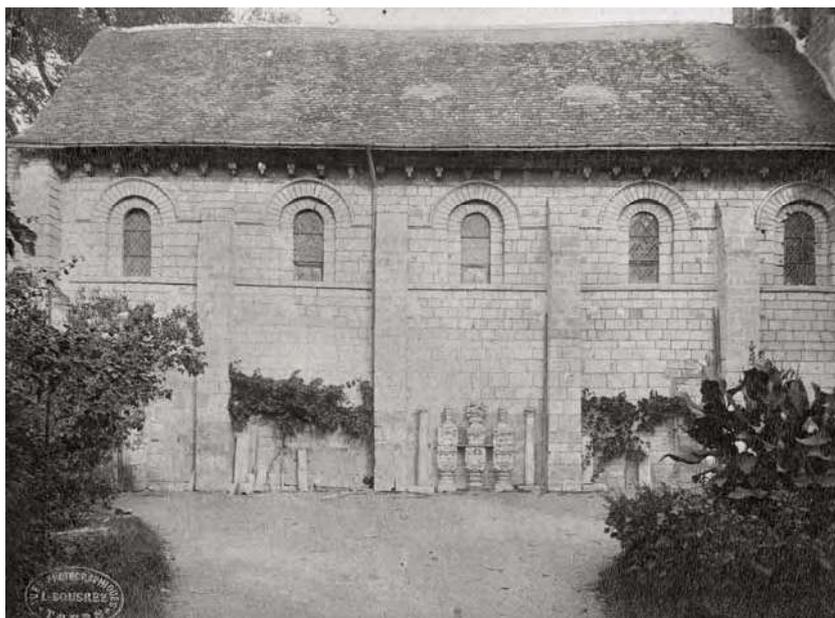
78. ← Vers 1900 ? (même auteur que figure 70 page 26). Désagrégation marquée mais moins développée qu'aujourd'hui au-dessus du talus. Fort contraste dans la voussure entre zone sombre et zone claire, la première correspond à l'épiderme d'origine, aujourd'hui disparu, la seconde à une désagrégation de la pierre déjà active, mais relativement récente (car la pierre est beaucoup moins profondément rongée qu'aujourd'hui). Par rapport aux figures 75 et 77 page 29, on note la disparition des bornes et le dégagement du seuil. Les lichens semblent en fort recul sur le talus en haut, au contraire des mousses, peut-être l'indice d'une humidité plus importante (fuites du toit ?). Photo Médiathèque de l'architecture et du patrimoine © CMN. 06CTVk.



79. ←↓ Portail nord vers 1900, avant 1927 (décès de l'auteur). On note le trottoir. Photo Camille Anlart, Photo Médiathèque de l'architecture et du patrimoine © CMN sap01\_mh034256\_p.

80. ↓ Même auteur et source. On voit l'imitation d'appareil faite en 1880 sur les voûtes de brique récemment refaites. sap01\_mh034257\_p





81. ← Façade sud de la nef, vers 1900 ?  
 Tampon comme figure 70 page 26. La lézarde aujourd'hui ouverte en haut à gauche n'est pas encore visible ici. On remarque les éléments lapidaires qui semblent provenir d'un retable (déposé lors des travaux mentionnés figure 80 page 30) Photo Médiathèque de l'architecture et du patrimoine © CMN. 06CTVj



82. ← Inondation sur le parvis de l'église, on reconnaît l'arbre des figures 70 page 26 et 72 page 28. P4200108.



83. ←Photo Charreau 1987. la comparaison avec l'état actuel montre que les dommages dus aux sels ont encore évolués depuis : déplaçage sous la corniche et perte de relief dans la voussure (exemple : on devine encore ici le bouton sur le 2<sup>ème</sup> claveau en bas à droite du premier rouleau, bouton totalement disparu aujourd'hui).



84. ← Façade occidentale de l'église de Tavant (37). L'état de conservation est globalement bien meilleur, en dépit de quelques problèmes de sels solubles notamment en bas à gauche de la voussure du portail.  
P5300107



85. ← Tavant, détail de la partie gauche de la voussure du portail occidental: motifs très proches de ceux du portail ouest de l'église Saint-Gilles de l'Île Bouchard.  
P5300115



86. ← Façade ouest de l'église de Cruzilles (37). La présence du talus au-dessus du portail, les motifs en losange du 1<sup>er</sup> rouleau de voussure sont très proches de ceux du portail nord de l'église Saint-Gilles de l'Île Bouchard. Les proportions sont toutefois ici plus élancées. On remarque aussi la plaque d'assurance datée de 1825, analogue à celles des figures 69 à 74 pages 26 à 28, ce constat peut n'être pas anecdotique : histoire technique similaire ? 2000-11-13II-0021

87. ↓ Détail de la sculpture au sud de la façade : une tête refaite en plâtre contamine depuis des années le tuffeau autour, profondément désagrégé par l'action du gypse. Le plâtre est probablement présent ailleurs sur la façade. Etat en novembre 2000. 2000-11-13-0024



88. ↓ Etat en novembre 2000. 2000-11-13-0023



89. ↓ Etat 2006 : déplaquage sur l'arc, perte de fragments de statue côté dextre. P6220010





90. ← Test de consolidation. Le produit consolidant est très visible ici juste après application ; il est pratiquement invisible après la prise complète du produit. On distingue à droite le bord de la compresse de test de dessalement voisin. P5040006.

91. → Vue générale, même jour. On distingue le test de consolidation de la figure 90, et les deux tests de dessalement sur tuffeau désagrégé non consolidé, dits « compresse haute » et « compresse basse » figure 94 page 36. La compresse témoin, au-dessus de la grande corniche, n'est pas visible, déjà retirée (visible figure 92 ci-dessous et figure 68 page 25) P5040006.



92. ↓ Compresse témoin sur la pierre saine juste après application. Ce bloc n'est pratiquement pas abîmé par les sels ; par contre les blocs immédiatement au-dessous, juste au-dessus de la corniche, sont touchés par la désagrégation. P4280267



93. ↓ Emplacement de la compresse du bas sur la figure 91, avant application. On distingue le trou entouré d'un léger décaissement carré correspondant au prélèvements avant dessalement P4280270



## V) TESTS DE CONSOLIDATION ET DE DESSALEMENT

### 1) Test de consolidation

Sur zone de tuffeau pulvérulent, façade ouest, parement au sud du portail, 2<sup>ème</sup> assise au-dessus de la petite corniche, 1<sup>er</sup> bloc, moitié droite (figure 90 page 34), surface traitée 32 x 28 cm environ, soit 0,09 m<sup>2</sup>, application au pinceau de 0,75 litres de produit consolidant à base de silicate d'éthyle<sup>10</sup> dilué dans le même volume de white-spirit, soit 1,5 litres en tout, soit environ 17 l/m<sup>2</sup>, le 4 mai 2006, sur une pierre à 15°C (mesure par thermomètre infra-rouge, conditions de prise ultérieures figure 17 page 5).

Un test de rayage à la pointe du scalpel 3 semaines après application montre l'efficacité du traitement, efficacité dont la durabilité pourra être suivie ultérieurement. De même le comportement vis à vis des sels solubles ne pourra être évalué que sur le long terme.

### 2) Tests de dessalement

Sur quatre emplacements (figure 91 page 34) :

- Témoin pierre saine: 2<sup>ème</sup> assise au-dessus de la corniche, 3<sup>ème</sup> bloc au sud de la colonne sud de la baie.
- Test sur zone de tuffeau pulvérulent en partie haute, avant dernière assise sous la corniche.
- Test sur zone de tuffeau pulvérulent à mi-hauteur du portail .
- Test sur zone de tuffeau consolidé mentionnée ci-dessus.

Application de compresses d'eau déminéralisée et de pulpe de papier<sup>11</sup>.

La compresse témoin a été retirée après séchage sans être remplacée.

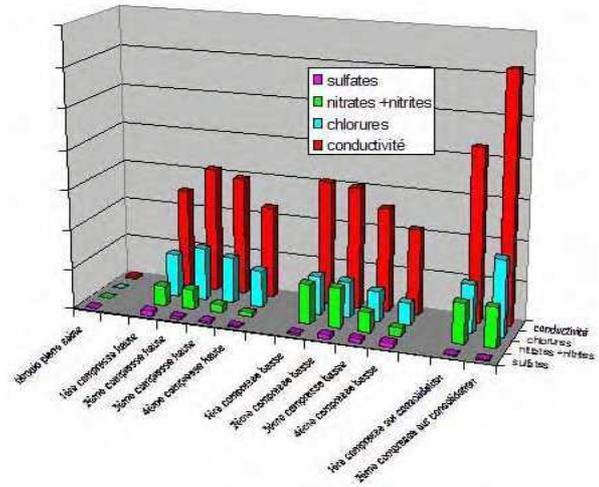
Les autres compresses ont été remplacées après séchage, après environ une semaine : 3 remplacements, donc 4 compresses pour chacun des deux tests sur tuffeau non consolidé ; 1 remplacement donc 2 compresses pour le test sur tuffeau consolidé (commencé plus tard en raison du temps de prise préalable du produit consolidant).

---

<sup>10</sup> "Estel 1000" distribué par C.T.S. France, 26 passage Thiéré, 75011 Paris. C'est un produit mi-organique (éthyl) mi-minéral (silicate) qui par réaction avec l'eau atmosphérique se transforme en quelques jours en deux produits. L'un, organique (éthanol), disparaît par évaporation, l'autre, minéral (gel d'acide silicique), consolide la pierre en formant des ponts entre les particules peu disjointes. Très proche des constituants de nombreuses roches, il modifie peu la porosité et le comportement de la pierre vis à vis de l'eau, ainsi que son aspect. Le but de la dilutions est d'éviter la formation d'un front hydrofuge préjudiciable à la conservation à long terme (Audrey GROSHENY, élève de l'Ecole d'ingénieur de la ville de Paris, école supérieure du génie urbain : *Consolidation superficielle des pierres dégradées : l'emploi de solutions dilués est il justifié ?* Rapport de stage technique au Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, octobre 2001, directeur de stage Jean Didier MERTZ)

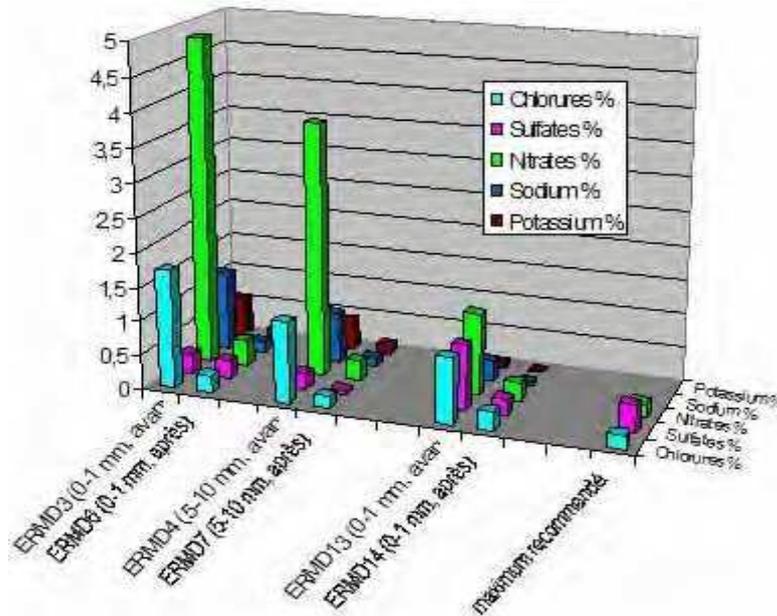
<sup>11</sup> Pulpe de papier "Arbocel BWW 40" de J.RETTENMAYER und SÖHNE, Faserstoff-Werke, Manufacturers of fibres, D-73494 Ellwangen-Holzühle, Allemagne.

94. Suivi des tests de dessalement par mesures sur les compresses. L'augmentation des sulfates dans le test « compresse basse » est tout à fait inhabituel s'il s'agit de gypse (ce sel peu soluble est généralement retiré surtout par la première compresse, les cristaux désolidarisés de leur support étant retiré mécaniquement par la compresse) ; on peut donc soupçonner la présence de sulfates beaucoup plus solubles, par exemple thénardite et mirabilite (deux sulfates de sodium très destructeurs), en quantité probablement limitée vues les faibles concentration en profondeur.



Localisation	témoin pierre saine	1ère compresse haute	2ème compresse haute	3ème compresse haute	4ème compresse haute	1ère compresse basse	2ème compresse basse	3ème compresse basse	4ème compresse basse	1ère compresse basse	2ème compresse sur consolidation
sulfates	0	50	25	25	10	25	50	50	55	10	10
nitrates + nitrites	0	250	250	100	50	500	500	250	100	500	500
chlorures	0	540	650	575	450	475	450	375	280	600	950
conductivité	63	2500	3120	2960	2290	3090	3030	2580	2140	4300	6200

95. Contrôle du résultat des tests de dessalement par dosages du laboratoire ERM sur prélèvements avant (ERMD3, 4, 13) et après les tests (ERMD6, 7, 14), les seconds prélèvements juste à côté des premiers et aux même profondeurs. Voir localisation de ERMD3, 4, 13 figure 60 page 22 . « Maximum recommandé » : voir commentaire page 53



Prélèvement	Chlorures %	Sulfates %	Nitrates %	Sodium %	Potassium %
ERMD3 (0-1 mm, avant)	1,74	0,3	4,84	1,163	0,572
ERMD6 (0-1 mm, après)	0,26	0,27	0,38	0,158	0,158
ERMD4 (5-10 mm, avant)	1,18	0,24	3,74	0,738	0,443
ERMD7 (5-10 mm, après)	0,18	0,06	0,29	0,128	0,128
ERMD13 (0-1 mm, avant)	0,97	0,95	1,2	0,309	0,06
ERMD14 (0-1 mm, après)	0,28	0,24	0,26	0,068	0,019
maximum recommandé	0,2	0,4	0,2		

La quantité de sels retirée par chaque compresse est estimée d'une part en mesurant sa conductivité électrique<sup>12</sup>, et d'autre part en évaluant par déterminations semi-quantitatives les quantités d'ions sulfates, nitrates et chlorures retirés<sup>13</sup>.

Les résultats sont résumés par le tableau et le graphique figure 94 page 36.

Des prélèvements de pierre ont été réalisés avant et après le test à 2 profondeurs (figure 93 page 34):

- 0 à 1 mm prélevés au scalpel sur une surface de 3 cm<sup>2</sup> environ
- 5 à 10 mm prélevés par perçage avec un foret de 12 mm.

Les résultats sont résumés par le tableau et le graphique figure 95 page 36.

Les conclusions de ces tests sont les suivantes :

Le dessalement permet de faire diminuer notablement la teneur en sels superficielle. Quatre compresses sont à peine suffisantes. La consolidation n'affaiblit pas l'efficacité du dessalement, elle semble même l'augmenter.

Ce résultat pourrait être durable pour les sulfates, compte tenu de leur faible concentration en profondeur (figures 60 et 61 page 22), et du temps assez long probablement nécessaire à leur accumulation, au moins pour le gypse (note 4 page 23).

Ce résultat ne peut être que peu durable pour les sels très solubles, en effet :

- les compresses n'ont mobilisé qu'une infime partie des sels présents, compte tenu de leur forte concentration en profondeur (figures 60 et 61 page 22)<sup>14</sup>, et elles n'ont retiré qu'une partie des sels mobilisés, l'autre partie diffusant dans l'eau des compresses vers l'intérieur de la pierre.
- ces sels sont très mobiles car de petites quantités d'eau suffisent à les déplacer en grande quantité ; en extérieur, la simple variation d'hygrométrie entre jours secs et jours de pluie suffit.

Ce résultat montre qu'il est possible d'assainir au moins temporairement la surface avant d'appliquer sur les parties à protéger un revêtement de type « surface sacrifiée » (ragréage et/ou badigeon, voir proposition de traitement ci-après).

---

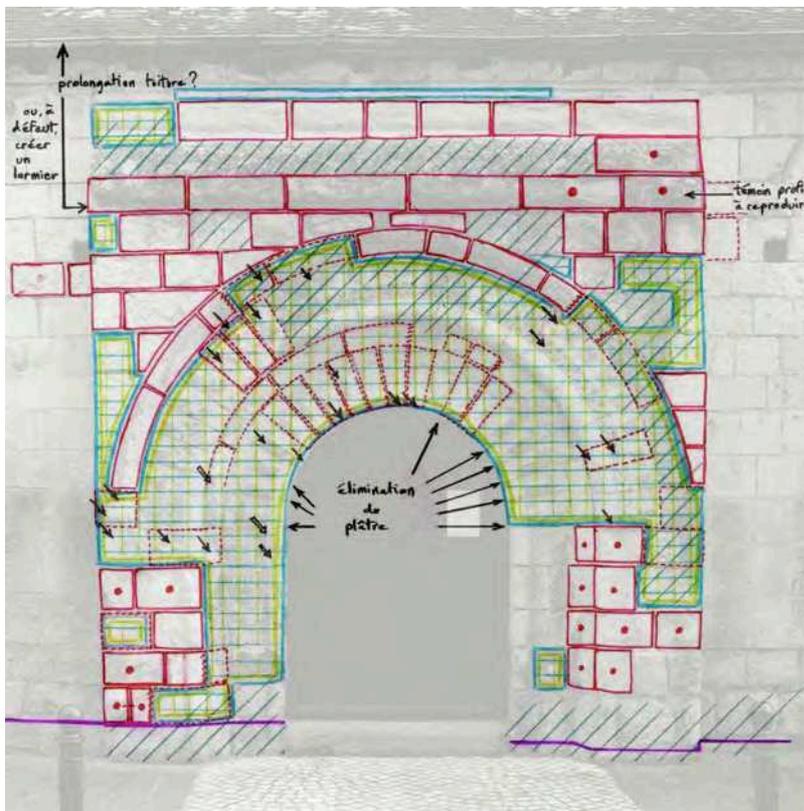
<sup>12</sup> La conductivité d'une solution est à peu près proportionnelle à la quantité de sels qu'elle contient. La pulpe de papier sèche homogénéisée et mélangée, est mise à tremper dans 20 fois son poids d'eau déminéralisée, et sa conductivité est mesurée à l'aide d'un conductimètre à sonde Hanna Instruments HY 8733.

<sup>13</sup> Même protocole que page 47.

