

Diagnostic Général de l'État de stabilité de l'Église troglodyte d'Aubeterre sur Dronne – Département de la Charente (16)

BRGM/RP-51796-FR
Juillet 2002

Etude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2003

**O. RENAULT, D. DESSANDIER, E. FOERSTER,
V. MARCELIN, C. MATHON, M. VINCENT**

Mots clés : Charente, Aubeterre sur Dronne, église monolithe, stabilité mécanique, altération, modélisation 3D.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

DESSANDIER D. ; FOERSTER E. ; MARCELIN V. ; MATHON C. ; RENAULT O. ; VINCENT M. (2002) – Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte d'Aubeterre sur Dronne (16) - Rapport BRGM RP-51796-FR.

Synthèse

L'église souterraine, dite « monolithe », Saint-Jean d'Aubeterre, située à Aubeterre-sur-Dronne (sud Charente) est connue comme le plus vaste édifice religieux troglodyte d'Europe.

Son édification remonterait à l'époque paléochrétienne pour les parties les plus anciennes, et pour l'essentiel au XII^{ème} siècle. Elle accueille aujourd'hui environ 40 000 visiteurs par an.

Malgré les multiples travaux effectués depuis 1966, ce monument souterrain édifié dans les calcaires crayeux du Campanien (Crétacé supérieur), présente actuellement de nombreux signes d'instabilité, de nature à remettre en cause la sécurité des visiteurs : fissures ouvertes en voûte et sur les parements, écailles de mortier projeté en cours de décollement, desquamation et effritement des parois.

Ces désordres ont conduit la Direction Régionale des Affaires Culturelles de la région Poitou-Charentes à confier au Service Géologique Régional Poitou-Charentes du BRGM une étude dont les principaux objectifs étaient les suivants :

- **étudier le comportement géomécanique** de l'édifice afin de délimiter les secteurs de l'ouvrage les plus sollicités et devant le cas échéant faire l'objet de travaux de confortements ;
- **analyser les processus d'altération pelliculaire de la roche**, déterminer s'ils se poursuivent ou non, en établir une typologie et proposer un programme d'actions ou d'études complémentaires.

La première phase du travail du BRGM a consisté à établir **un état de la connaissance** de l'église d'Aubeterre. Une chronologie des anciens travaux de consolidation ou d'aménagement ainsi qu'une analyse des d'anciennes études portant sur la stabilité de l'édifice ou sur son altération ont ainsi été établies. Ces éléments ont permis d'orienter les phases ultérieures de l'étude.

L'auscultation de l'église par le BRGM a eu lieu durant le mois de mars 2002 grâce au concours d'une **nacelle élévatrice**. Celle-ci a permis de dresser **un état des lieux précis des discontinuités mécaniques, des processus d'altération et du contexte hydrogéologique** de l'église.

Chaque observation a fait l'objet d'un reportage photographique ou d'une cartographie permettant d'évaluer l'état de dégradation de l'édifice. Dix sept carottages ont été réalisés à l'intérieur de l'église pour analyse en laboratoire des paramètres suivants : résistance en compression et en flexion, densité, perméabilité à l'air et à l'eau, porosité... Par ailleurs, treize prélèvements sur des échantillons de croûte d'altération ont été analysés au diffractomètre à rayons X.

Suite aux observations de terrain et aux résultats des essais de mécanique des sols, une **modélisation aux éléments finis en trois dimensions** de la stabilité mécanique de l'église a été réalisée sur le logiciel GefDyn développé par l'Ecole Centrale de Paris.

D'un point de vue mécanique, les simulations numériques et les observations de terrain indiquent que les secteurs de l'église les plus sollicités, en terme de contraintes, sont le **transept nord, la partie externe de la voûte de la nef, la façade extérieure, le couloir sud et la séparation nef/salle des sarcophages**. Bien qu'apparemment modérément sollicités, les têtes des piliers de la nef subissent également des déplacements.

En terme d'altération, trois grands types de phénomènes ont été dénombrés : les **dissolutions**, les **altérations liées à des concentrations de sel** et les **altérations biologiques**. Face à ces facteurs dégradants, la pierre d'Aubeterre est apparue de qualité hétérogène et les échantillons prélevés permettent de distinguer deux faciès de durabilité distincte.