<sup>14</sup> Si on considère la teneur en nitrate, chlorure, sodium et potassium de ERMD5 (figures 60 et 61 page 22) représentative de la teneur en profondeur, on peut calculer l'ordre de grandeur suivant :  $0,95+3+0,6+0,38=4,93\%$  de sels dans le tuffeau, soit pour une densité de 1,45 tonne/m<sup>3</sup>, une teneur en sels d'environ 70 kg/m<sup>3</sup>. La zone à traiter peut être assimilée à un mur de 10m<sup>2</sup> et 1m d'épaisseur, la quantité de sels en jeu ainsi calculée est de 700 kg. La réalité est bien plus complexe, mais la quantité de sels réellement impliquée est probablement de l'ordre de grandeur de la centaine de kilogramme. Même en négligeant les hétérogénéités (joints creux surtout) qui limite l'efficacité des compresses, celles ci ne peuvent agir à plus de quelques centimètres de profondeur.



96. ↑ Relevé de traitement proposé pour le portail ouest. (Dessin O.Rolland sur fond A.de Saint-Jouan, ACMH, photo J.-B. Darrasse).



97. ← Relevé de traitement proposé pour le portail nord (même source).

Légende du relevé du traitement:

- Pierre à remplacer pour raison de sécurité ou de conservation
- Pierre à remplacer pour raison d'aspect
- Pierre à remplacer éventuellement pour raison d'aspect
- Feuille de plomb
- Barrière hydrofuge injectée
- /// Traitement biocide
- Consolidation au silicate d'éthyle
- Dessalement par compresses
- ↘ Collages par points, infiltration de micro-mortiers

Non représenté:  
 - ragréage,  
 - rejointoiement partiel (sans refoulement, sauf élimination du plâtre)  
 - remplacement enduits intérieurs plâtre sur 2 mètres de haut  
 - étanchéité toitures

## ANNEXE : PRELEVEMENTS, IDENTIFICATION DE SELS ET DE MATERIAUX

- Test goutte d'eau : goutte déposée par un cathéter Téflon, observation.
- Détermination des carbonates : une masse pesée de prélèvement est aspergée d'acide chlorhydrique en vase clos, le volume de gaz dégagé est mesuré par le déplacement d'eau dans un vase communiquant et comparé à celui d'une masse connue de carbonate de calcium. La précision est d'environ 5% de la masse pesée s'il s'agit bien de carbonate de calcium. Observation ; la déstructuration ou l'affaiblissement par l'acide apporte une indication sur le rôle structural des carbonates;
- Déterminations des sulfates : le prélèvement est broyé au pilon dans un mortier d'agate (l'adhérence du broyat au pilon et au mortier correspond souvent à la présence de plâtre ou de résine genre colophane). 0,500 g et 0,050g de la poudre obtenue sont mélangés chacun à 50,0 ml d'eau déminéralisée, pour obtenir deux solutions de concentrations différentes (respectivement 10,00 g/l et 1,00 g/l) permettant d'élargir la plage de sensibilité des déterminations semi-quantitatives, et de repérer les éventuelles saturations pour les sels relativement peu solubles (gypse notamment). Les solutions sont agitées puis laissées reposer 24 heures, la solution claire surnageant est prélevée à la seringue (elle est parfois elle-même surmontée par des composants hydrophobes). Elle est diluée si nécessaire pour tomber dans la plage de sensibilité. Détermination des sulfates par "Hach test kit SO4 50-200mg/l Model SF-1" de HACH COMPAGNY, P.O.Box 389 Loveland USA. (kit de dosage par turbidimétrie au chlorure de baryum, graduation: 50,55, 60, 65, 70, 75, 80, 90, 100, 125, 150, 200, précision principalement dépendante de cette graduation).
- Nitrates : solution préparée et prélevée comme pour les sulfates, puis "Quantofix Nitrate/Nitrite" de MACHEREY-NAGEL D-52348 Düren, Postfach 10 13 52 Allemagne. (bandelettes réactives de détermination semi-quantitative, graduation: 0, 10 25, 50, 100, 250, 500 mg/l pour le nitrate).
- Chlorures : solution préparée et prélevée comme pour les sulfates, "Test chlorures" 1.11106 de MERCK KGaA, 64271 Darmstadt, Allemagne. Méthode titrimétrique (mercurimétrique) de 2 à 200 mg/l, précision environ 5mg.
- Test à la flamme : prélèvement placé dans une flamme, observation, pesée.

Attention :

Les prélèvements ne subissant aucun étuvage préalable, le poids d'eau peut n'être pas négligeable.

Les prélèvements et les résultats sont présentés dans le tableau ci-après. Les prélèvements sont localisés figure 98 page 51.

## Tableau de résultats

Code prélevement	Description, photo, prélèvement	Tests (faible précision: voir texte ci-avant)						Conclusions, interprétation
		test goutte d'eau	carbonate (test acide chlorhydrique)	sulfate (test chlorure de baryum)	chlorure ( test mercurimétrique)	nitrate nitrite (bandelette)	matière organique (test flamme)	
P1	Mortier de rejointoiment Imitation de tuffeau. Fraction fine blanchâtre, tendre, cohésion moyenne, hydrophile poreuse Peu de granulats visible: quelque agglomérats orangés, rares grains de sable siliceux roulé blanchâtre inférieur à 1 mm Tendre, cohésion moyenne, hydrophile Localisation du type: façade ouest du collatéral, près de la pompe, 5ème assise, joint vertical entre 1er et 2ème bloc à droite de la pompe. Photo: 4200028, 30, 31; Prélèvement: à l'emplacement du type	absorbée rapidement, pas d'affaiblissement noté.	courte effervescence, peu ou pas affaibli.	40%, pourrait correspondre à environ 71,71% de gypse	non testé	non testé	non testé	Plâtre teinté et chargé d'un peu de sable.
P2	Mortier de jointoiment du sol récent Sable fin et liant hydraulique gris. Fraction fine grise, très dure, très forte cohésion, hydrophile peu poreuse Granulats visibles: sable siliceux roulé brun à blanchâtre inférieur à 3 mm très forte cohésion, hydrophile Localisation du type: devant le portail ouest, en haut à l'ouest de la rampe handicapé, entre 1er et 2ème rang de pavés. Photo: 4200032, 33; Prélèvement: à l'emplacement du type	absorbée lentement	longue effervescence, totalement destructuré	non testé	non testé	non testé	non testé	Ciment et sable.
P3	Mortier de rejointoiment Ciment gris. Fraction fine grise, très dure, très forte cohésion, hydrophile peu poreuse Granulats visibles: par endroit, grains de sable siliceux roulé brun à blanchâtre inférieur à 5 mm très forte cohésion, hydrophile Localisation du type: portail ouest, ébrasement nord, 4ème assise, entre 3ème et 4ème bloc, joint vertical Photo: 4200044-46; Prélèvement:	absorbée lentement	test sur partie sans sable: longue effervescence, totalement destructuré, forme une sorte de gel jaune vif, le volume de gaz dégagé par l'acide chlorhydrique pourrait correspondre à environ 43% de calcite;	non testé	non testé	non testé	non testé	Ciment et plus ou moins de sable.
P4	Granulat blanc. Fraction fine blanchâtre, dureté moyenne, cohésion moyenne hydrophile, poreuse pas de granulats visible Dureté moyenne, cohésion moyenne hydrophile, Localisation du type: façade ouest de la nef, à gauche du portail, joint horizontal entre 3ème et 4ème assise, entre les 2èmes blocs en partant du contrefort. Photo: 4200047, 48; Prélèvement: à l'emplacement du type	absorbée lentement	forte effervescence presque totalement dissous, reste une sorte de "fantôme" translucide mou (impuretés de la chaux?)	non testé	non testé	non testé	non testé	Chaux.
P5	Ragréage et rejointoiment Imitation de tuffeau. Fraction fine blanchâtre, tendre, faible cohésion, hydrophile, poreuse Granulats visibles: sable siliceux roulé blanchâtre inférieur à 1 mm Tendre, faible cohésion, hydrophile, Localisation du type: façade ouest du collatéral, 6ème assise, joint vertical entre 2ème et 3ème bloc à gauche du contrefort Photo: 4200057, 59; Prélèvement: à l'emplacement du type	absorbée rapidement	forte effervescence très affaibli, non destructuré, le volume de gaz dégagé par l'acide chlorhydrique pourrait correspondre à environ 48% de calcite;	15%, pourrait correspondre à environ 26,89% de gypse	0,1 %	0,5 % nitrate 0 % nitrite	non testé	Mortier imitation de tuffeau liée par du plâtre et peut-être de la chaux.
P6	Mortier de rejointoiment Sable et chaux hydraulique. Fraction fine gris très clair, dure, bonne cohésion, hydrophile, poreuse Granulats visibles: sable siliceux roulé brun à blanchâtre inférieur à 8 mm Dur, bonne cohésion, hydrophile, recouvre le mortier de pose d'origine et le ciment et plus ou moins de sable de P3 en bas du contrefort nord (4200070, 71) recouvert par le sable fin et ciment de P2 tout en bas du contrefort nord (4200070, 73) Localisation du type: façade ouest de la nef, contrefort nord, 4ème assise, joint vertical ouest. Photo: 4200064, 66, 68, 69; Prélèvement: à l'emplacement du type	absorbée rapidement	longue effervescence, presque totalement destructuré	non testé	non testé	non testé	non testé	Sable et chaux hydraulique.
P7	Tuffeau très altéré. Localisation du type: façade ouest du collatéral, tout en bas à droite Photo: 4200074, 77, 78; Prélèvement:	absorbée rapidement	non testé	10%, pourrait correspondre à environ 17,93% de gypse	0,06 %	0,5 % nitrate 0 % nitrite	non testé	Tuffeau probablement principalement altéré par le gypse
P8	Ragréage. Imitation de tuffeau. Localisation du type: façade ouest de la nef, 14ème assise, 2ème bloc à droite du contrefort, en bas à droite Photo: 4200094, 95, 96; Prélèvement: à l'emplacement du type	absorbée rapidement	très affaibli, non destructuré, le volume de gaz dégagé par l'acide chlorhydrique pourrait correspondre à environ 60% de calcite;	0% (beaucoup moins de 0,5%)	0,725 %	1 % nitrate 0 % nitrite	non testé	Mortier imitation de tuffeau sans plâtre, avec peut-être une chaux hydraulique.
P9	Pyrite. Localisation du type: façade ouest de la nef, 15ème assise, 3ème bloc à droite du contrefort Photo: 4200099, 100, 101, 103; Prélèvement: à l'emplacement du type	non testé	non testé	0,08%, pourrait correspondre à environ 0,14% de gypse	2,1 %	2,5 % nitrate 0 % nitrite	non testé	

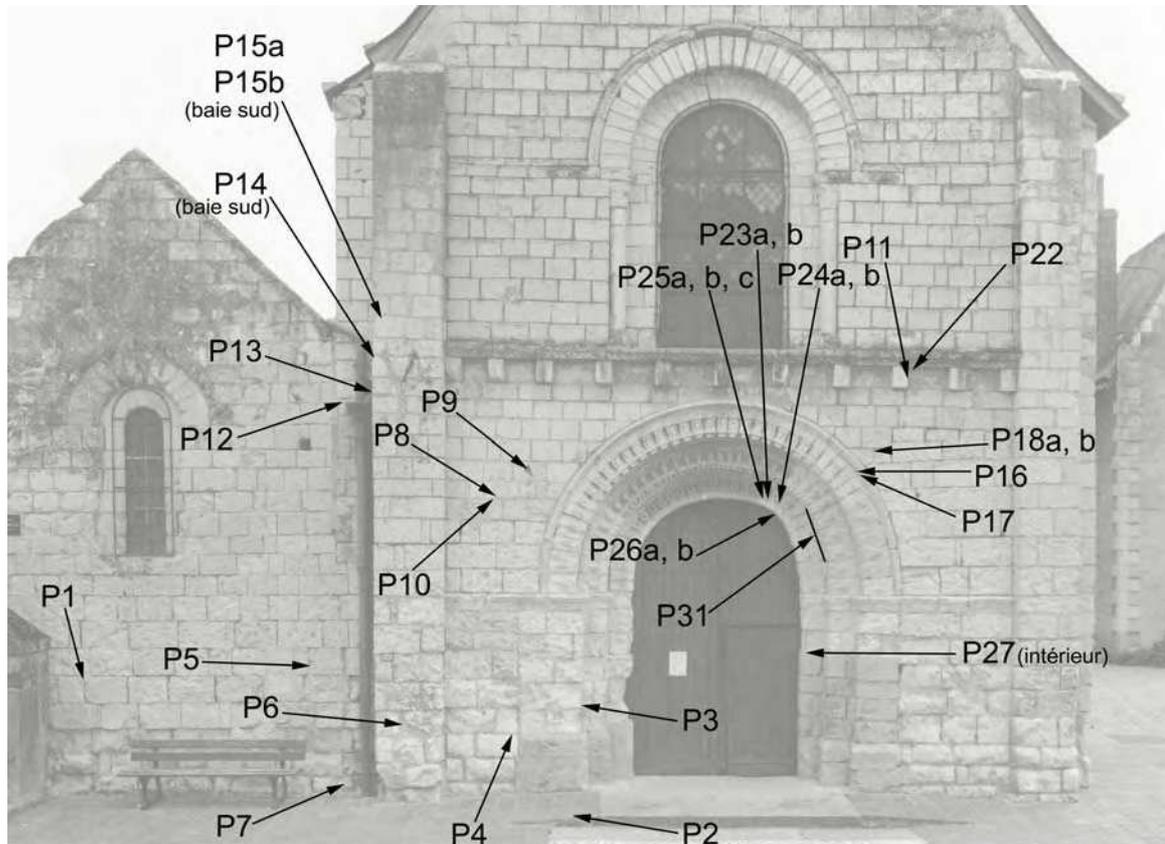
Page 1

Code prélèvement	Description, photo, prélèvement	Tests (faible précision: voir texte ci-avant)						Conclusions, interprétation
		test goutte d'eau	carbonate (test acide chlorhydrique)	sulfate (test chlorure de baryum)	chlorure (test mercurimétrique)	nitrate nitrite (bandelette)	matière organique (test flamme)	
P10	Mortier de bouchage sous celui de P8 Sable et chaux. Fraction fine blanc jaunâtre tendre, faible cohésion, hydrophile, poreuse Granulats visibles: sable siliceux roulé brun à blanchâtre inférieur à 4 mm Tendre, faible cohésion, hydrophile, recouvert par P8 Localisation du type: façade ouest de la nef, 14ème assise, 2ème bloc à droite du contrefort, en bas à droite Photo: 4200094, 95, 98; Prélèvement: à l'emplacement du type	absorbée rapidement	non testé	non testé	non testé	non testé	non testé	Probablement chaux aérienne et sable.
P11	Mortier de rejointoiment Sable fin et liant hydraulique. Fraction fine gris clair dure, bonne cohésion, hydrophile, poreuse Granulats visibles: sable siliceux roulé brun à blanchâtre inférieur à 2 mm Dur, bonne cohésion, hydrophile. Localisation du type: façade ouest, joint vertical droit du 9ème modillon. Photo: 4200128, 130; Prélèvement: à l'emplacement du type	absorbée rapidement	non testé	non testé	non testé	non testé	non testé	Probablement chaux hydraulique et sable.
P12	Efflorescence blanche mince. Localisation du type: façade ouest, bloc à gauche de l'entonnoir de gouttière Photo: 4200194, 195, 197; Prélèvement: à l'emplacement du type	non testé	non testé	non testé	non testé	non testé	non testé	
P13	Tuffeau très altéré. Localisation du type: façade ouest, contrefort nord, côté nord, 18ème assise Photo: 4200200, 203; Prélèvement: à l'emplacement du type	non testé	non testé	0,7%, pourrait correspondre à environ 1,25% de gypse	0,4 %	0,25 % nitrate 0 % nitrite	non testé	Sulfates, chlorures, nitrates abondants
P14	Mortier de rejointoiment Imitation de tuffeau. Fraction fine blanc-gris dureté moyenne, bonne cohésion, hydrophile, poreuse Granulats visibles: sable siliceux roulé blanchâtre inférieur à 1 mm quelques granulats noirs friables (charbon? de bois?), érosion par l'eau en micro-pics réguliers Dureté moyenne, bonne cohésion, hydrophile, Localisation du type: voir P15b Photo: 4200206, 222, 223; Prélèvement: à l'emplacement du type	absorbée rapidement	forte effervescence partiellement destructuré, les granulats blanc-jaunâtre font très lentement effervescence, le volume de gaz dégagé par l'acide chlorhydrique pourrait correspondre à environ 28% de calcite;	20%, pourrait correspondre à environ 35,86% de gypse	0 % (moins de 0,05%)	0,1 % nitrate 0 % nitrite	non testé	Mortier à base de plâtre, sable fin, chaux et/ou poudre de tuffeau
P15a	Imitation de tuffeau Localisation du type: voir P5 Photo: 4200206, 224, 226, 227; Prélèvement: façade ouest du collatéral, 6ème assise, joint vertical entre 2ème et 3ème bloc à gauche du contrefort	absorbée rapidement	non testé	12,5%, pourrait correspondre à environ 22,41% de gypse	0 % (moins de 0,05%)	0 % nitrate 0 % nitrite	non testé	Mortier à base de plâtre, sable fin, chaux et/ou poudre de tuffeau
P15b	Rejointoiment couvert par l'imitation de tuffeau de P15a Sable très fin et liant gris. Fraction fine blanc-gris dureté moyenne, bonne cohésion, hydrophile, poreuse Granulats visibles: sable siliceux roulé blanchâtre inférieur à 1 mm quelques grains de sable siliceux roulé très blanc, quelques granulats blanc-jaunâtre compacts et durs à angles nets jusqu'à 5 mm et quelques granulats noirs friables (charbon? de bois?), Dureté moyenne, bonne cohésion, hydrophile, Localisation du type: façade ouest du collatéral, 6ème assise, joint vertical entre 2ème et 3ème bloc à gauche du contrefort Photo: 4200206, 224, 226, 227; Prélèvement: à l'emplacement du type	absorbée rapidement	forte effervescence partiellement destructuré, les granulats blanc-jaunâtre font très lentement effervescence, le volume de gaz dégagé par l'acide chlorhydrique pourrait correspondre à environ 20% de calcite;	15%, pourrait correspondre à environ 26,69% de gypse	0 % (moins de 0,05%)	non testé		A base de plâtre et sable fin
P16	Mortier de pose de la voussure ou rejointoiment profond ancien Sable et chaux. Fraction fine blanche jaunâtre tendre, faible cohésion, hydrophile, poreuse Granulats visibles: sable siliceux roulé brun à blanchâtre inférieur à 6 mm rongé par les sels Tendre, faible cohésion, hydrophile, Localisation du type: portail ouest, voussure, partie sud, entre 3ème rouleau 8ème claveau et 4ème rouleau 4ème claveau Photo: 4280228, 229, 230; Prélèvement: à l'emplacement du type	non testé	forte effervescence complètement destructuré, le volume de gaz dégagé par l'acide chlorhydrique pourrait correspondre à environ 26% de calcite;	0,63%, pourrait correspondre à environ 1,13% de gypse	0,35 %	0,25 % nitrate 0 % nitrite	non testé	Sable et chaux.
P17	Mortier de rejointoiment Sable et chaux. Fraction fine blanchâtre, Photo: ; Prélèvement:	non testé	forte effervescence complètement destructuré, le volume de gaz dégagé par l'acide chlorhydrique pourrait correspondre à environ 25% de calcite;	0,09%, pourrait correspondre à environ 0,16% de gypse	non testé	non testé	non testé	Sable et chaux.
P18a	Mortier de pose du parement Sable et chaux. Fraction fine blanchâtre, Photo: 42320032-40-; Prélèvement:	non testé	forte effervescence complètement destructuré, le volume de gaz dégagé par l'acide chlorhydrique pourrait correspondre à environ 11% de calcite;	non testé	non testé	non testé	non testé	Sable et chaux

Code prélèvement	Description, photo, prélèvement	Tests (faible précision: voir texte ci-avant)						Conclusions, interprétation
		test goutte d'eau	carbonate (test acide chlorhydrique)	sulfate (test chlorure de baryum)	chlorure ( test mercurimétrique)	nitrate nitrite (bandelette)	matière organique (test flamme)	
P18b	Terre dans le mortier. Photo: ; Prélèvement:		forte effervescence très courte, le volume de gaz dégagé par l'acide chlorhydrique pourrait correspondre à environ 6% de calcite;	non testé	non testé	non testé		Un peu de chaux dans la terre.
P22	Tuffeau d'origine. Tuffeau très altéré, désasagrégé et déplaqué. Photo: 4270272 à 275; Prélèvement: sous la corniche, contre le côté sud du 9ème modillon	non testé	non testé	3,75%, pourrait correspondre à environ 6,72% de gypse	0,9 %	1 % nitrate 0 % nitrite	non testé	Sulfate, chlorure et nitrate très abondants
P23a	Dernier badigeon dans la voussure Badigeon blanc grossier. Localisation du type: voussure, côté sud, 1er rouleau, entre 8ème et 9ème claveau Photo: 4280276, 277, 278; Prélèvement: emplacement du type	non testé	forte effervescence totalement dissous, le volume de gaz dégagé par l'acide chlorhydrique pourrait correspondre à environ 82% de calcite;	non testé	non testé	non testé	non testé	Badigeon de chaux
P23b	Poussière sous badigeon. Photo: 4280276, 277, 278; Prélèvement: même emplacement que 23a, au-dessous.			1,5%, pourrait correspondre à environ 2,69% de gypse	0,95 %	0,5 % nitrate 0 % nitrite		Sulfate, chlorure et nitrate très abondants
P24a	Dernier badigeon dans la voussure Badigeon blanc grossier. Fraction fine blanche, tendre, faible cohésion, hydrophile, poreuse, Granulats ou inclusions visibles: fibres supposées végétales, poussière de charbon de bois, poches de poussière beige sous-jacente. Tendre, faible cohésion, hydrophile, poreux. Localisation du type: voir P23a Photo: 4280276, 283, 286; Prélèvement: voussure, côté sud, 1er rouleau, entre 7ème et 8ème claveau	non testé	forte effervescence totalement dissous sauf fibre, poussière de charbon de bois et poussière beige adhérente ou incluse, le volume de gaz dégagé par l'acide chlorhydrique pourrait correspondre à environ 80% de calcite;	non testé	non testé	non testé	non testé	Badigeon de chaux
P24b	Poussière sous badigeon. Photo: ; Prélèvement: même emplacement que 24a, au-dessous.			0,6%, pourrait correspondre à environ 1,08% de gypse	1,05 %	0 % nitrate 0 % nitrite	0	Chlorure majoritaire, sulfate abondant, nitrate absent
P25c	Avant-dernier badigeon dans la voussure. Badigeon blanc mince. Localisation du type: voussure, côté sud, 9ème claveau, dans la rainure intérieure de la face avant. Photo: 4280276, 277, 293-296; Prélèvement:	non testé	forte effervescence totalement dissous, le volume de gaz dégagé par l'acide chlorhydrique pourrait correspondre à environ 93% de calcite;	non testé	non testé	non testé		Badigeon de chaux
P26a	Bouchage et rejointoiment dans la voussure. Photo: ; Prélèvement:	absorbée rapidement		0%	0,75 %	0,5 % nitrate 0 % nitrite		Mortier sans plâtre
P26b	Scellement ou infiltration de badigeon? autour d'une cheville bois dans la voussure. Photo: ; Prélèvement:	absorbée rapidement	non testé	0%	0,8 %	0,5 % nitrate 0 % nitrite	non testé	Mortier sans plâtre
P27	Imitation de tuffeau, intérieur. Localisation du type: ébrasement intérieur sud du portail occidental, entre 6ème et 7ème assise Photo: 4200112, 114, 116, 118, 119; Prélèvement: à l'emplacement du type	absorbée rapidement pas d'affaiblissement noté.	forte effervescence très affaibli, non destructuré, le volume de gaz dégagé par l'acide chlorhydrique pourrait correspondre à environ 39% de calcite;	6,5%, pourrait correspondre à environ 11,65% de gypse	0,45 %	1 % nitrate 0 % nitrite	non testé	Mortier à base de plâtre, sable fin, chaux et/ou poudre de tuffeau
P31	Tuffeau pulvérulent abrité Photo: 5020046-48; Prélèvement: portail ouest, voussure, 2ème rouleau sud, 3ème à 6ème claveau, prélevé par brossage à la surface	non testé	non testé	0,75%, pourrait correspondre à environ 1,34% de gypse	0,95 %	0,5 % nitrate 0 % nitrite	non testé	Sulfate, chlorure et nitrate abondants

## Localisation sur fonds photo

Prélèvements du tableau ci-avant



98. ↑ Localisation des prélèvements sur la façade ouest.



99. ← Prélèvements ERMD8  
et ERMX2. P5300069

## DOCUMENT JOINT : RAPPORT ERM

Document reproduit ci-après, pagination indépendante. Les pages 1/23 à 23/23 sont issues du fichier pdf transmis par ERM, les pages 24/35 à 35/35 sont des pages scannées du rapport papier transmis par ERM.

### Commentaires

Les valeurs seuils indiquées pages 8/35 pour les sulfates doivent être nuancées : le gypse sous forme compacte, qui forme une sorte de « calcin », peut-être présent en quantité très supérieure à celle indiquée sans dommage pour la pierre dans certaines conditions de conservation (le prélèvement ERMD11 est proche de ce cas de figure); il peut alors être conservé, surtout s'il témoigne de l'épiderme d'origine<sup>20</sup>. C'est le gypse sous forme non compacte, visible sous forme d'efflorescences, que le dessalement doit viser à retirer (cas général hors ERMD11 ici).

Les seuls sels solubles identifiés (page 21/23) dans les zones altérées sont le gypse (sulfate de calcium bihydraté, c'est notamment le constituant très majoritaire du plâtre, produit également de la pollution, voir note 3 page 17) et l'halite (chlorure de sodium, c'est le constituant très majoritaire du sel marin). Les dosages indiquent clairement l'abondance de nitrate, mais aucun sel de ce type n'est identifié. De même pour les sulfates on peut suspecter la présence, en petites quantités, d'espèces bien plus solubles que le gypse identifié (voir figure 94 page 36).

La diffraction de rayons X sur ERMX2 (page 21/23) ne met aucun sel soluble en évidence, probablement en raison de la teneur relativement faible en sels solubles dont témoigne ERMD8. Il s'agit pourtant indiscutablement d'un tuffeau feuilleté et désagrégé très typique de l'action d'un sel, et probablement du gypse en particulier (figure 99 page 52). On peut émettre l'hypothèse qu'il s'agit d'un faciès d'altération ancien, suite à une accumulation de sels qui ont été depuis rincés par la pluie, au moins à l'endroit du prélèvement.

L'étude pétrographique du mortier du prélèvement ERML3 ne met pas en évidence le plâtre que celui-ci contient très probablement. ; le gypse est identifié par la diffraction de rayons X sur DRX3. Ce mortier correspond au prélèvement P27 de l'annexe ci-avant : il contient environ 6,5% de sulfate ; vu l'excellent état de conservation du mortier à l'endroit du prélèvement (figure 42 page 15), une origine externe est très peu probable. Le mortier n'est pas déstructuré par l'acide chlorhydrique, ce qui indique qu'il n'est pas lié uniquement par une chaux aérienne.

---

<sup>20</sup> Philippe BROMBLET, Véronique VERGES-BELMIN (LRMH) : « l'élimination des sulfates sur la statuaire de plein air : une habitude discutable » dans *Le dessalement des matériaux poreux*, Journée d'étude de la SFIIC, Poitiers, 9-10 mai 1996.

Enfin le mortier du prélèvement ERML2 pourrait contenir un peu de ciment blanc ou de chaux hydraulique , car il n'est pas totalement déstructuré par l'acide chlorhydrique et ne contient pas de plâtre (prélèvement P8 de l'annexe ci-avant).

## SARL Etudes Recherches Matériaux (E.R.M.)

### Siège Social

Espace 10 - Z.I. République II  
Rue Albin Haller  
86000 POITIERS

### Bureau et Laboratoire

Faculté des Sciences, Bât. Géologie, 1<sup>er</sup> ét.  
40, Avenue du Recteur Pineau  
86022 POITIERS CEDEX

Téléphone : 05 49 46 18 11

Télécopie : 05 49 45 40 26

E-mail : erm@erm-poitiers.fr

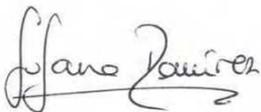
### **ANALYSES QUANTITATIVES ET QUALITATIVES DE SELS SOLUBLES ET ETUDES PETROGRAPHIQUES DE MORTIERS**

#### **Portails Nord et Ouest de l'église Saint-Gilles à L'Ile Bouchard (Indre-et-Loire)**

Commanditaire : **Monsieur J.P. BLIN**  
Direction Régionale des Affaires Culturelles du Centre  
Conservation Régionale des Monuments Historiques  
6, rue de la Manufacture  
45000 ORLEANS

V/Réf commande : Marché N° 05.37.016  
N/Réf : Devis 03-223 MCC155 en date du 25 novembre 2003

Juin 2006

Rédacteur :  S. RAMIREZ-MARTIN	Vérificateur :  D. MARCHAND	Approbateur :  F. RASSINEUX
<b>Diffusion du rapport :</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- Monsieur M. BLIN – Conservateur Régional des Monuments Historiques – 2 exemplaires</li><li>- Monsieur O. ROLLAND – Conservateur et Restaurateur – 1 exemplaire</li></ul>		

## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>3</b>
<b>I – MATERIELS .....</b>	<b>4</b>
<b>II – METHODES .....</b>	<b>6</b>
<i>II.1. Extraction et dosage des sels extractibles à l'eau .....</i>	<i>6</i>
<i>II.2. Etude pétrographique sur lame mince .....</i>	<i>6</i>
<i>II.3. Diffraction de rayons X .....</i>	<i>7</i>
<b>III – RESULTATS.....</b>	<b>8</b>
<i>III.1. Extraction et dosage des sels extractibles à l'eau .....</i>	<i>8</i>
<i>III.2. Observations en microscopie optique et électronique à balayage et analyse chimiques qualitatives par microfluorescence de rayons X .....</i>	<i>10</i>
<i>Echantillon ERML1 .....</i>	<i>11</i>
<i>Echantillon ERML2 .....</i>	<i>14</i>
<i>Echantillon ERML3 .....</i>	<i>17</i>
<i>Echantillon ERML4 .....</i>	<i>19</i>
<i>III.3. Diffraction de rayons X .....</i>	<i>21</i>
<b>IV – ANNEXES .....</b>	<b>23</b>



***ANALYSES QUANTITATIVES ET QUALITATIVES DE  
SELS SOLUBLES ET ETUDES PETROGRAPHIQUES  
DE MORTIERS***

***Portails Nord et Ouest de l'église Saint-Gilles à L'Ile  
Bouchard (Indre-et-Loire)***

## **INTRODUCTION**

Ces analyses ont été réalisées dans le cadre de l'étude préalable aux travaux de restauration de l'église Saint-Gilles de L'Ile Bouchard (Indre-et-Loire). Cette étude a porté sur une série d'échantillons transmise par Monsieur O. ROLLAND, restaurateur et conservateur de sculptures. Il s'agit des prélèvements de poudres de pierres et de fragments d'enduits provenant des portails des façades Nord et Ouest.

Des analyses quantitatives des espèces extractibles dans l'eau ont été effectuées sur les prélèvements de poudre de pierres. De plus, des analyses par diffraction de rayons X sur certains prélèvements ont été réalisées dans le but d'identifier la nature minéralogique des espèces salines cristallisées. Par ailleurs, des observations et des analyses chimiques aux microscopes optique et électronique à balayage ont été réalisées sur les échantillons d'enduits. En complément de cette étude, la caractérisation minéralogique des enduits a été réalisée par le biais d'une analyse par diffraction de rayons X.

Ce rapport présente les résultats des différentes observations et analyses effectuées sur les échantillons par ordre croissant des numéros de référence des échantillons.

## I – MATERIELS

Les matériaux étudiés proviennent des portails des façades Nord et Ouest de l'église Saint-Gilles à L'Île Bouchard (Indre-et-Loire). Les prélèvements ont été effectués par Monsieur ROLLAND. Il s'agit, d'une part, d'une série de dix-sept échantillons de pierre prélevés en surface et en profondeur avant et après un test de dessalement dans le but d'évaluer l'état de contamination de la pierre par les sels. D'autre part, afin de caractériser la nature des joints de maçonnerie, quatre échantillons d'enduits ont été prélevés.

Les échantillons ont été réceptionnés au laboratoire ERM le 1 juin 2006 et ils portent la référence ERM 06-062

Le tableau 1 présente le référencement des échantillons, leur localisation et leurs caractéristiques, conformément aux informations communiquées par Monsieur ROLLAND, ainsi que les analyses effectuées dans le cadre de cette étude. L'intégralité des informations transmises sur chacun des différents échantillons prélevés est présentée en **annexe I** de ce rapport.

La localisation des prélèvements effectués par Monsieur ROLLAND est illustrée sur les planches en **annexe II**.

Référence	Localisation	Prélèvement	Description	Analyses réalisées
<b>ERMD1</b>	Intrados des claveaux 3 à 6 sur la voussure centrale du portail Ouest	En surface	Tuffeau pulvérulent	Dosage de sels solubles (Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Na <sup>+</sup> et K <sup>+</sup> )
<b>ERMD2</b>	Entre 9 <sup>ème</sup> et 10 <sup>ème</sup> modillon de la 1 <sup>ère</sup> assise sous la corniche de la façade Ouest	Intervalle 0 à 5 mm	Tuffeau boursouflé et désagrégé	Dosage de sels solubles (Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Na <sup>+</sup> et K <sup>+</sup> )
<b>ERMD3</b>	2 <sup>ème</sup> assise au-dessus de la petite corniche sur la façade Ouest	Intervalle 0 à 1 mm	Tuffeau pulvérulent Avant test de dessalement	Dosage de sels solubles (Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Na <sup>+</sup> et K <sup>+</sup> )
<b>ERMD4</b>	Idem ERMD3	Intervalle 5 à 10 mm	Tuffeau Avant test de dessalement	Dosage de sels solubles (Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Na <sup>+</sup> et K <sup>+</sup> )
<b>ERMD5</b>	Idem ERMD3	Intervalle 90 à 110 mm	Tuffeau Avant test de dessalement	Dosage de sels solubles (Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Na <sup>+</sup> et K <sup>+</sup> )
<b>ERMD6</b>	Idem ERMD3	Intervalle 0 à 1 mm	Tuffeau pulvérulent Après test de dessalement	Dosage de sels solubles (Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Na <sup>+</sup> et K <sup>+</sup> )
<b>ERMD7</b>	Idem ERMD3	Intervalle 5 à 10 mm	Tuffeau Après test de dessalement	Dosage de sels solubles (Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Na <sup>+</sup> et K <sup>+</sup> )
<b>ERMD8</b>	Côté droit du 2 <sup>ème</sup> bloc à gauche du portail sur la 2 <sup>ème</sup> assise au-dessous du talus sur la façade Nord	Intervalle 0 à 5 mm	Tuffeau feuilleté et désagrégé	Dosage de sels solubles (Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Na <sup>+</sup> et K <sup>+</sup> )