La lutte contre les phénomènes d'altération passe par un **confinement du site** et par une **maîtrise des écoulements d'eau permanents dans l'église**. Il est ainsi recommandé de procéder à une reconnaissance puis à un captage rigoureux de la citerne de l'église dont le régime d'alimentation reste obscur. Cette disposition précèdera l'éventuelle mise en œuvre de méthodes de drainage plus lourdes et nécessitant des *études complémentaires*.

Les orientations en terme de confortement sont évoquées sous forme de priorité en fonction du degré d'urgence à réaliser les travaux.

Les travaux de priorité 1 concerneront le **transept nord** dont le boulonnage et le remblaiement partiel est proposé, **les travaux de purge des parois** aux scules fins d'assurer la **sécurité** des visiteurs et les **travaux d'assainissement** (en particulier, le captage de la citerne enterrée). Il est également proposé de mettre en place un système d'auscultation dans la nef qui permettrait d'évaluer les déplacements dans la nef et de mieux programmer les travaux de priorité 2.

Les travaux de priorité 2 concerneront **la voûte de la nef** dont le confortement passe par **la mise en place de contreforts à l'extérieur de l'église** associé à un **boulonnage de la voûte**. Les **piliers de la nef** devront également être renforcés à l'aide de béton projeté afin de compenser les pertes de matières. Le **couloir Sud** et **la cave attenante au transept** devront aussi faire l'objet de renforcements (boulonnage, construction ou renforcement de parements et piliers) dans le cadre des travaux de deuxième priorité.

Enfin, les travaux de priorité 3 concerneront **la voûte de la salle des sarcophages** qu'il est envisagé de boulonner ainsi que le mur qui sépare cette salle de la nef.

Sommaire

Synthèse	3
Liste des figures	8
Liste des photos	9
Liste des tableaux	11
Liste des annexes	11
Introduction	12
1 Travaux réalisés	13
1.1 Analyse bibliographique	13
1.2 Campagne de terrain.....	13
1.3 Relevé topographique.....	14
1.4 Modélisation en trois dimensions	14
2 Synthèse des connaissances	16
2.1 Contexte historique	16
2.2 Contexte géologique.....	18
2.3 Bilan des études et travaux antérieurs.....	21
2.3.1 Travaux réalisés depuis 1920	21
2.3.1.1 <i>Travaux de consolidation structurelle</i>	21
2.3.1.2 <i>Travaux d'assainissement, d'accessibilité et d'esthétique</i>	22
2.3.2 Études réalisées.....	23
2.3.2.1 <i>Altération de la pierre</i>	23
2.3.2.2 <i>Stabilité mécanique</i>	24
3 Analyse de la fissuration	25
3.1 Méthodologie	25
3.2 Transept nord	26
3.2.1 Etat des parements.....	28
3.2.2 Etat de la voûte	29
3.2.3 Extérieur du transept.....	31
3.3 Nef.....	32

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte
d'Aubeterre sur Dronne (16)

3.3.1	Fissuration de la voûte	32
3.3.2	Paroi ouest de la nef.....	34
3.3.3	Etat de l'abside	34
3.3.4	Etat des piliers de la nef.....	36
3.4	Galerie Sud.....	37
3.4.1	Etat des parements	37
3.4.2	Etat de la voûte	38
3.4.3	Extérieur de la galerie.....	38
3.5	Cave.....	39
3.6	Salle des sarcophages	39
3.7	Triforium.....	42
3.8	Boyau	42
3.9	Crypte.....	43
4	Analyse hydrogéologique.....	44
4.1.1	Observations à l'intérieur de l'église.....	44
4.1.2	Observations à l'extérieur de l'église	46
4.1.3	Hypothèses.....	48
5	Analyse de l'altération	49
5.1	Analyse des états de surface.....	49
5.1.1	Description des altérations.....	49
5.1.2	Analyse des échantillons de "croûtes"	70
5.1.3	Synthèse des résultats : typologie des altérations	71
5.1.3.1	Les dissolutions.....	71
5.1.3.2	Les altérations liées à des concentrations de sels.....	71
5.1.3.3	Les altérations biologiques.....	72
5.2	Caractérisation des pierres	72
5.2.1	Echantillonnage	72
5.2.2	Procédure analytique appliquée.....	73
5.2.2.1	Etude pétrographique	74
5.2.2.2	Caractérisation du milieu poreux	74
5.2.2.3	Propriétés de stockage des fluides.....	76
5.2.2.4	Mesure de la perméabilité à l'eau	77
5.2.2.5	Résistance mécanique	77
5.2.3	Synthèse des résultats	78
5.3	Diagnostic	82
6	Modélisation du comportement mécanique.....	84