Référence	Localisation	Prélèvement	Description	Analyses réalisées
ERMD9	Coté gauche du 2 <sup>ème</sup> bloc à gauche du portail sur la 2 <sup>ème</sup> assise au-dessous du talus sur la façade Nord	Intervalle 90 à 100 mm	Tuffeau	Dosage de sels solubles (Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Na <sup>+</sup> et K <sup>+</sup> )
ERMD10	1 <sup>er</sup> claveau à droite et 2 <sup>ème</sup> claveau à gauche de la voussure inférieure du portail Nord	En surface	Tuffeau pulvérulent	Dosage de sels solubles (Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Na <sup>+</sup> et K <sup>+</sup> )
ERMD11	1 <sup>er</sup> bloc de la 2 <sup>ème</sup> assise au-dessous du sol à droite du portail Nord	Intervalle 0 à 1 mm	Tuffeau boursouflé induré superficiel et pulvérulence sous-jacente	Dosage de sels solubles (Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Na <sup>+</sup> et K <sup>+</sup> )
ERMD12	Idem ERMD11	Intervalle 90 à 110 mm	Tuffeau	Dosage de sels solubles (Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Na <sup>+</sup> et K <sup>+</sup> )
ERMD13	Entre 9 <sup>ème</sup> et 10 <sup>ème</sup> modillon de la 2 <sup>ème</sup> assise sous la corniche de la façade Ouest	Intervalle 0 à 1 mm	Tuffeau pulvérulent Avant test de dessalement	Dosage de sels solubles (Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Na <sup>+</sup> et K <sup>+</sup> )
ERMD14	Idem ERMD13	Intervalle 0 à 1 mm	Tuffeau pulvérulent Après test de dessalement	Dosage de sels solubles (Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Na <sup>+</sup> et K <sup>+</sup> )
ERMX1	Idem ERMD1	Idem ERMD1	Idem ERMD1	Diffraction de rayons X
ERMX2	Idem ERMD8	Idem ERMD8	Idem ERMD8	Diffraction de rayons X
ERMX3	Idem ERMD10	Idem ERMD10	Idem ERMD10	Diffraction de rayons X
ERML1	3 <sup>ème</sup> bloc de la 3 <sup>ème</sup> assise du talus au-dessus du portail Nord	Surface	Restes de badigeon épais ancien, très fragile, face extérieure plus ou moins salie grisâtre, relativement régulière et face inférieure beige (terre ?)	Etude pétrographique aux microscopes optique et électronique à balayage sur lame mince
ERML2	5 <sup>ème</sup> assise au-dessus de la petite corniche sur la façade Ouest	Surface	Enduit ancien, imitation de tuffeau, bonne cohésion, longtemps protégé par une « plaque d'assurance »	Etude pétrographique aux microscopes optique et électronique à balayage sur lame mince Diffraction de rayons X
ERML3	7 <sup>ème</sup> assise de l'ébrasement Sud de la porte Ouest	Surface	Enduit ancien, supposé 1878-80, imitation de tuffeau	Etude pétrographique aux microscopes optique et électronique à balayage sur lame mince Diffraction de rayons X
ERML4	3 <sup>ème</sup> claveau droit de la baie au-dessous du portail Ouest	Surface	Reste de rejointoiement et ragréage ancien, quelques grains du joint de sable et chaux adhérent dessous	Etude pétrographique aux microscopes optique et électronique à balayage sur lame mince Diffraction de rayons X

*Tableau 1 : Référencement, localisation et description des échantillons conformément aux informations communiquées par Monsieur ROLLAND, ainsi que les analyses effectuées dans le cadre de cette étude.*



## II – METHODES

### *II.1. Extraction et dosage des sels extractibles à l'eau*

L'extraction des sels solubles a été réalisée selon le protocole suivant (adapté de la norme italienne NORMAL - 13 / 83 : *Dosaggio dei sali solubili*, recommandations du LRMH). Les échantillons à réception sont broyés dans un mortier en agate puis séchés à l'étuve à 60 °C, de manière à éviter des problèmes de modifications de la structure cristalline de certaines phases. En standard, l'extraction des sels solubles s'effectue à partir d'une prise d'essai de 100 mg du matériau sec mis en contact avec de l'eau distillée. La solubilisation des phases s'effectue avec un rapport solution/solide donné, par agitation mécanique durant 72 heures minimum. Les dosages sont réalisés après stabilisation de la conductivité mesurée ( $\Delta$  entre deux mesures espacées de 24 heures inférieure au pour-cent). Le dosage des anions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ ) s'effectue dans le filtrat par chromatographie ionique (DIONEX DX 500) avec une colonne analytique AS 9HC. Le dosage des cations monovalents ( $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ ) est réalisé par spectrométrie d'émission de flamme.

### *II.2. Etude pétrographique sur lame mince*

Des lames minces ont été réalisées après imprégnation dans une résine de type Araldite (CIBA-GEIGY) sur les prélèvements d'enduits. Les préparations ont été collées sur un support de verre et descendues à une épaisseur d'une trentaine de microns avec des outillages diamantés spécifiques et diverses poudres abrasives. Un poli terminal est obtenu sur des polisseuses avec des abrasifs diamantés très fins.

L'étude des lames minces ainsi obtenues a été réalisée au microscope optique polarisant en lumière transmise polarisée non analysée et en lumière polarisée analysée sur un microscope de type Olympus BH2.

En complément de l'étude en microscopie optique, l'utilisation du microscope électronique à balayage s'est avérée indispensable pour déterminer la nature chimique des composées constituant les échantillons.

Le microscope utilisé est un appareil de marque JEOL de type 5600 LV (Low Vacuum) équipé d'un détecteur de type Everhart-Thornley permettant d'observer les surfaces en électrons secondaires et d'un détecteur d'électrons rétrodiffusés Centaurus (K.E. Development i.c., Cambridge). La gamme de grossissements possible s'étend de x 35 à x 300 000. Le système d'analyse utilisé est le système INCA 300 OXFORD Instruments



constitué d'un détecteur solide [(Si(Li)), 133 eV] de fluorescence X en dispersion d'énergie (E.D.S.) avec fenêtre mince atmosphérique. Ce type d'appareillage permet la détection des éléments chimiques de masse atomique  $> 5$  (détection possible des éléments à partir du carbone). Les conditions d'analyses sont les suivantes : tension d'accélération 15 kV, courant sonde  $6.10^{-10}$  A, temps de comptage 50 secondes.

Les clichés présentés dans ce rapport ont été réalisés en électrons rétrodiffusés, ce mode d'observation permettant de mieux contraster les variations chimiques. En effet, les plages les plus claires correspondent à des zones composées d'éléments chimiques de masses atomiques plus élevées ou de densité globale plus importante.

### *II.3. Diffraction de rayons X*

La diffraction de rayons X a été réalisée selon la technique des poudres désorientées pour l'identification des minéraux présents dans l'échantillon. L'acquisition du diffractogramme de rayons X a été réalisée sur un diffractomètre Siemens D 500 Kristalloflex à échantillon tournant (radiation Cu  $K\alpha$  ;  $\lambda_{Cu} = 1,5406 \text{ \AA}$ ) muni d'un détecteur solide EDS (diode Si(Li)) refroidi par effet Peltier. Le diffractogramme est enregistré sur micro-ordinateur à l'aide d'un dispositif d'acquisition DACO-MP (SOCABIM). Les conditions d'acquisition du diffractogramme sont : domaine angulaire balayé :  $5 - 65^\circ 2\theta$  à une vitesse de balayage de  $0.375^\circ 2\theta/\text{min}$ . L'identification des minéraux sur diagramme de poudre est réalisée à l'aide du logiciel DIFFRAC-AT (Socabim) et de la banque de données minérale J.C.P.D.S.<sup>1</sup>. Cette base de données recense la position et l'intensité des pics caractéristiques de plus de 50 000 composés inorganiques cristallisés.

---

<sup>1</sup> JCPDS: Joint Committee on Powder Diffraction Standards

### III – RESULTATS

#### III.1. Extraction et dosage des sels extractibles à l'eau

Les résultats du dosage des sels solubles sur les échantillons analysés sont présentés dans le tableau 2 ci-après. Ils sont exprimés en g/kg de matière sèche à 60 °C et en pourcentage massique.

Référence échantillon	Chlorures		Sulfates		Nitrates		Sodium		Potassium	
	g/kg	%	g/kg	%	g/kg	%	g/kg	%	g/kg	%
ERMD1	10,6	1,06	3,2	0,32	14,5	1,45	4,45	0,44	1,84	0,18
ERMD2	7,4	0,74	26,1	2,61	12,6	1,26	2,03	0,20	0,39	0,04
ERMD3	17,4	1,74	3,0	0,30	48,4	4,84	11,63	1,16	5,72	0,57
ERMD4	11,8	1,18	2,4	0,24	37,4	3,74	7,38	0,74	4,43	0,44
ERMD5	9,5	0,95	<0,5	<0,05	30,0	3,00	5,99	0,60	3,80	0,38
ERMD6	2,6	0,26	2,7	0,27	3,8	0,38	1,58	0,16	1,58	0,16
ERMD7	1,8	0,18	0,6	0,06	2,9	0,29	1,28	0,13	1,28	0,13
ERMD8	0,5	0,05	<0,5	<0,05	<0,5	<0,05	<0,2	<0,02	<0,2	<0,02
ERMD9	1,8	0,18	0,8	0,08	1,2	0,12	1,24	0,12	0,19	0,02
ERMD10	9,3	0,93	5,9	0,59	5,7	0,57	2,79	0,28	0,20	0,02
ERMD11	0,6	0,06	226,6	22,66	3,5	0,35	0,48	0,05	0,58	0,06
ERMD12	<0,5	<0,05	<0,5	<0,05	<0,5	<0,05	0,19	0,02	0,76	0,08
ERMD13	9,7	0,97	9,5	0,95	12,0	1,20	3,09	0,31	0,60	0,06
ERMD14	2,8	0,28	2,4	0,24	2,6	0,26	0,68	0,07	0,19	0,02

*Tableau 2 : Teneurs en chlorures, sulfates, nitrates, sodium et potassium extraits en g/kg de matière sèche à 60°C et en pourcentage massique des échantillons de poudre de pierre analysés (en rose : salinités supérieures des valeurs limites couramment admises)*

**REMARQUE GENERALE :** Lorsque les concentrations en sels solubles sont importantes, elles sont néfastes à la durabilité de la roche (amplification des phénomènes d'altération). La majorité des sels sont présents dans la porosité ouverte de la roche, on estime donc qu'en règle générale, lorsque les concentrations respectives dépassent le seuil de 0,3-0,4 % pour les sulfates et de 0,1 à 0,2 % pour les nitrates ou les chlorures, la réalisation d'actions de dessalage est indispensable avant l'application d'éventuels traitements (consolidant, hydrofuge,...) pour une bonne efficacité de ces derniers. Ces valeurs indicatives ne sont que des valeurs moyennes et varient en fonction de la nature des sels présents, de celle de la roche et notamment de son espace poral.



Les résultats des dosages des ions solubles dans l'eau montrent une salinité élevée, notamment pour les échantillons provenant de la façade Ouest. En effet, sur les prélèvements effectués sur cette façade, **avant le test de dessalement**, on observe des concentrations très élevées en nitrates et chlorures, oscillant entre 1,20 % et 4,8 % pour les nitrates, et entre 0,7 % et 1,7 % pour les chlorures, indépendamment de la localisation du prélèvement dans l'ouvrage. En revanche, ces concentrations diminuent légèrement avec la profondeur du prélèvement, demeurant toutefois très importantes (3,00 % en nitrates et 0,95 % en chlorures dans l'intervalle 90 à 110 mm, échantillon référencé ERMD5). On observe des concentrations ponctuelles fortes en sulfates dans les échantillons prélevés au-dessous de la corniche (2,61 % pour l'échantillon ERMD2 et 0,95 % pour l'échantillon ERMD13). Par ailleurs, les teneurs en sulfates mesurées sont d'environ 0,3 % (échantillons ERMD1 et ERMD3). On remarque une diminution significative de la teneur en sulfates avec la profondeur ; la concentration en sulfates est inférieure à 0,05 % à 90 mm (échantillon ERMD5).

**Après le test de dessalement**, les teneurs en chlorures et nitrates diminuent d'un ordre de grandeur, jusqu'à 0,38 % et 0,26 % pour les nitrates (échantillons ERMD6 et ERMD14) et 0,26 % et 0,28 % pour les chlorures (échantillons ERMD6 et ERMD14). Ces concentrations sont tout de même supérieures aux valeurs couramment admises. De même, les concentrations en sulfates diminuent après le test de dessalement, pour atteindre des teneurs d'environ 0,25 %, indépendamment de la teneur en sulfates initiale (0,30 % pour l'échantillon ERMD3 et 0,95 % pour l'échantillon ERMD13).

En ce qui concerne les résultats de dosages de sels sur les échantillons prélevés sur la façade Nord, les concentrations d'anions et de cations solubles dans l'eau sont négligeables pour les échantillons ERMD8 et ERMD12, prélevés, respectivement, en surface et en profondeur (intervalle 90 à 110 mm). En revanche, on observe en surface des concentrations en chlorures, sulfates et nitrates élevées pour l'échantillon ERMD10 et une teneur en sulfates anormalement élevée : 22,7 % pour l'échantillon ERMD11. De plus, on remarque des teneurs en chlorures et nitrates significatives dans l'intervalle 90 à 100 mm (échantillon ERMD9).

On note des concentrations notables en potassium, et surtout en sodium, associées à la présence d'anions monovalents (nitrates et chlorures).

En résumé, d'après les résultats obtenus sur les échantillons prélevés, le test de dessalement apparaît efficace puisque les concentrations en nitrates et chlorures, les espèces ioniques présentes en proportions les plus importantes, diminuent d'un ordre de grandeur, tandis que les teneurs en sulfates mesurées semblent atteindre une concentration seuil (« bruit



# ERM

ETUDES RECHERCHES MATERIAUX

ERM 06 104 SR 179 10/23

de fond ») d'environ 0,25 %. Néanmoins, les concentrations en nitrates et chlorures demeurent notables.

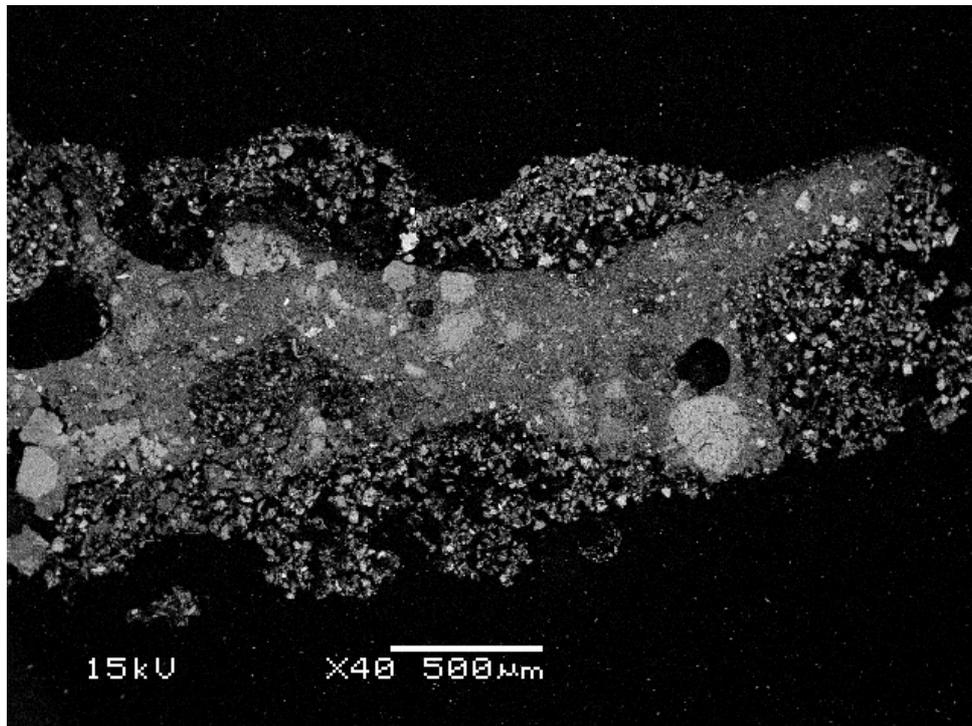
### *III.2. Observations en microscopie optique et électronique à balayage et analyse chimiques qualitatives par microfluorescence de rayons X*

Les observations et analyses effectuées sur les enduits sont présentées par échantillon dans la suite de ce rapport. Les clichés photographiques illustrant les observations au microscope optique polarisant sont présentés en vis-à-vis du texte. L'échelle est donnée sous le cliché (angle inférieur droit).



<b>Référence :</b>	Echantillon ERML1
<b>Localisation :</b>	3 <sup>ème</sup> bloc de la 3 <sup>ème</sup> assise du talus au-dessus du portail Nord
<b>Commentaires :</b>	Restes de badigeon épais ancien, très fragile, face extérieure plus ou moins salie grisâtre, relativement régulière, et face inférieure beige (terre ?)

Les **clichés A et B** (en vis à vis du texte) présentent les observations effectuées en microscopie optique sur cet échantillon. Le **cliché 1** ci-après illustre les observations effectuées au microscope électronique à balayage en mode électrons rétrodiffusés sur la même zone.



*Cliché 1 : Photographie au microscope électronique à balayage en mode électrons rétrodiffusés sur la lame mince réalisée à partir de l'échantillon ERML1.*

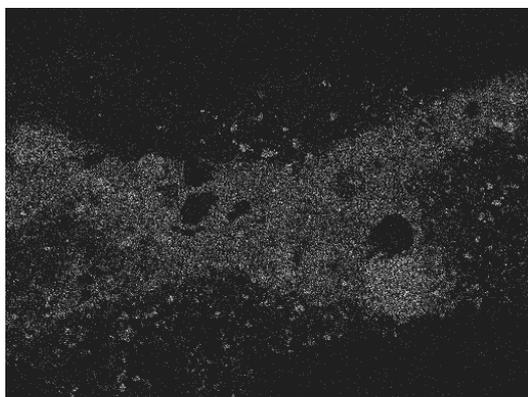
Les observations microscopiques montrent que l'échantillon est constitué de deux matériaux distincts. La disposition de ces deux matériaux est très irrégulière. En effet, on observe un chevauchement des deux matériaux formant des couches d'épaisseur variable. Par



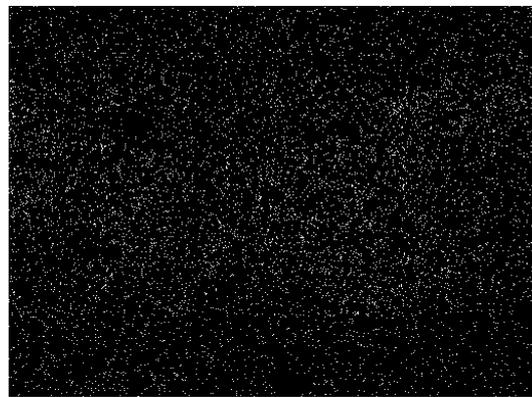
ailleurs, la préparation étudiée présente un état d'altération important, matérialisé par la présence de fissures et de nombreux pores parfois de taille millimétriques.

Tenant compte de la granulométrie et de l'aspect générale des matériaux et d'après les informations communiquées par Monsieur ROLLAND, le matériau localisé dans la partie centrale des clichés A, B et 1 constitue le badigeon tandis que sur les parties supérieure et inférieure des clichés A, B et 1, on observe un matériau plus grossier.

Au microscope optique polarisant, le badigeon est composé par une matrice microcristalline fine et homogène de teinte brune en lumière polarisée non analysée (cliché A) et de teinte sombre en lumière polarisée analysée (cliché B). Les observations au microscope électronique à balayage en mode d'électrons rétrodiffusés (cliché 1) mettent en évidence la texture caractéristique de la matrice, observée au microscope optique. Les analyses chimiques réalisées en microfluorescence X montrent que la matrice est composée essentiellement par du calcium. Il s'agit d'un badigeon de chaux avec la présence caractéristique de nodules. Ce badigeon ne présente pas de sulfatation significative, d'après les analyses chimiques effectuées. La figure 1 illustre la distribution du calcium et du soufre sur la préparation étudiée.



Ca Ka1



S Ka1

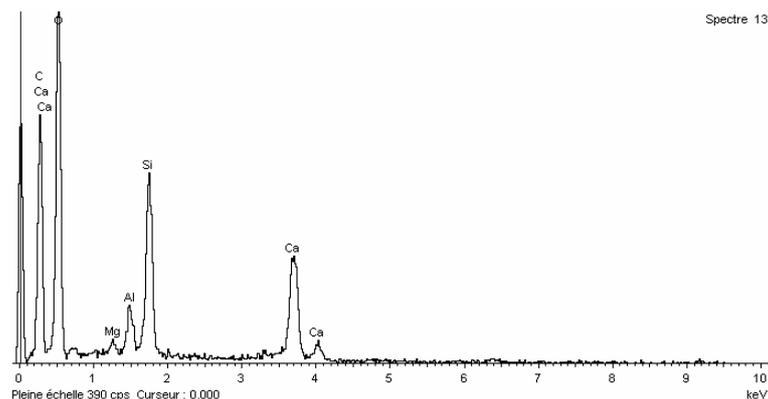
**Figure 1 :** Distribution de calcium et de soufre sur la préparation réalisée à partir du prélèvement ERML1.

En ce qui concerne la charge minérale, elle est peu abondante, relativement homogène du point de vue minéralogique et de granulométrie fine. En effet, la charge est constituée essentiellement par de grains détritiques, notamment du quartz, et de grains de carbonates, de dimensions allant de quelques microns à 100  $\mu\text{m}$ .

Au contact du badigeon, on observe un enduit d'aspect homogène constituée d'un assemblage de grains de faible dimension. Au microscope optique polarisant, il possède une matrice cryptocristalline de teinte beige en lumière polarisée non analysée (cliché A) tandis qu'en lumière polarisée et analysée (cliché B), elle apparaît sous des teintes sombres, pseudo



isotrope (éteinte). On remarque la présence significative de matériaux ferrugineux, de micas et d'argiles, caractérisées par des teintes brun sombre, localisés au sein de la matrice. La matrice présente une porosité relativement importante caractérisée par des nombreux pores de faible dimension. Cette matrice montre une composition chimique très riche en silicium et calcium avec des teneurs en aluminium significatives (figure 2). Si l'hypothèse de l'emploi de liant à caractère hydraulique ne peut être complétement écarté, il apparaît plus vraisemblable qu'il s'agisse d'une chaux aérienne, les concentrations de silicium et d'aluminium seraient alors attribuées aux argiles et aux oxy-hydroxydes de fer associés à la charge. En effet, on distingue au sein de la matrice une charge abondante, de granulométrie très fine (dimension des grains inférieure à  $50 \mu\text{m}$ ) constituée par des grains de carbonate de calcium, d'éléments détritiques (feldspaths et notamment du quartz et des argiles), et des grains riches en fer, d'après les analyses chimiques effectuées.



**Figure 2 :** Analyse chimique qualitative réalisée sur la matrice de l'enduit au contact du badigeon de l'échantillon ERML1.

Des concentrations faibles mais significatives en chlorures ont été mesurées au sein de la matrice, ce qui semble indiquer la présence de sels solubles contenant de chlorures.

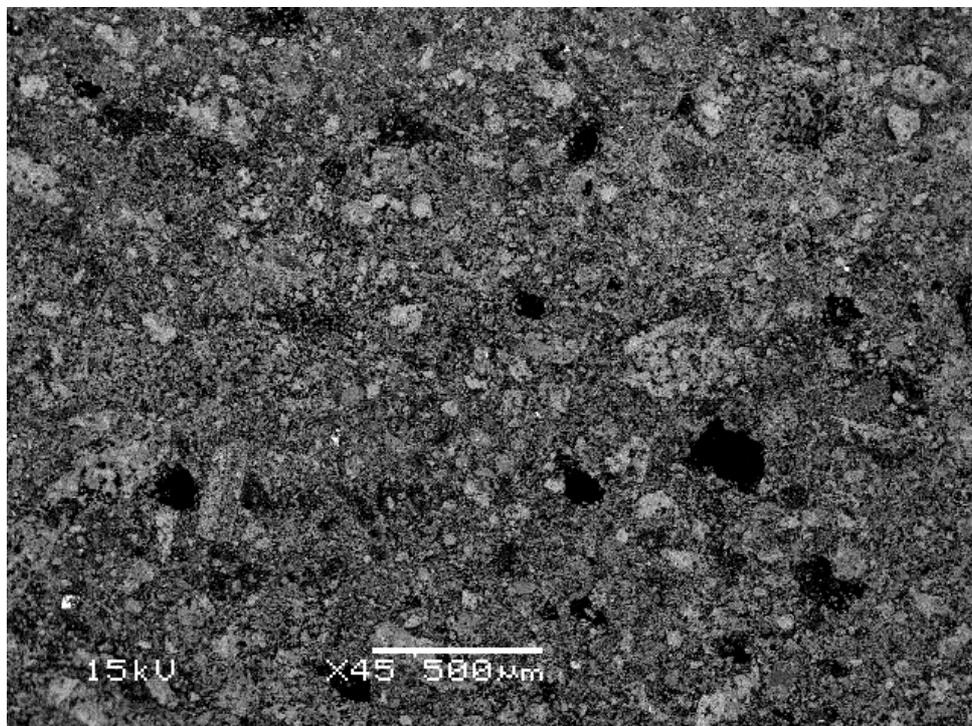
### **Synthèse des observations et analyses :**

***L'échantillon ERML1 est composé d'un badigeon de chaux et d'un enduit à base de chaux avec une charge détritique et carbonatée de granulométrie très fine et homogène.***



<b>Référence :</b>	Echantillon ERML2
<b>Localisation :</b>	5 <sup>ème</sup> assise au-dessus de la petite corniche sur la façade Ouest
<b>Commentaires :</b>	Enduit ancien, imitation de tuffeau, bonne cohésion

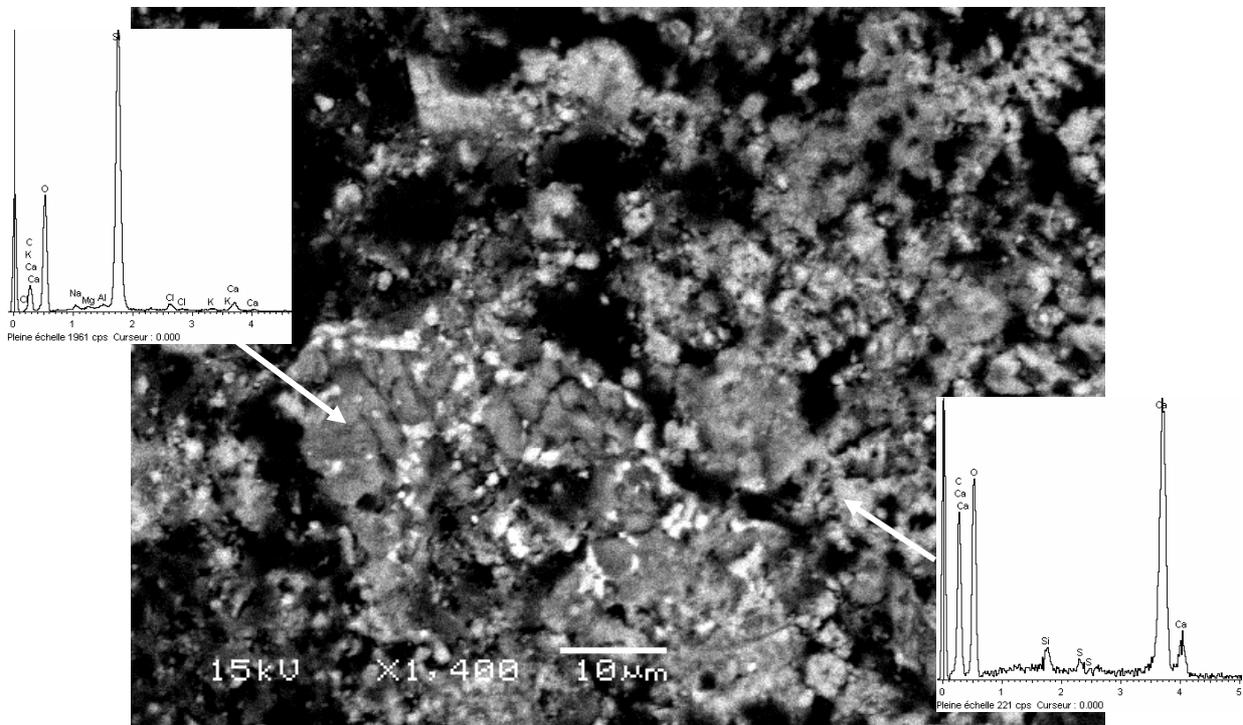
Les **clichés C à D** (en vis à vis du texte) présentent les observations effectuées en microscopie optique sur cet échantillon. Au microscope optique polarisant, l'enduit présente une matrice microcristalline de teinte brunâtre en lumière polarisée non analysée (cliché C). En lumière polarisée analysée (cliché D), cette matrice montre des teintes de polarisation sombre. L'échantillon montre un aspect compact du fait de sa granulométrie fine et de sa faible porosité. Le **cliché 2** ci-après illustre les observations effectuées sur cet échantillon au microscope électronique à balayage en mode électrons rétrodiffusés.



*Cliché 2 : Photographie au microscope électronique à balayage en mode électrons rétrodiffusés sur la lame mince réalisée à partir de l'échantillon ERML2.*



Les observations réalisées au microscope électronique à balayage soulignent le caractère microcristallin de la matrice. Elle est composée de grains de faible dimension, de densités chimiques variables, et par conséquent, de composition chimiques différentes (cliché 3). En effet, on distingue de grains de faible densité chimique, constitué essentiellement par du silicium, et de grains de forte densité chimiques présentant une composition chimique essentiellement calcique, d'après les analyses chimiques ponctuelles effectuées (cliché 3). Ces analyses montrent la présence de traces de chlore, vraisemblablement sous forme de chlorures.



*Cliché 3 : Photographie au microscope électronique à balayage en mode électrons rétrodiffusés sur la lame mince réalisée à partir de l'échantillon ERML2. Détail de la matrice.*

Selon les informations communiquées par Monsieur ROLLAND, l'ensemble des observations microscopiques et des analyses chimiques réalisées sur le prélèvement ERML2 sont compatibles avec l'hypothèse d'un mortier à la chaux visant à imiter la pierre. Du fait de la complexité de la composition chimique de la matrice ainsi que de sa granulométrie fine et homogène, il s'agit vraisemblablement d'un enduit élaboré à partir d'une roche sédimentaire caractérisée par une forte proportion de silice de faible cristallinité (type tuffeau).

Pour ce qui est de la charge minérale de cet échantillon, présente en faible proportion, elle est constituée par d'éléments détritiques (feldspaths et quartz) et par de grains de carbonates de calcium, essentiellement, finement broyés.



ERM

ETUDES RECHERCHES MATERIAUX

ERM 06 104 SR 179 16/23

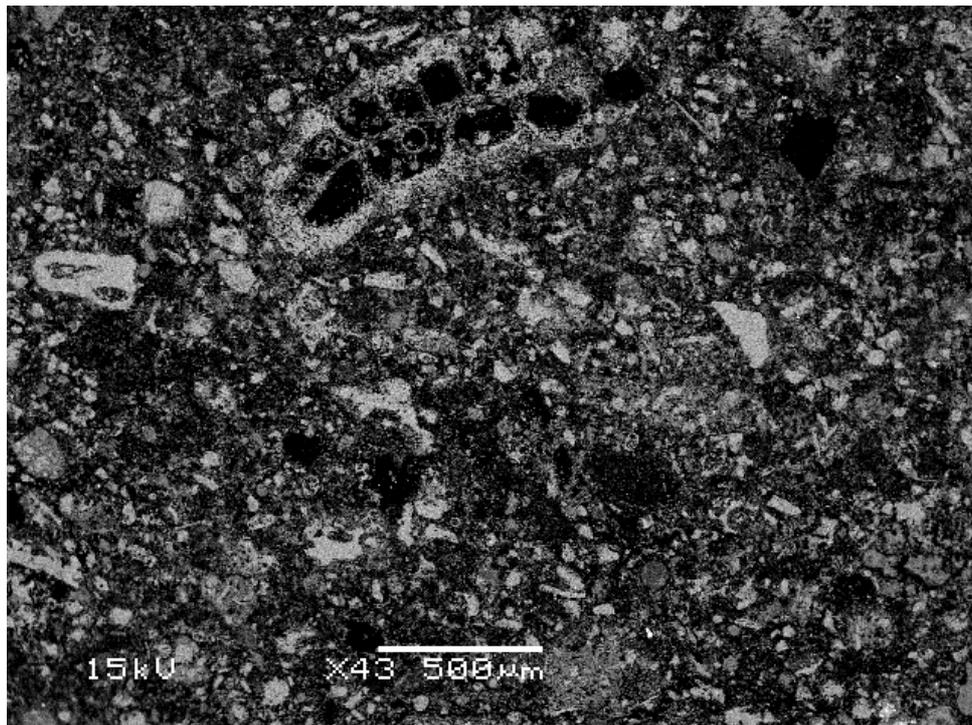
**Synthèse des observations et analyses :**

*L'échantillon ERML2 est un enduit à la chaux de matrice fine et homogène à forte dominante siliceuse provenant du broyage d'une roche calcaire riche en silice sédimentaire (type tuffeau). La charge détritique (notamment quartz) et carbonatée est peu abondante et de faible dimension.*



<b>Référence :</b>	Echantillon ERML3
<b>Localisation :</b>	7 <sup>ème</sup> assise de l'ébrasement Sud de la porte Ouest
<b>Commentaires :</b>	Enduit ancien, supposé 1878-80, imitation de tuffeau

Les **clichés E** et **F** (en vis à vis du texte) présentent les observations effectuées en microscopie optique sur l'échantillon ERML3. Le **cliché 4** ci-après illustre les observations effectuées au microscope électronique à balayage en mode électrons rétrodiffusés sur la même préparation.



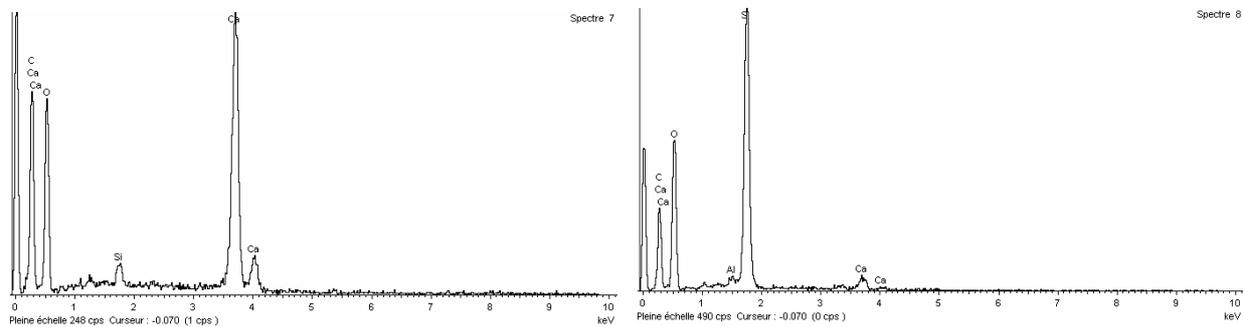
*Cliché 4 : Photographie au microscope électronique à balayage en mode électrons rétrodiffusés sur la lame mince réalisée à partir de l'échantillon ERML3.*

Au microscope optique polarisant, cet échantillon possède une matrice cryptocristalline de teinte beige en lumière polarisée non analysée (cliché E) tandis qu'en lumière polarisée et analysée (cliché F), elle apparaît sous des teintes sombres, pseudo isotrope (éteinte). Comme précédemment, les analyses chimiques ponctuelles réalisées au sein de la matrice mettent en évidence la présence de grains riches en silicium associés à des grains de composition fortement carbonatée (figure 3).



Par rapport à l'échantillon précédent, l'échantillon ERML3 présente une granulométrie plus grossière et une proportion importante au sein de la matrice de fragment d'éléments fossilifères de dimensions comprises entre quelques dizaines à plusieurs centaines de microns.

Du fait de la texture et de la composition chimique, cet enduit à la chaux peu ou pas hydraulique contiendrait une poudre de calcaire bioclastique avec une proportion significative en silice sédimentaire. Cette hypothèse semble être confirmée par les observations réalisées sur site par Monsieur ROLLAND selon lesquelles, il s'agit d'un enduit ancien d'imitation tuffeau.



**Figure 3 :** Analyses chimiques qualitatives réalisées sur la matrice de l'enduit de l'échantillon ERML3.

Pour ce qui est de la charge minérale de l'enduit, elle est constituée pour l'essentiel d'un sable fin composé de grains de minéraux détritiques, tels que quartz, feldspaths et micas, et de carbonate de calcium de morphologie variant de sub-anguleux à anguleux et de granulométrie étalée.