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte
d'Aubeterre sur Dronne (16)

6.1	Introduction	84
6.2	Modèle bidimensionnel.....	84
6.2.1	Hypothèses générales des calculs	84
6.2.2	Caractéristiques du modèle.....	85
6.2.2.1	Géométrie.....	85
6.2.2.2	Caractéristiques des matériaux.....	86
6.2.2.3	Conditions aux limites et initiales.....	88
6.2.2.4	Caractéristiques du maillage éléments finis.....	88
6.2.3	Simulations réalisées	89
6.2.3.1	Scénario de l'excavation	89
6.2.3.2	Résultats des simulations 2D	90
6.3	Modèle tridimensionnel	92
6.3.1	Hypothèses générales des calculs	92
6.3.2	Caractéristiques du modèle.....	92
6.3.2.1	Géométrie, conditions aux limites et initiales.....	92
6.3.2.2	Caractéristiques des matériaux.....	94
6.3.2.3	Conditions aux limites et initiales.....	95
6.3.2.4	Caractéristiques du maillage éléments finis.....	96
6.3.3	Résultats de la simulation.....	97
6.4	Conclusions.....	99
7	Orientations en matière de confortement	100
7.1	Travaux de PRIORITE 1	100
7.1.1	Confortement du transept Nord	100
7.1.1.1	Solution 1	101
7.1.1.2	Solution 2	102
7.1.2	Travaux de purge.....	103
7.1.3	Mise en place d'un système d'auscultation dans la nef.....	103
7.1.4	Travaux d'assainissement.....	104
7.2	Travaux de PRIORITE 2.....	105
7.2.1	Confortement de la nef	105
7.2.2	Confortement de la galerie Sud :	106
7.2.3	Confortement de la cave :	107
7.3	Travaux de PRIORITE 3 (salle des sarcophages).....	107
	Conclusion	108

Liste des figures

Fig. 1 – Localisation de l'église d'Aubeterre sur Dronne – extrait du fond IGN au 1/25 000	15
Fig. 2 – Vue en plan des différentes parties de l'église	17
Fig. 3 - Coupe géologique du village d'Aubeterre par MM. Neuman, Platel et al.....	18
Fig. 4 – Coupe géologique simplifiée de la paroi Ouest de l'église d'Aubeterre.....	20
Fig. 5 – Hypothèse de schéma conceptuel des contraintes mécaniques régnant dans le transept nord	26
Fig. 6 - Relevé des désordres observés dans l'église d'Aubeterre (Nef, transept, couloir sud et salle des sarcophages)	27
Fig. 7 – Hypothèse de schéma conceptuel du comportement mécanique de la Nef.....	32
Fig. 8 - Relevé des désordres observés dans l'église d'Aubeterre (triforium et crypte).	41
Fig. 9 – Coupe hydrogéologique transversale schématique de l'église.....	45
Fig. 10 – Contexte environnemental de l'église d'Aubeterre.....	47
Fig. 11 – Géométrie de la section 2D	85
Fig. 12 – Groupes de matériaux pour le modèle 2D.....	86
Fig. 13 – Conditions aux limites et initiales 2D.....	88
Fig. 14 – Maillage éléments finis 2D	89
Fig. 15 – Scénario de l'excavation	90
Fig. 16 – Secteurs de renforcement envisagés pour le modèle 2D.....	91
Fig. 17 – Géométrie de la section 3D : coupe transversale de la nef et du transept nord (coupe IJ + colonne nord).....	93
Fig. 18 – Géométrie de la section 3D : coupe transversale de la salle des sarcophages.	93
Fig. 19 – Géométrie de la section 3D : coupe longitudinale (salle des sarcophages et piliers).....	94
Fig. 20 – Groupes de matériaux pour le modèle 3D : vue en perspective.....	94
Fig. 21 – Groupes de matériaux pour le modèle 3D : vue intérieure (coupe longitudinale).....	95
Fig. 22 - Maillage éléments finis 3D : vue en perspective	96
Fig. 23 - Maillage éléments finis 3D : vue intérieure (coupe longitudinale).....	96
Fig. 24 – Confortement du transept (solution 1)	101
Fig. 25 – Confortement du transept (solution 2)	103
Fig. 26 - Principe de confortement de la nef par l'intermédiaire de contreforts.	105

Liste des photos

Photo 1 – Nacelle élévatrice dans la nef	25
Photos 2 et 3 – Effets des mécanismes de compression sur le parement sud du transept nord.....	28
Photo 4 – Vue générale du transept nord	30
Photo 5 – Aperçu de la fracturation au niveau du clocher	30
Photo 6 – Vue extérieure du transept.....	31
Photo 7 – Voûte de la nef – Fissure n° 25''''	33
Photo 8 – Voûte de la nef - rejet vertical sur la fissure n°25''''	33
Photo 9 – Abside – phénomène de sous-cavage	35
Photo 10 – Abside, triforium et pilier saillant Nord	35
Photo 11 – Pilier Sud – phénomène d'écaillage à la naissance de la voûte	37
Photo 12 – Pilier Nord – réduction de section du à l'écaillage.....	37
Photo 13 – Galerie sud – Aperçu de la fissuration sur la partie extérieure de la voûte .	38
Photos 15 à 17 - Eglise médiévale - Façade sud - Croûte biologique noirâtre recouvrant la façade - Développement d'algues plus marqué à proximité des sources lumineuses (lampe au sol et fenêtre de la façade est).....	50
Photos 18 et 19 - Eglise médiévale - Façade sud (angle ouest) - Croûte biologique noirâtre recouvrant le pilier et la base de la façade - Enduit projeté en décollement - Importante altération en plaques et feuilletts verticaux sous la fenêtre communiquant avec l'église primitive.	51
Photos 20 à 21 - Eglise médiévale - Façade sud (angle ouest) - Croûte biologique noirâtre recouvrant le pilier et la base de la façade - Enduit projeté en décollement - Importante altération en plaques et feuilletts verticaux sous la fenêtre communiquant avec l'église primitive.	52
Photos 22 à 25 - Eglise médiévale - Façade ouest - Plaques en décollement en partie basale - Colonisation biologique très importante en partie intermédiaire (recul maximum de la paroi = 1 m).	53
Photos 26 à 28 - Eglise médiévale - Angle Nord Ouest - Plaques en décollement en partie basale Colonisation biologique très importante en partie intermédiaire (recul maximum de la paroi = 1 m) correspondant à un niveau actuel de résurgence d'eau (source ?).	54
Photos 29 & 30 – Eglise médiévale - Abside - Recouvrement biologique verdâtre (algues) actif côté ouest et "fossile" côté est - Alternance de niveaux en creux (à recouvrement biologique) et en "relief" (à altération en plaques et feuilletts).	55
Photo 31 - Eglise médiévale - Abside - Recouvrement biologique verdâtre (algues) "fossile" côté est - Niveau en "relief" (à altération en plaques et feuilletts).	56
Photos 32 à 34 – Eglise médiévale - Piliers "centraux"- Partie basale et intermédiaire à surface bien conservée - Partie sommitale à altération en feuilletts et désagrégation sableuse - Présence d'une croûte résiduelle beige en cours d'écaillage.	57
Photos 35 & 36 - Eglise médiévale - Piliers "centraux"- Partie intermédiaire à surface bien conservée - Zone de remontée capillaire avec altération en plaque "fossile".	58

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte
d'Aubeterre sur Dronne (16)