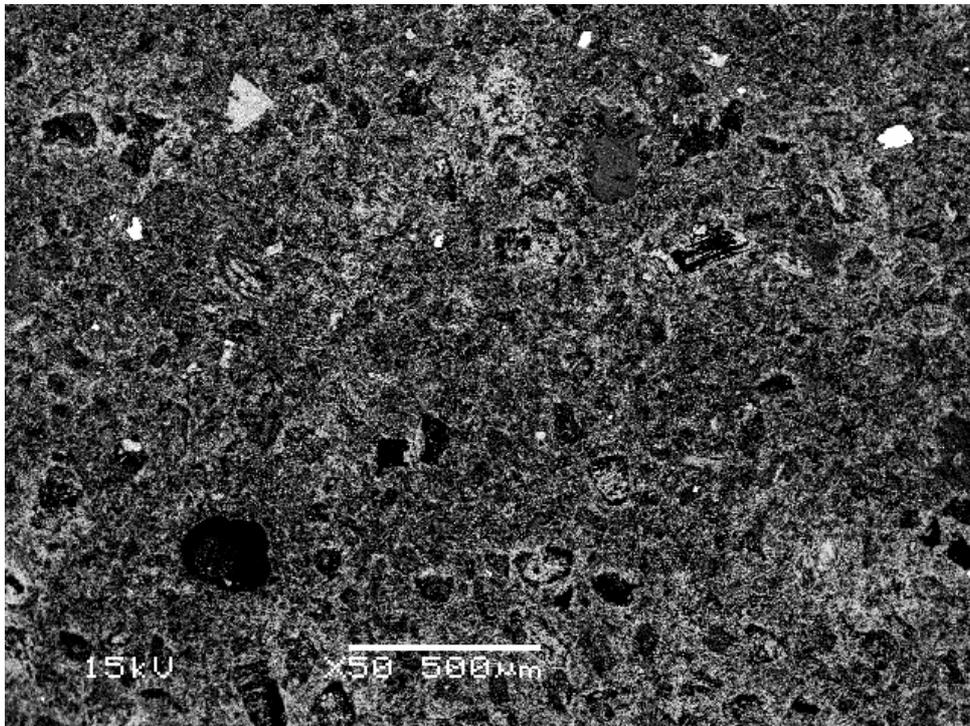
### **Synthèse des observations et analyses :**

*Comme précédemment, l'échantillon ERML3 est composé d'un enduit à base de chaux élaboré par broyage d'une roche calcaire fossilifère et riche en silice faiblement cristallisée (type tuffeau). La charge est constituée notamment par des grains de quartz et de carbonates de calcium.*



<b>Référence :</b>	Echantillon ERML4
<b>Localisation :</b>	3 <sup>ème</sup> claveau droit de la baie au-dessous du portail Ouest
<b>Commentaires :</b>	Reste de rejointoiement et ragréage ancien, quelques grains du joint de sable et chaux adhérent dessous

Les clichés **G** et **H** (en vis à vis du texte) présentent les observations effectuées en microscopie optique sur cet échantillon. L'enduit présente une matrice microcristalline caractérisée au microscope optique polarisant par un aspect incolore en lumière polarisée non analysée (cliché G) avec des teintes de polarisation variant du bleu au gris en lumière polarisée analysée (cliché H).

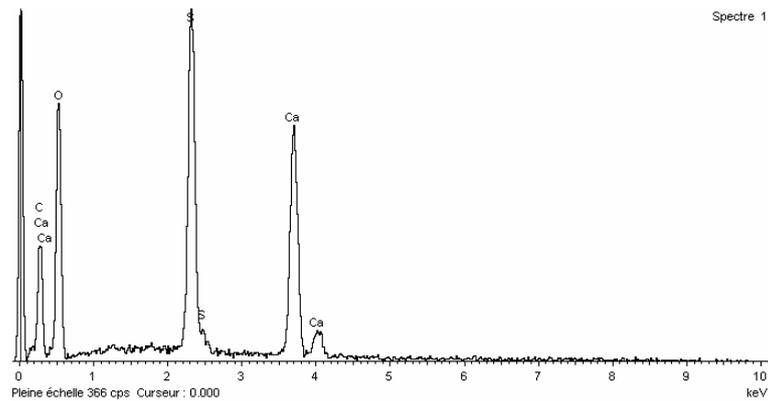


*Cliché 5 : Photographie au microscope électronique à balayage en mode électrons rétrodiffusés sur la lame mince réalisée à partir de l'échantillon ERML3.*

Les observations réalisées au microscope électronique à balayage en mode électrons rétrodiffusés mettent en évidence la fine et homogène granulométrie de la matrice de ce mortier (cliché 5). Elle constituée de nombreux cristaux aciculaires de faible dimension. Au



sein de la matrice, on observe de nombreuses vacuoles vides aux contours arrondis correspondant à d'anciennes bulles d'air piégées lors de la prise. Les analyses chimiques ponctuelles réalisées sur cette matrice montrent des compositions chimiques à base de soufre et de calcium en proportions voisines de celles d'un gypse (figure 4). Toutes ces indications sont caractéristiques d'un plâtre.



**Figure 4 :** Analyse chimique qualitative réalisée sur la matrice de l'enduit de l'échantillon ERMLA.

Outre la présence de grains de sulfate de calcium inclus dans la matrice, on observe la présence de grains de carbonates de calcium et sulfates de strontium (célestine). Ces phases minérales sont souvent associées au gypse ; ceci semble indiquer qu'il s'agit plus vraisemblablement de fragments issus du gisement exploité pour la fabrication de ce plâtre que d'un réel ajout de calcaire ou de célestine.

#### **Synthèse des observations :**

***L'échantillon référencé ERMLA est constitué par un enduit fin au plâtre sans réelle charge ajoutée.***



### III.3. Diffraction de rayons X

La composition chimique théorique ainsi que la référence J.C.P.D.S. des minéraux identifiés à partir de l'analyse des diffractogrammes de rayons X effectués sur les échantillons de poudres de pierre et d'enduits (en **annexe III** à la fin de ce rapport) sont consignées dans le tableau 3 ci-après.

Echantillon	Minéral	Formule	Référence JCPDS
<b>ERMX1</b>	Calcite	CaCO <sub>3</sub>	5-0586
	Quartz	SiO <sub>2</sub>	33-1161
	Opale	SiO <sub>2</sub> ·xH <sub>2</sub> O	38-0448
	Halite	NaCl	5-0628
	Muscovite	KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	6-0263
	Gypse	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	21-0816
<b>ERMX2</b>	Calcite	CaCO <sub>3</sub>	5-0586
	Quartz	SiO <sub>2</sub>	33-1161
	Opale	SiO <sub>2</sub> ·xH <sub>2</sub> O	38-0448
	Muscovite	KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	6-0263
<b>ERMX3</b>	Calcite	CaCO <sub>3</sub>	5-0586
	Quartz	SiO <sub>2</sub>	33-1161
	Opale	SiO <sub>2</sub> ·xH <sub>2</sub> O	38-0448
	Halite	NaCl	5-0628
	Gypse	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	21-0816
	Weddellite	C <sub>2</sub> CaO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	17-0541
<b>ERML2</b>	Calcite	CaCO <sub>3</sub>	5-0586
	Quartz	SiO <sub>2</sub>	33-1161
	Opale	SiO <sub>2</sub> ·xH <sub>2</sub> O	38-0448
	Halite	NaCl	5-0628
	Anorthite-Albite	(Ca,Na)(Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>8</sub>	18-1202
<b>ERML3</b>	Calcite	CaCO <sub>3</sub>	5-0586
	Quartz	SiO <sub>2</sub>	33-1161
	Gypse	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	33-0311
	Opale	SiO <sub>2</sub> ·xH <sub>2</sub> O	38-0448
	Halite	NaCl	5-0628
	Muscovite	KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	6-0263
<b>ERML4</b>	Gypse	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	33-0311
	Quartz	SiO <sub>2</sub>	33-1161

*Tableau 3 : Composition chimique théorique et référence J.C.P.D.S. des minéraux identifiés dans les échantillons étudiés.*



L'analyse minéralogique des échantillons référencés ERMX1, ERMX2 et ERMX3 est cohérente avec les résultats du dosage de sels solubles puisque elle met en évidence, outre la présence des minéraux constitutifs de la roche carbonatée (calcite, quartz et opale), des phases minérales de type « sel soluble » sur les échantillons avec de concentrations en sels solubles notables. En effet, les concentrations en chlorures et sulfates sont associées à la présence d'halite et de traces de gypse. De plus, sur le diffractogramme correspondant à l'échantillon ERMX3, la réflexion à  $10,5^\circ 2\theta$  est compatible avec la présence d'oxalate de calcium (type weddellite).

En revanche, aucune phase cristallisée contenant des nitrates n'a pu être mise en évidence. Du fait de la concentration de nitrates en solution et de l'environnement du monument, essentiellement calcique, on pourrait suspecter la présence de nitrates de calcium. D'après les données disponibles dans les ouvrages de référence, l'humidité relative de l'air en équilibre thermodynamique avec les nitrates de calcium sont inférieures à 53 % à  $20^\circ\text{C}$ , ce qui semble compatible pour permettre la cristallisation sous des conditions normales mais leur solubilité est très grande, supérieure à 3 kg/l à  $20^\circ\text{C}$ .

D'après les diffractogrammes de rayons X des échantillons référencés ERML2 et ERML3, les phases constitutives de ces échantillons sont la calcite, le quartz et l'opale. La présence de cette phase siliceuse de faible cristallinité confirme les hypothèses émises quant à la nature de ces enduits. Par ailleurs, on distingue la présence de minéraux détritiques, tels que feldspaths et micas, correspondant à la charge détritique variée et abondante présente dans les tuffeaux (de 30 à  $> 50\%$  pour certains) confirmant l'utilisation de tuffeau broyé comme charge de ces enduits. De plus, et comme pour les échantillons de poudre de pierre, on constate des contaminations significatives en sels solubles sur les échantillons d'enduit (de la halite et du gypse, dans l'échantillon ERML3). L'échantillon ERML4 est constitué essentiellement par du gypse.



# ERM

ETUDES RECHERCHES MATERIAUX

ERM 06 104 SR 179 23/23

## IV – ANNEXES

- Annexe I : Informations transmises par Monsieur ROLLAND
- Annexe II : Localisation des prélèvements effectués (documents transmis par Monsieur ROLLAND)
- Annexe III : Diffractogrammes de rayons X

*Les résultats mentionnés ci-dessus ne sont applicables qu'aux échantillons tels qu'ils sont définis dans le présent document.*

---

*La reproduction de ce rapport d'analyse n'est autorisée que sous sa forme intégrale. Il comporte 35 pages dont 11 pages d'annexes. La reproduction partielle ne peut être réalisée qu'avec l'accord préalable de la société ERM.*

---



Document ROLLAND ST. Le 20/04/2006, 14h00. Monsieur Rolland, 10 rue de la République, 69001 Lyon.  
Prévisions effectuées le 20/04/2006 à 14h00.

Code	Description	Quantité	Unité	Montant HT	Montant TTC
100000	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100001	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100002	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100003	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100004	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100005	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100006	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100007	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100008	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100009	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100010	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100011	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100012	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100013	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100014	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100015	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100016	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100017	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100018	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100019	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100020	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100021	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100022	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100023	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100024	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100025	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100026	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100027	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100028	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100029	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100030	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100031	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100032	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100033	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100034	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100035	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100036	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100037	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100038	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100039	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100040	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100041	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100042	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100043	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100044	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100045	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100046	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100047	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100048	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100049	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000
100050	Travaux de terrassement	1000	m <sup>2</sup>	10000	12000

### Annexe I

### Informations communiquées par Monsieur ROLLAND



Olivier ROLLAND: 37, Ile Bouchard, église Saint-Gilles, étude préalable à la restauration des portails  
Prélèvements expédiés à ERM le 31 mai 2006

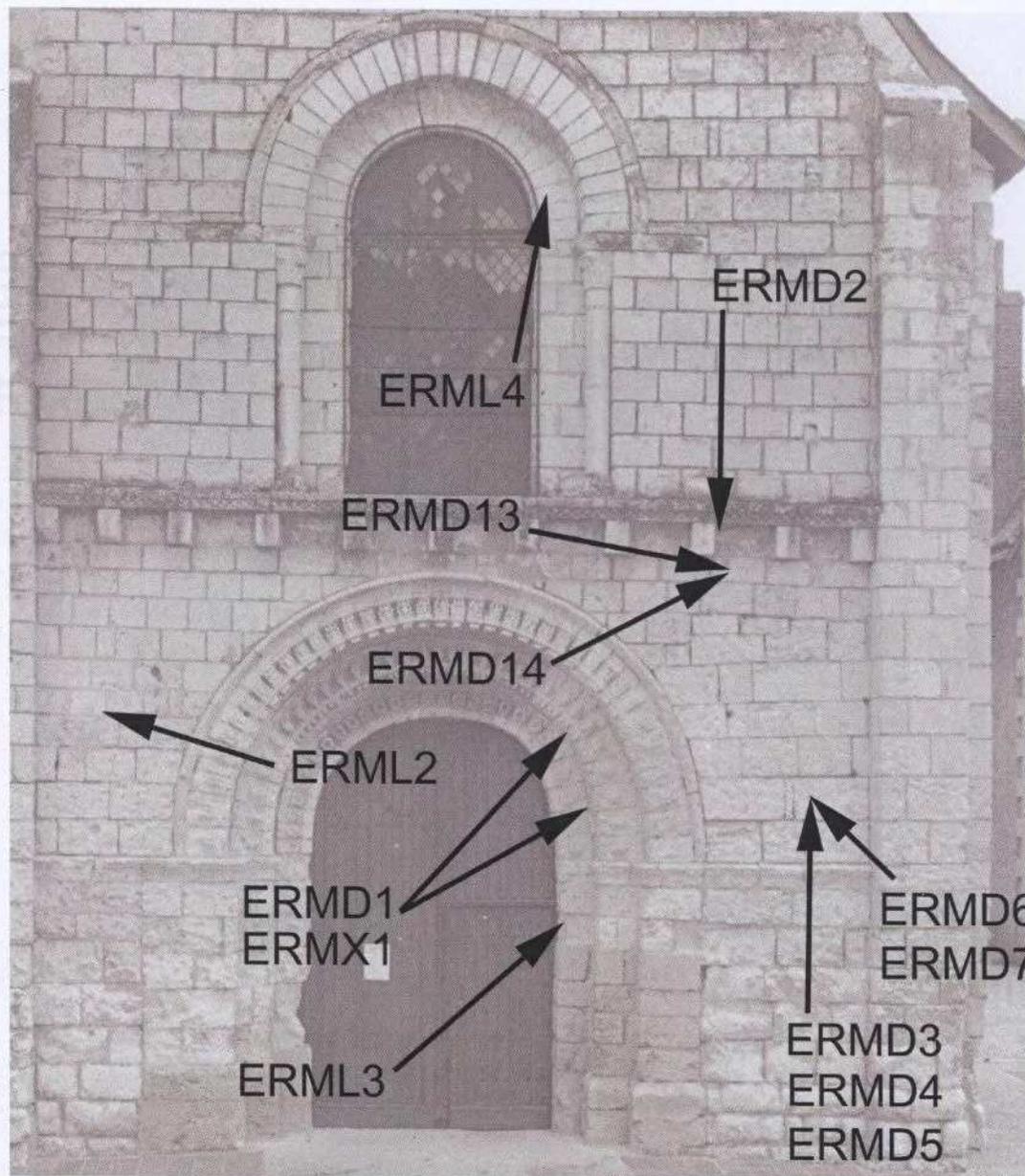
Identifiant	Localisation, mode de prélèvement	Description, nature supposée, remarque	Analyses demandées.	Questions
ERMD1	Portail ouest, voussure côté droit, 2ème rouleau, 3ème à 6ème claveaux, sur l'intrados, prélevé par brossage de la surface.	Tuffeau pulvérulent	Dosage sulfates nitrates chlorures sodium et potassium solubles	Ions majoritaires? Mise en relation avec ERMX1
ERMD2	Façade ouest, 1ère assise sous la grande corniche, entre 9ème et 10ème modillon, près du 9ème, prélevé au scalpel 0 à 5 mm de profondeur.	Tuffeau boursoufflé et désagrégé	Dosage sulfates nitrates chlorures sodium et potassium solubles	Ions majoritaires?
ERMD3	Façade ouest, au-dessus de la petite corniche, prélevé au scalpel, 0 à 1 mm de profondeur, avant test de dessalement	Tuffeau pulvérulent	Dosage sulfates nitrates chlorures sodium et potassium solubles	Ions majoritaires?
ERMD4	Comme ERMD3, sauf f prélevé par perçage, profondeur 5 à 10 mm	Tuffeau	Dosage sulfates nitrates chlorures sodium et potassium solubles	pour comparaison avec ERMD3
ERMD5	Comme ERMD3, sauf f prélevé par perçage, profondeur 90 à 110 mm	Tuffeau	Dosage sulfates nitrates chlorures sodium et potassium solubles	pour comparaison avec ERMD3
ERMD6	Comme ERMD3, après test de dessalement	Tuffeau pulvérulent	Dosage sulfates nitrates chlorures sodium et potassium solubles	pour comparaison avec ERMD3
ERMD7	Comme ERMD4, après test de dessalement	Tuffeau	Dosage sulfates nitrates chlorures sodium et potassium solubles	pour comparaison avec ERMD4
ERMD8	Portail nord, avant dernière assise du massif sous le talus, à gauche du portail, 2ème bloc, côté droit, 0 à 5 mm de profondeur, au fond du chancre feuilleté, prélevé au scalpel.	Tuffeau feuilleté et désagrégé.	Dosage sulfates nitrates chlorures sodium et potassium solubles	Ions majoritaires? Mise en relation avec ERMX2
ERMD9	Même bloc que ERMD8, mais côté gauche sous tuffeau pulvérulent, prélevé par perçage, 90 à 100 mm de profondeur	Tuffeau	Dosage sulfates nitrates chlorures sodium et potassium solubles	Ions majoritaires?
ERMD10	Portail nord, voussure, 1er rouleau, clé, 2 claveaux à gauche et 1 à droite, prélevé par brossage de la surface.	Tuffeau pulvérulent	Dosage sulfates nitrates chlorures sodium et potassium solubles	Ions majoritaires? Mise en relation avec ERMX3
ERMD11	Façade nord, à droite du portail, 2ème assise entière au-dessus du sol, 1er bloc, prélevé au scalpel, 0 à 1 mm	Tuffeau boursoufflé induré superficiel et pulvérulence sous-jacente	Dosage sulfates nitrates chlorures sodium et potassium solubles	Ions majoritaires?
ERMD12	Comme ERMD11 sauf prélevé par perçage, 90 à 110 mm	Tuffeau	Dosage sulfates nitrates chlorures sodium et potassium solubles	Ions majoritaires?
ERMD13	Façade ouest, 2ème assise sous la grande corniche, entre 9ème et 10ème modillon, prélevé au scalpel, 0 à 1 mm.	Tuffeau pulvérulent	Dosage sulfates nitrates chlorures sodium et potassium solubles	Ions majoritaires?
ERMD14	Comme ERMD13, après test de dessalement.	Tuffeau pulvérulent	Dosage sulfates nitrates chlorures sodium et potassium solubles	pour comparaison avec ERMD13
ERMX1	comme ERMD1	comme ERMD1	Diffraction de rayons X	Sels solubles cristallisés?
ERMX2	comme ERMD8	comme ERMD8	Diffraction de rayons X	Sels solubles cristallisés?
ERMX3	comme ERMD10	comme ERMD10	Diffraction de rayons X	Sels solubles cristallisés?
ERML1	Façade nord, au-dessus du portail, sur les petits blocs au-dessus de l'extrémité est du 3ème bloc de la troisième assise du talus au-dessus du portail, prélevé au scalpel.	Restes de badigeon épais ancien(s), très fragile, face extérieure plus ou moins salie grisâtre, relativement régulière, face inférieure beige (terre?)	Analyses selon propositions ERM pour tenter de répondre aux questions suivantes: le sulfate identifié par le test au baryum est-il surtout localisé sur la face inférieure ou est-il réparti aussi dans l'épaisseur de la couche blanche? Dans ce dernier cas, peut-il s'agir de gypse ou de plâtre composant d'origine? Autres composants identifiés?	
ERML2	Façade ouest, 5ème assise au-dessus de la petite corniche, bas du 2ème bloc.	Enduit ancien, imitation de tuffeau, bonne cohésion, longtemps protégé par une "plaque d'assurance".	Lame mince, observation microscopie optique avec 2 photos, observation et analyses MEB, diffraction de rayons X.	Caractérisation de ce mortier, différent du précédent, également peu ou pas de plâtre
ERML3	Intérieur, porte ouest, ébrasement sud, 7ème assise.	Enduit ancien, supposé 1878-80, imitation de tuffeau.	Lame mince, observation microscopie optique avec 2 photos, observation et analyses MEB, diffraction de rayons X.	Caractérisation de ce mortier, typique des imitations de pierre XIXème à XXème à base de plâtre.
ERML4	Façade ouest, baie au dessus du portail, voûte côté droit, 3ème claveau	Reste de rejointoiement et ragréage ancien, quelques grains du joint de sable et chaux adhérent dessous	Lame mince, observation microscopie optique avec 2 photos, observation et analyses MEB, diffraction de rayons X.	Caractérisation de ce mortier, simple plâtre? Charge? Restes de charbon de bois?