Photo 37 - Eglise médiévale - Façade est maçonnée : moellons à altération par désagrégation sableuse et alvéolisation - Présence de résidus de croûte brunâtre en cours d'écaillage, à recouvrement biologique (algues)	59
Photos 38 & 39 - Eglise médiévale - Façade Est maçonnée : moellons à altération par désagrégation sableuse et alvéolisation - Présence de résidus de croûte brunâtre en cours d'écaillage, à recouvrement biologique (algues)	60
Photos 40 à 42 - Eglise médiévale - Façade Est - Galerie d'accès sud - Voûte à croûte noire en décollement - Désagrégation sableuse dans les zones "décollées" - Alvéolisation des moellons et de la paroi naturelle.	61
Photo 43 - Eglise médiévale - Façade Est - Transept nord - Voûte à croûte beige en décollement - Désagrégation sableuse dans les zones "décollées" - Recouvrement d'algues dans les zones plus humides (paroi et voûte côté nord).....	62
Photo 44 - Eglise médiévale - Façade Est - Transept nord - Voûte à croûte beige en décollement - Désagrégation sableuse dans les zones "décollées" - Recouvrement d'algues dans les zones plus humides (paroi et voûte côté nord).....	63
Photos 45 et 46 - Eglise médiévale - Voûte - Croûte beige résiduelle en cours d'écaillage et désagrégation sableuse dans les zones "décollées" - Recouvrements biologiques locaux, en particulier face aux fenêtres.....	64
Photos 47 et 48 - Eglise médiévale - Triforium - Croûtes grises "boursouflées" - Efflorescences blanchâtres "poudreuses".	65
Photos 49 et 50 - Eglise médiévale - Triforium - Draperies "fossiles" et actives - Croûtes grises "boursouflées" - Efflorescences blanchâtres "poudreuses".....	66
Photos 51 et 52 - Eglise médiévale - Escalier d'accès au triforium - Efflorescences et recouvrement biologique à proximité des projecteurs.....	67
Photos 53 & 54 - Eglise primitive - Efflorescences et recouvrement biologique à proximité des projecteurs - Stalagmite dans l'angle sud ouest.	68
Photos 55 à 57 - Eglise primitive - Croûte en décollement et désagrégation sableuse au niveau de la voûte - Recouvrement biologique actif dans la partie ouest - Stalactites dans l'angle sud ouest.	69
Photos 58 à 60 - Paroi extérieure de l'église - Alternance de bancs de lumachelles à Pycnodonte vesicularis et de bancs à calcaires bioclastiques plus tendres.....	79
Photos 61 & 62 - Observations d'échantillons de pierres au microscope optique polarisant - Calcaires bioclastiques wackestones à packestones - Nombreux Bioclastes et grains de glauconie dans un ciment de calcite micritique plus ou moins abondant.....	80

Liste des tableaux

Tab. 1 – Valeur des essais de mécanique des sols utilisées par Batigéoconseil (1992).	24
Tab. 2 - Analyse minéralogique d'échantillons de croûtes prélevés dans l'église.	70
Tab. 3 - Echantillonnage des pierres constitutives de l'église médiévale	73
Tab. 4 - Teneur en calcite des échantillons de pierres (classement suivant la cote).....	81
Tab. 5 - Caractéristiques physiques et mécaniques des échantillons de pierres.	81
Tab. 6 – Propriétés physiques et mécaniques utilisées pour le modèle 2D	87
Tab. 7 – Déplacements maximums obtenus avec le modèle bidimensionnel.....	91
Tab. 8 – Contraintes minimales et maximales obtenues avec le modèle bidimensionnel sans renforcement	91
Tab. 9 – Propriétés physiques et mécaniques utilisées pour le modèle 3D	95
Tab. 10 – Déplacements minimums et maximums obtenus avec le modèle tridimensionnel sans renforcement.....	98
Tab. 11 – Contraintes minimales et maximales obtenues avec le modèle tridimensionnel sans renforcement	98

Liste des annexes

Annexe 1 – Relevé des discontinuités mécaniques observées dans l'église d'Aubeterre.
Etat des lieux en mars 2002

Annexe 2 – Vue en coupe des discontinuités

Annexe 3 – Plan de localisation des prélèvements par carottage

Annexe 4 – Plan de localisation des échantillons de croûtes

Annexe 5 – Résultats des essais de résistance mécanique

Annexe 6 – Résultats des simulations 2D

Annexe 7 – Résultats des simulations 3D

Introduction

L'église souterraine, dite « monolithe », Saint-Jean d'Aubeterre, située à Aubeterre-sur-Dronne (sud Charente), a été creusée directement dans le rocher, dès l'époque paléochrétienne pour les parties les plus anciennes, et pour l'essentiel au XII^{ème} siècle. Classée Monument Historique en 1912, elle a fait l'objet de nombreuses études et de programmes successifs de travaux en vue de son déblaiement, de son confortement et de sa restauration. Elle accueille aujourd'hui environ 40 000 visiteurs par an.

Malgré les multiples travaux effectués depuis 1966, ce monument souterrain présente actuellement de nombreux signes d'instabilité, de nature à remettre en cause la sécurité des visiteurs : fissures ouvertes en voûte, écailles de mortier projeté en cours de décollement, desquamation et effritement des parois, fracturation importante du toit près des entrées, etc.

Un programme de recherche, mené dans les années 1968-71, avait mis en évidence des processus d'altération chimique de la roche (formation de gypse en surface, par suite de la dissolution des sulfures, sous l'action des eaux souterraines) et préconisait de supprimer totalement les venues d'eau dans l'édifice tout en limitant autant que possible l'évaporation (par confinement du site). Des travaux de canalisation des eaux de percolation ont été entrepris et toutes les ouvertures hautes de l'édifice ont été fermées.

Le constat de l'évolution / apparition de certaines / nouvelles fissures et la poursuite apparente des processus d'altération chimique de la roche ont conduit le Conservateur Régional des Monuments Historiques de la DRAC (Direction Régionale des Affaires Culturelles) de Poitou-Charentes, à confier au Service Géologique Régional Poitou-Charentes du BRGM une étude dont les principaux objectifs étaient les suivants :

- étudier le comportement géomécanique de l'édifice afin de délimiter les portions d'ouvrages les plus sollicitées et devant le cas échéant faire l'objet de travaux de confortements ;
- analyser les processus d'altération pelliculaire de la roche ; déterminer s'ils se poursuivent ou non ; en établir une typologie et proposer un programme d'actions ou d'études complémentaires pour parfaire la compréhension de certains phénomènes complexes d'altération (nécessitant a priori une durée plus longue d'observation et de mesures).

Dans le présent rapport sont relatés l'ensemble des investigations réalisées (observations visuelles, essais en laboratoire) ainsi que les simulations numériques aux éléments finis. Au chapitre 7, des orientations en matière de mesures conservatoires sont proposées.

1 Travaux réalisés

1.1 ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

L'ensemble des études et travaux effectués sur le site a été recensé et synthétisé de manière à identifier clairement la nature et la chronologie des interventions antérieures, ainsi que les acquis en matière de connaissance du comportement de l'édifice. Ce travail s'est basé pour l'essentiel sur la compilation déjà réalisée par le C.R.M.H.. (Conservatoire Régional des Monuments Historiques).

Quelques enquêtes plus détaillées ont été menées auprès des Architectes en Chef des Monuments Historiques (MM. Villeneuve et Oudin) afin de récupérer l'intégralité des rapports émis par le Centre de Recherche Pétrographique et Géologique de Nancy, (responsable de l'étude menée en 1968-71 sur les altérations chimiques de la roche) et par l'Institut Européen de l'Environnement de Bordeaux (étude réalisée en 1996). D'une manière générale ces enquêtes complémentaires n'ont pas apporté d'élément supplémentaire significatif par rapport aux documents fournis par la DRAC de Poitiers.

1.2 CAMPAGNE DE TERRAIN

La campagne de terrain a eu lieu pendant la semaine du 5 au 9 mars 2002. Durant cette période, d'importants moyens d'investigations ont été mobilisés.

L'appréciation de l'état de fracturation et d'altération de l'édifice a été réalisée à l'aide d'une nacelle élévatrice de type nacelle-araignée C24. En effet, ce type d'appareil s'est révélé être le plus adapté compte tenu des conditions d'accès difficiles et de la nécessité d'auscultation de tous les secteurs de l'édifice jusqu'à près de 18 m de hauteur.

L'acheminement de la nacelle à l'intérieur de l'édifice a été réalisé le 5 mars 2002 dans l'après-midi par l'intermédiaire de la passerelle en bois qu'il a été nécessaire de consolider à l'aide de poutres. Le déplacement de la nacelle à l'intérieur de l'édifice et son repli opéré le vendredi 09 mars, se sont déroulés sans encombres.

La nacelle a permis d'accéder à tous les secteurs de la nef et à l'entrée du transept nord. Pour le fond du transept Nord, le couloir Sud et la salle des sarcophages, une échelle a dû être utilisée pour la reconnaissance des fissures au plafond ainsi que celle des

altérations. Un relevé précis de toutes les discontinuités mécaniques a été réalisé et cartographié ; celui-ci est présenté au chapitre 3.

Durant cette période, les différents types d'altération de la pierre que l'on peut observer dans l'église d'Aubeterre ont été relevés et sont présentés au chapitre 5.