## Annexe II

Localisation des prélèvements effectués

*Faint, illegible text at the bottom of the page, possibly bleed-through or a footer.*



37, Ile Bouchard, église Saint-Gilles, portail ouest

31/5/2006, prélèvements pour analyses ERM

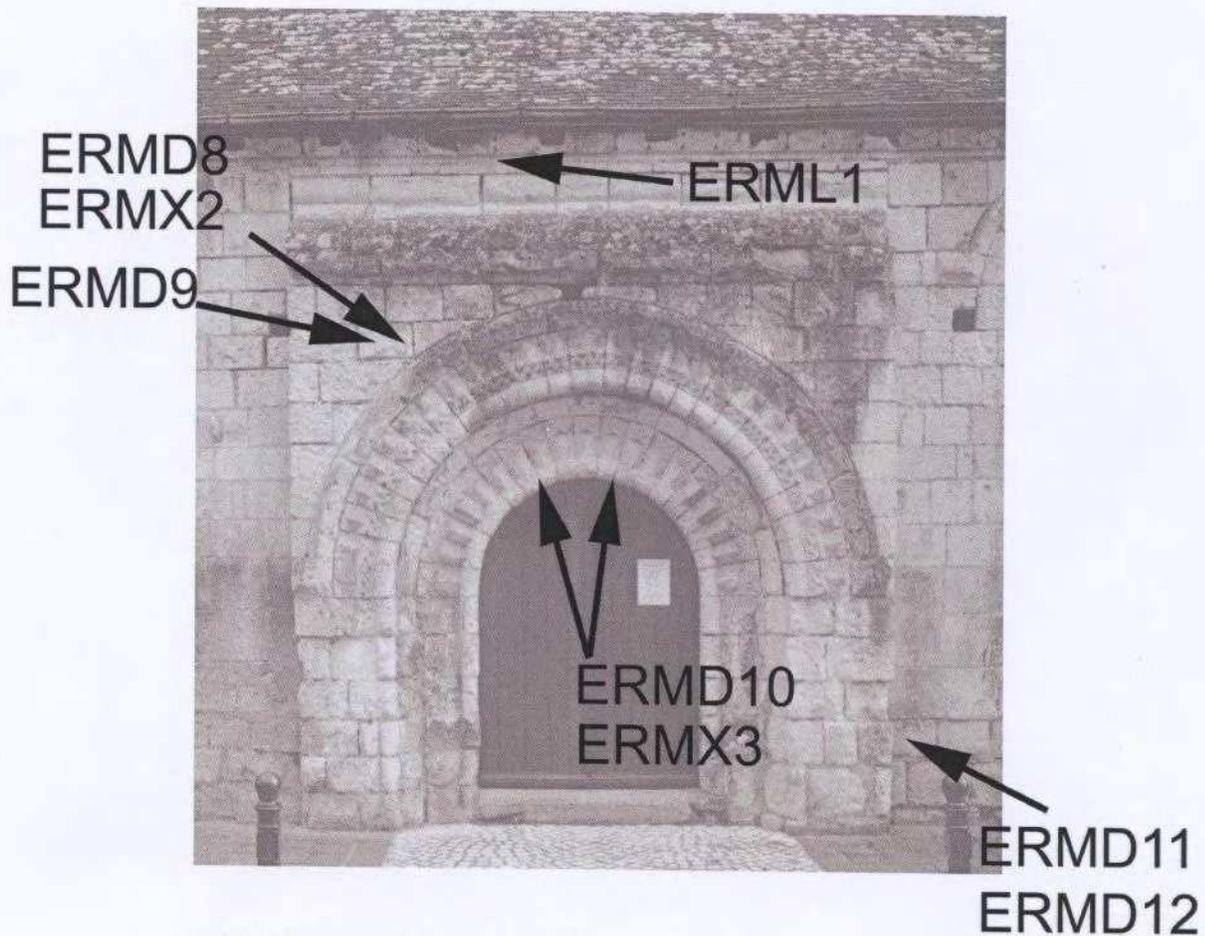
ORolland à ERM sur fond A. de Saint-Jouan ACMH, photo Jean-Baptiste Darrasse



# ERM

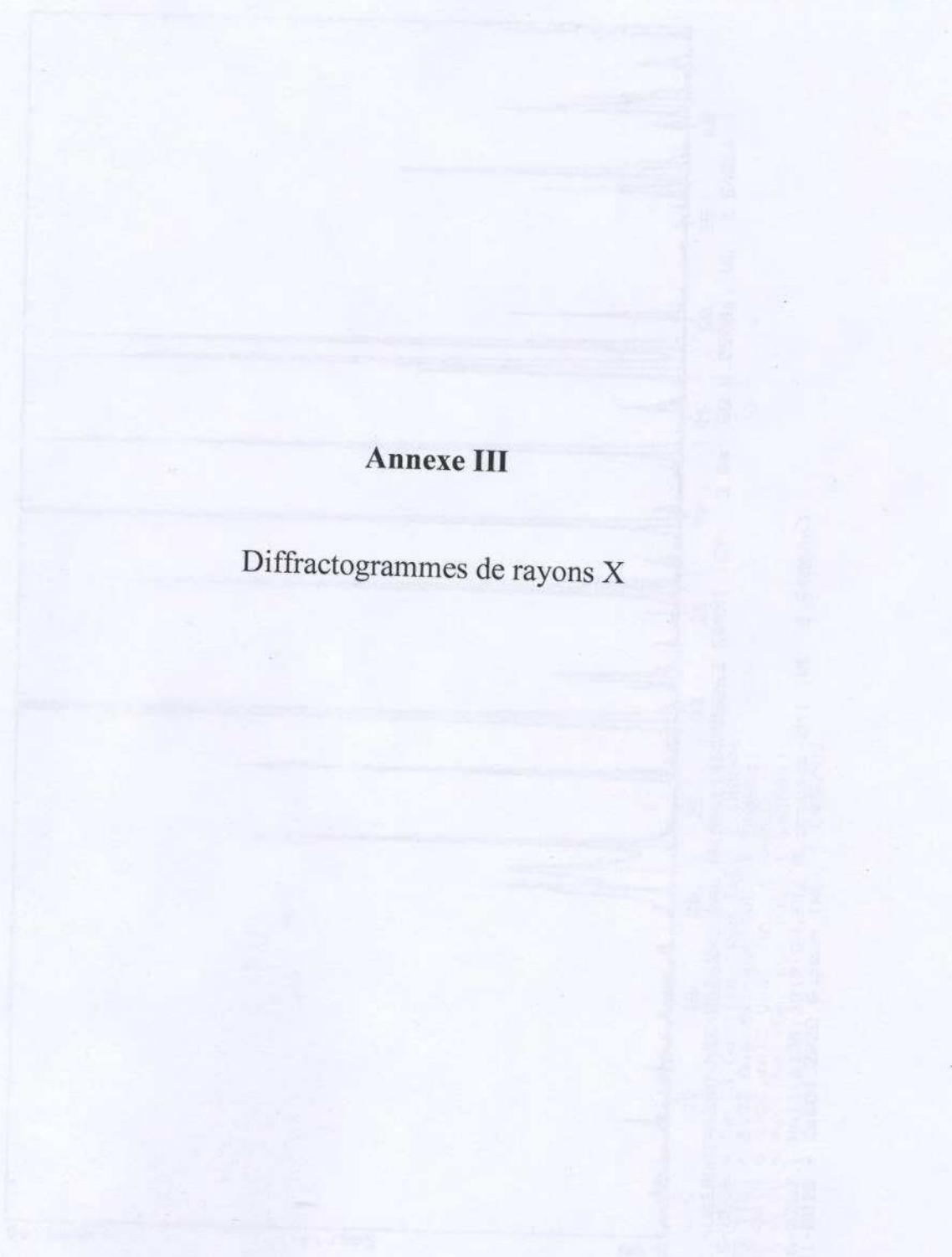
ETUDES RECHERCHES MATERIAUX

ERM 06 104 SR 179 28/35



37, L'Île Bouchard, église Saint-Gilles, portail nord  
31/5/2006, prélèvements pour analyses ERM

O. Rolland à ERM sur fond A.de Saint-Jouan ACMH, photo Jean-Baptiste Darrasse



### Annexe III

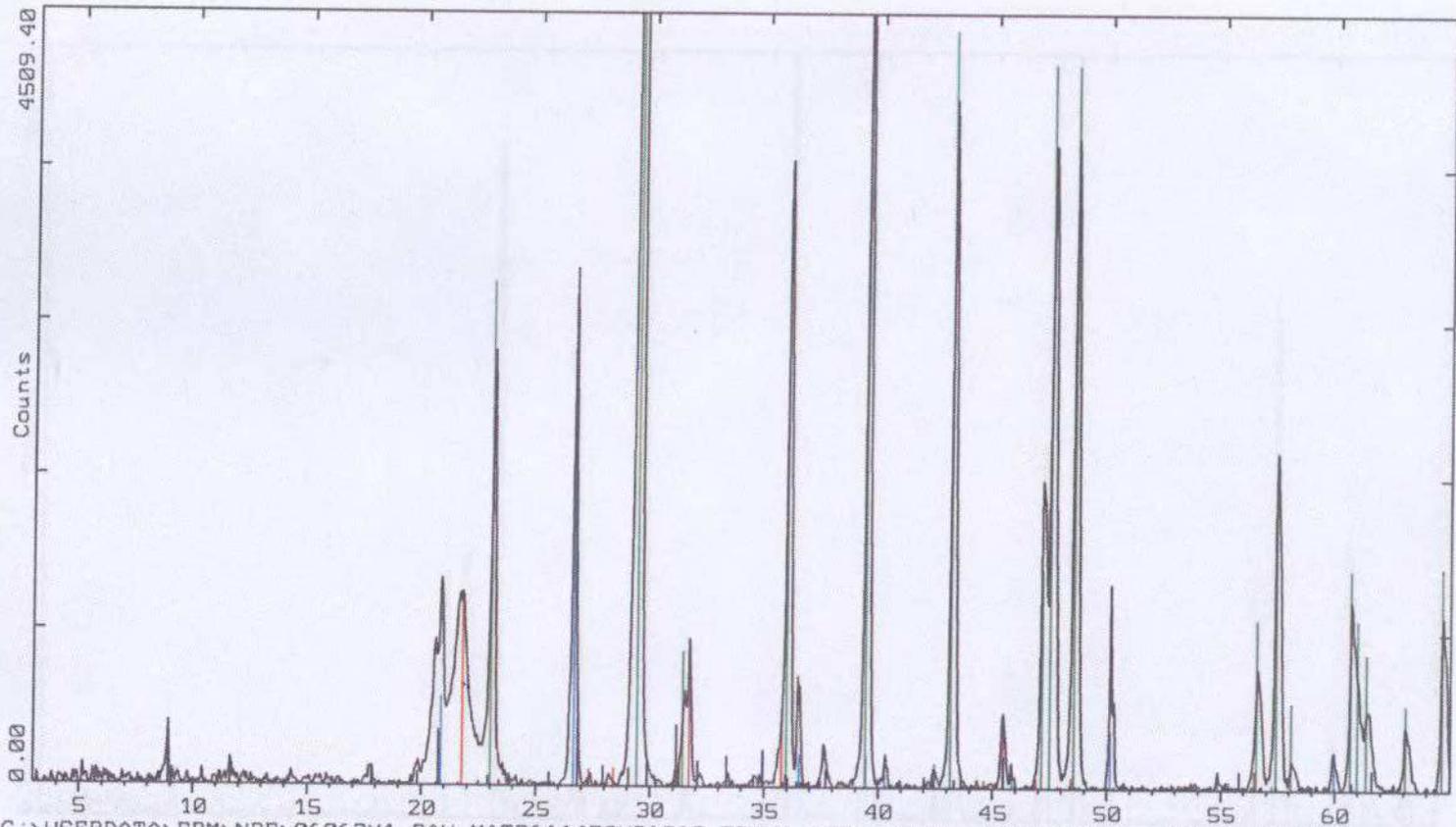
### Diffractogrammes de rayons X



# ERM

ETUDES RECHERCHES MATERIAUX

ERM 06 104 SR 179 30/35



C:\USERDATA\ERM\NBE\06062X1.RAW MAT06114ECH06062 ERMX1 (CT: 3.0s, SS:0.050dg, WL: 1.5406Ao)  
5-0586 \* CaCO3 Calcite, syn (WL: 1.5406Ao)  
33-1161 \* SiO2 Quartz, syn (WL: 1.5406Ao)  
38-0448 O SiO2.xH2O Opal (WL: 1.5406Ao)  
5-0628 \* NaCl Halite, syn (WL: 1.5406Ao)  
6-0263 I KAl2(Si3Al)O10(OH,F)2 Muscovite-2M1 (WL: 1.5406Ao)  
21-0816 \* CaSO4.2H2O Gypsum (WL: 1.5406Ao)

Date : 16/06/06  
Opérateur : N. BETIN

Préparation de poudre désorientée  
(Radiation Cu K $\alpha$ ; 1,5406 Å)