Dix-sept carottages ont été effectués dans l'église afin de prélever des échantillons intacts destinés à réaliser les essais de mécanique des roches et de caractérisation de la pierre, essais dont les résultats sont présentés dans les chapitres 5 et en annexe. Ces essais ont été réalisés par le laboratoire de caractérisation minérale du BRGM et le laboratoire de mécanique des sols d'ANTEA

1.3 RELEVÉ TOPOGRAPHIQUE

Un levé topographique complémentaire a été effectué par Monsieur Jacques Dourieu, géomètre expert à Barbezieux (16). Il a permis de rattacher au Nivellement Général de la France (NGF) les plans existants communiqués par la DRAC et de compléter ces plans par des levés concernant les terrasses du château, la butte de la Muscadière, le toit du transept Nord et la façade extérieure de l'église.

Ces informations nous ont été utiles dans le cadre de la modélisation en trois dimensions présentée au chapitre 6 ainsi que dans l'approche hydrogéologique du site présentée au chapitre 4.

1.4 MODELISATION EN TROIS DIMENSIONS

Sur la base des résultats de mécanique des roches et du levé topographique, une modélisation en trois dimensions a été réalisée sur le mailleur GID et le Logiciel GefDyn développé par l'école Centrale de Paris. Les résultats de cette modélisation sont présentés au chapitre 6 et permettent d'étayer les propositions de confortement de l'église développées au chapitre 7.

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte
d'Aubeterre sur Dronne (16)



Fig. 1 – Localisation de l'église d'Aubeterre sur Dronne – extrait du fond IGN au 1/25 000

2 Synthèse des connaissances

2.1 CONTEXTE HISTORIQUE

L'église monolithe Saint-Jean d'Aubeterre consiste en un vaste édifice troglodyte creusé au pied d'une falaise haute d'environ 30 mètres, située dans le bourg d'Aubeterre-sur-Dronne en Charente.

Même si la région compte un groupe important d'édifices creusés dans la roche, l'église Saint-Jean a conquis sa réputation du fait de ses dimensions exceptionnelles : 27 m de longueur, 16 m de largeur et surtout presque 20 m de hauteur. L'église est composée de deux salles principales : **la salle des sarcophages** appelée aussi église primitive et **la nef** séparée d'un bas-côté par quatre colonnes dont deux saillantes au massif. A une quinzaine de mètres de hauteur, un **triforium** donne sur la nef. En marge de l'accès principal, deux chapelles latérales appelées respectivement **transept nord** et **couloir sud** permettaient notamment d'accéder à la nef. Enfin, une **crypte** située sous l'entrée principale a été découverte en 1961. Un plan détaillant les différentes parties de l'église est proposé sur la figure n°2.

Les terrains situés au-dessus de l'église accueillait autrefois un château dont il ne subsiste plus aujourd'hui que la conciergerie, les remparts et quelques autres dépendances. Cet édifice fortifié communiquait alors avec l'église - extrémité Nord Ouest du triforium- par l'intermédiaire d'un boyau dont l'extrémité supérieure est aujourd'hui obturée.

L'origine de l'église reste obscure, mais il semblerait que son édification soit bien antérieure au XII^{ème} siècle, période où se seraient installés les moines bénédictins. En effet, c'est dans ce siècle que fut construite l'autre église d'Aubeterre, et il est peu probable que les religieux de la ville édifièrent ces deux églises en même temps. Il semblerait que l'édification se soit faite au fil des siècles, et l'origine des parties les plus anciennes pourraient remonter à l'époque paléochrétienne du fait des similitudes avec le temple de Mithra construit à Rome au II^{ème} siècle.

Aux XVI^{ème} et XVII^{ème} siècle, l'église subit d'importantes modifications dues à l'effondrement de la voûte de l'entrée principale. De plus, en marge de la célébration des cultes, l'église servit dès cette époque de cimetière, les défunts étant inhumés dans des sarcophages taillés dans le sol même de l'église. L'activité religieuse s'arrêta à la Révolution et l'église fut transformée en atelier de fabrication de salpêtre en 1794. Cette activité ne dura qu'une seule année. Quant à l'activité funéraire, elle s'arrêta en 1865.