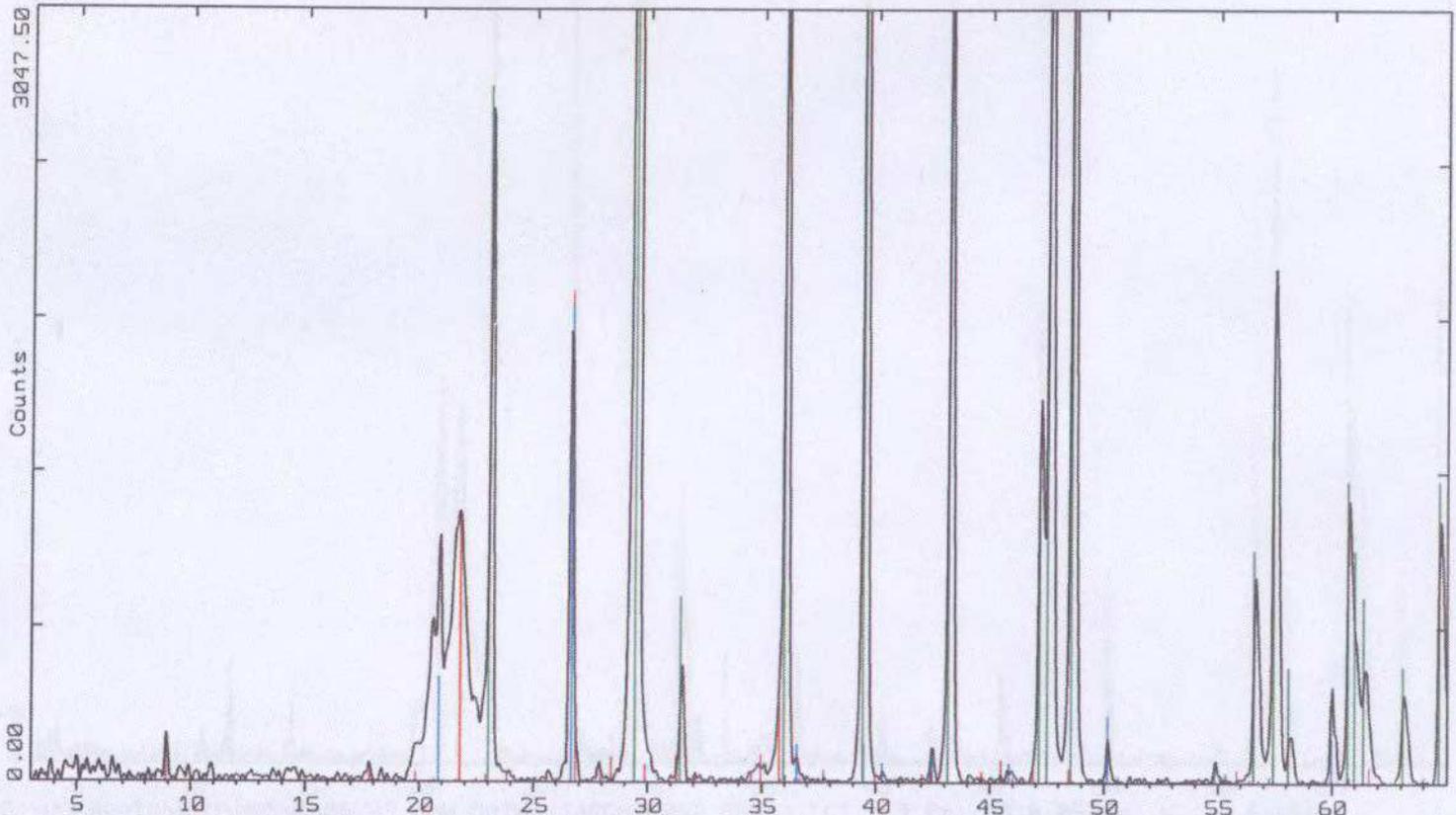
N° d'identification : ERMX1



**ERM**

ETUDES RECHERCHES MATERIAUX

ERM 06 104 SR 179 31/35

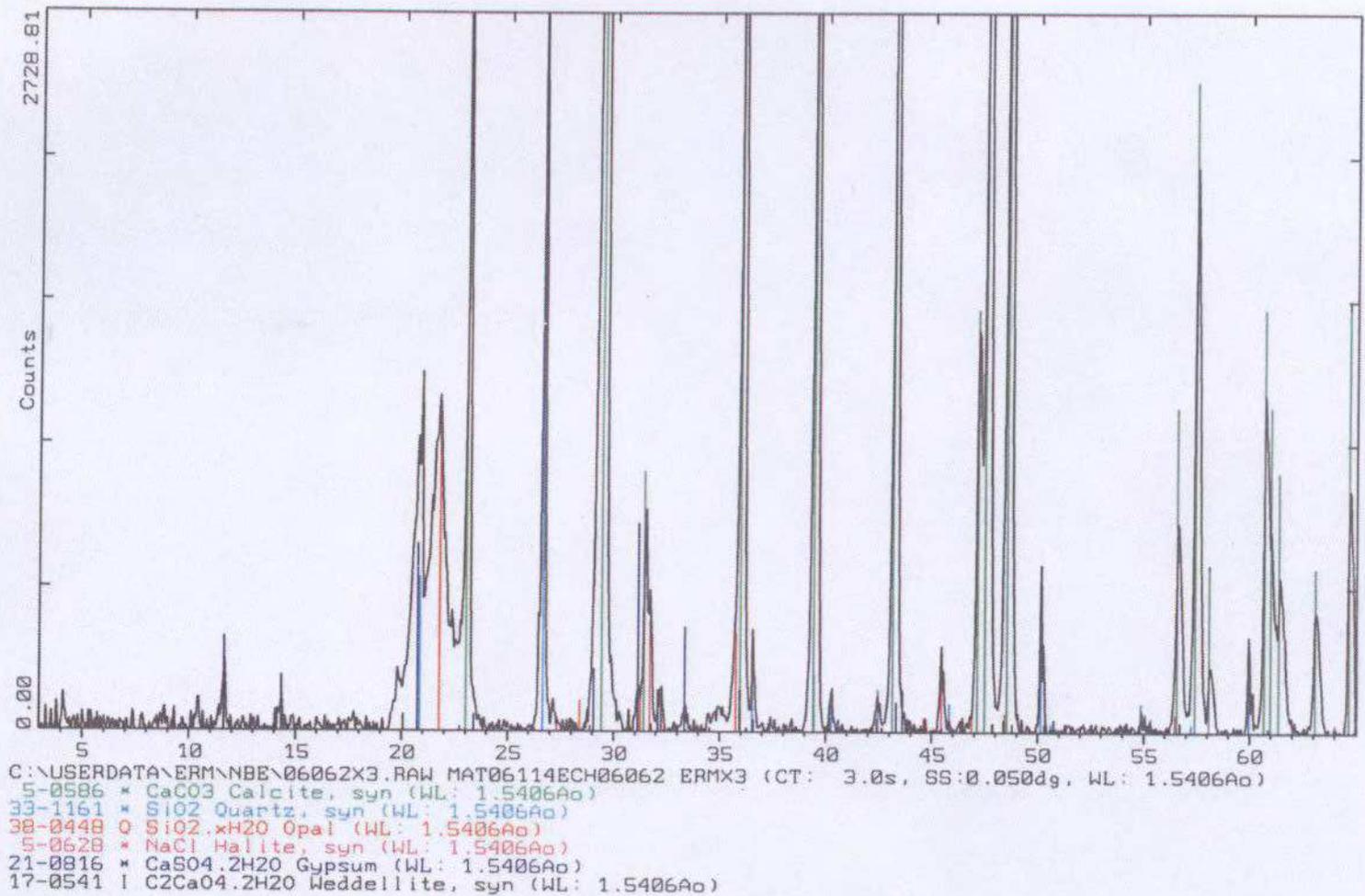


C:\USERDATA\ERM\NBE\06062X2.RAW MAT06114ECH06062 ERMX2 (CT: 3.0s, SS:0.050dg, WL: 1.5406Ao)  
35-0586 \* CaCO3 Calcite, syn (WL: 1.5406Ao)  
35-1161 \* SiO2 Quartz, syn (WL: 1.5406Ao)  
39-0448 0 SiO2.xH2O Opal (WL: 1.5406Ao)  
5-0263 1 KAl2(Si3Al)O10(OH,F)2 Muscovite-2M1 (WL: 1.5406Ao)

Date : 16/06/06  
Opérateur : N. BETIN

Préparation de poudre désorientée  
(Radiation Cu K $\alpha$  ; 1,5406 Å)

N° d'identification : ERMX2



Date : 16/06/06  
Opérateur : N. BETIN

Préparation de poudre désorientée  
(Radiation Cu K $\alpha$  ; 1,5406 Å)

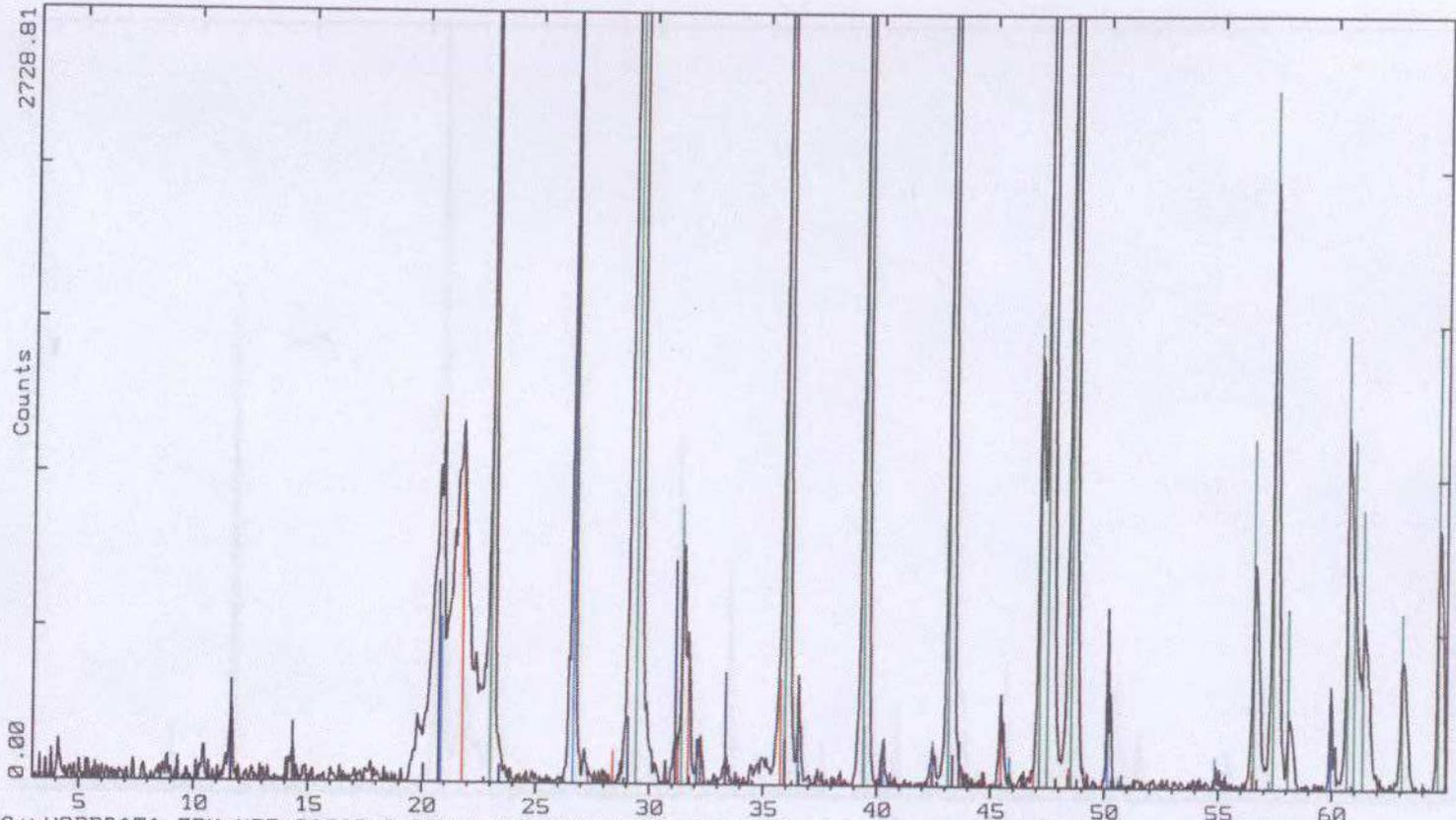
N° d'identification : ERMX3



**ERM**

ETUDES RECHERCHES MATERIAUX

ERM 06 104 SR 179 33/35

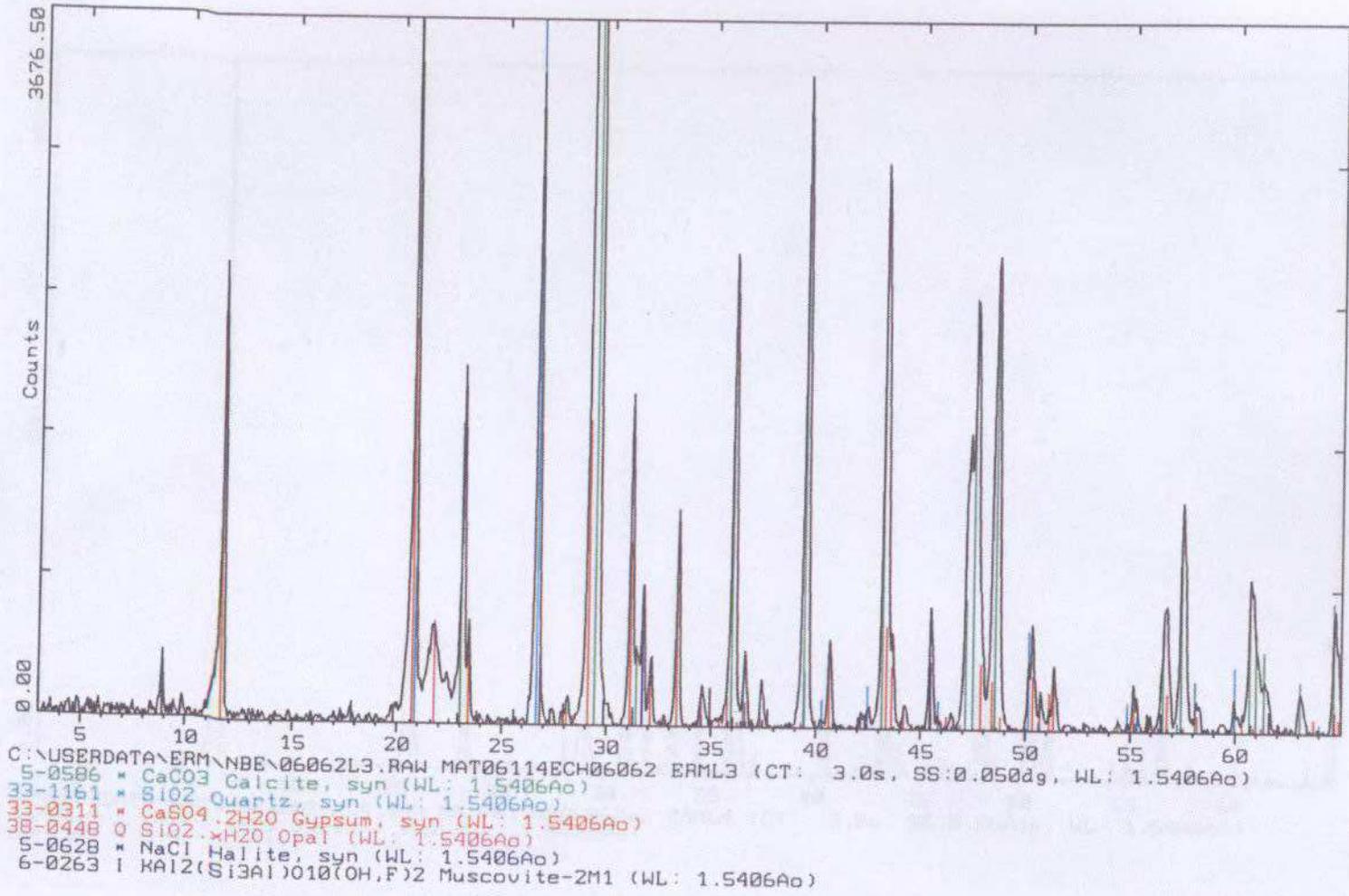


C:\USERDATA\ERM\NBE\06062X3.RAW MAT06114ECH06062 ERMX3 (CT: 3.0s, SS:0.050dg, WL: 1.5406Ao)  
5-0586 \* CaCO3 Calcite, syn (WL: 1.5406Ao)  
33-1161 \* SiO2 Quartz, syn (WL: 1.5406Ao)  
38-0448 O SiO2.xH2O Opal (WL: 1.5406Ao)  
5-0628 \* NaCl Halite, syn (WL: 1.5406Ao)  
21-0816 \* CaSO4.2H2O Gypsum (WL: 1.5406Ao)  
17-0541 I C2CaO4.2H2O Weddellite, syn (WL: 1.5406Ao)

Date : 16/06/06  
Opérateur : N. BETTIN

Préparation de poudre désorientée  
(Radiation Cu K $\alpha$  : 1,5406 Å)

N° d'identification : ERM112



Date : 16/06/06  
Opérateur : N. BETIN

Préparation de poudre désorientée  
(Radiation Cu K $\alpha$ ; 1,5406 Å)

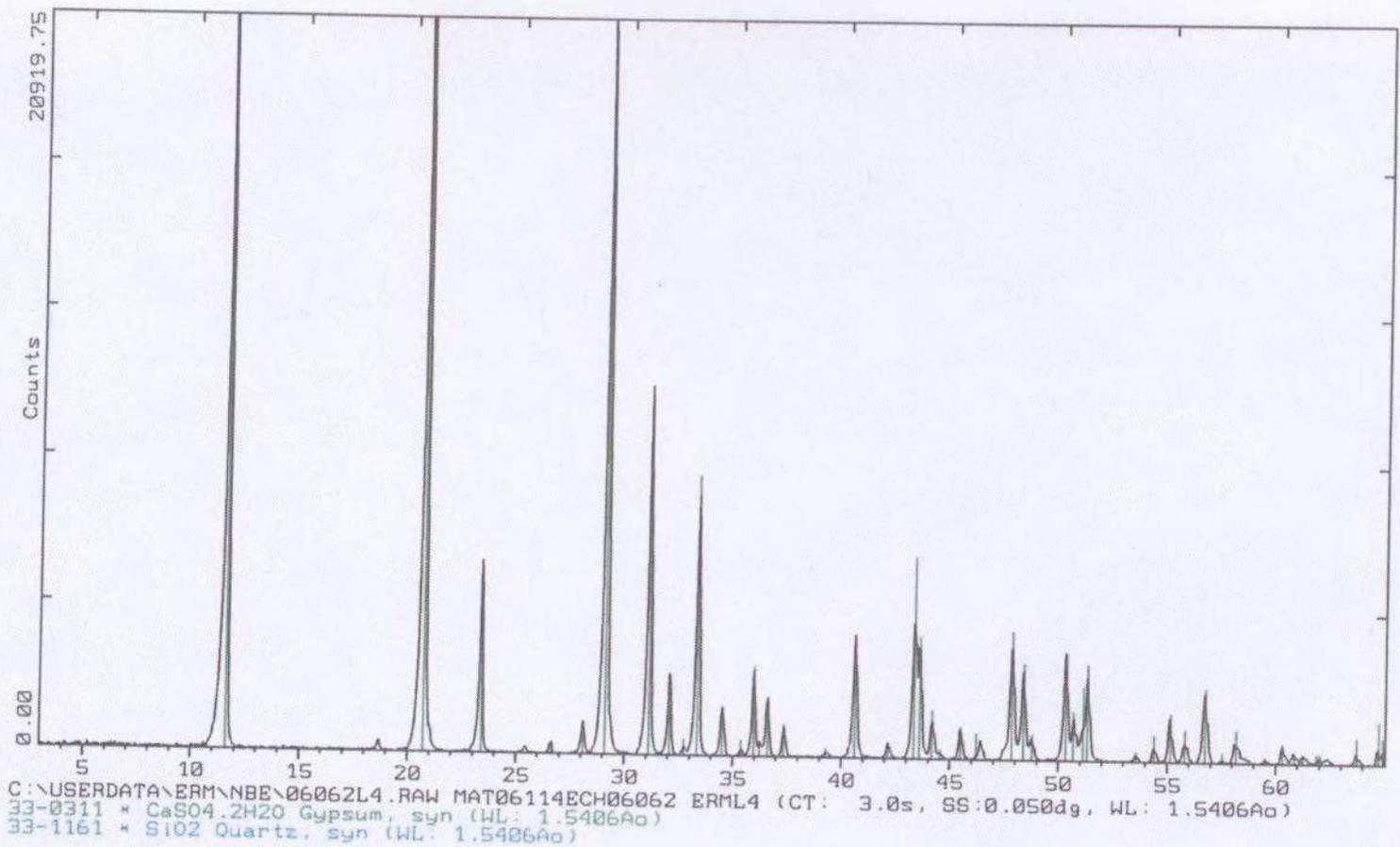
N° d'identification : ERML3



ERM

ETUDES RECHERCHES MATERIAUX

ERM 06 104 SR 179 35/35



Date : 16/06/06  
Opérateur : N. BETIN

Préparation de poudre désorientée  
(Radiation Cu K $\alpha$  ; 1,5406 Å)

N° d'identification : ERM L4