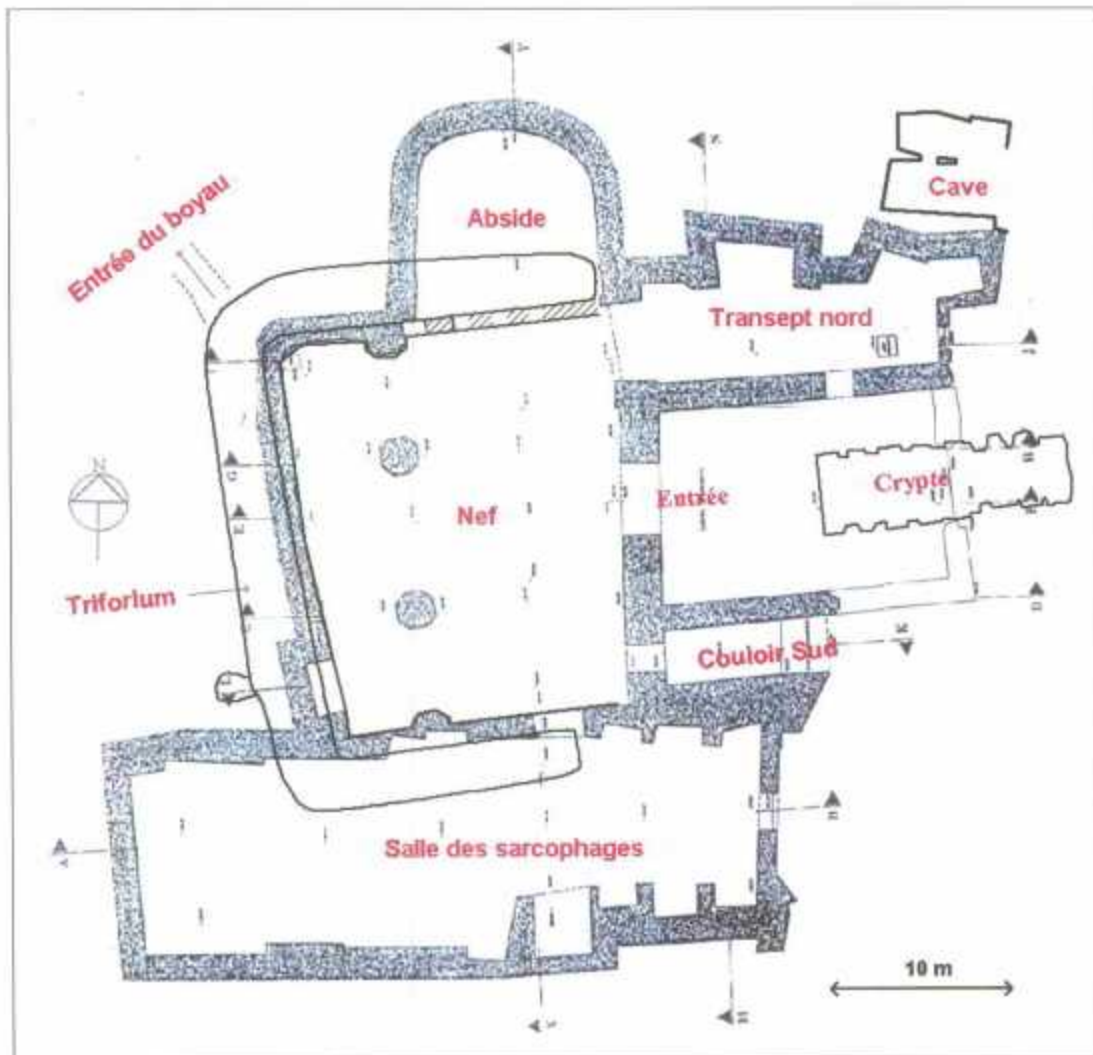


Fig. 2 – Vue en plan des différentes parties de l'église

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte
d'Aubeterre sur Dronne (16)

2.2 CONTEXTE GEOLOGIQUE

L'église troglodyte d'Aubeterre a été intégralement creusée dans les calcaires crayeux du Campanien (Crétacé supérieur). La puissance totale du Campanien est de 215 m ; il se divise en cinq unités recouvrant neuf biozones de foraminifères benthiques.

Une coupe géologique du village d'Aubeterre a été établie en 1983 par MM. Neuman, Platel et al. Il s'agit d'une coupe synthétique de la D.17 depuis le carrefour de la route de Ribérac jusqu'au château, via l'église monolithe. Cette coupe correspond aux unités 4 et 5 du Campanien, plus une base de 8 m du Campanien 3 (cf. coupe ci-dessous).

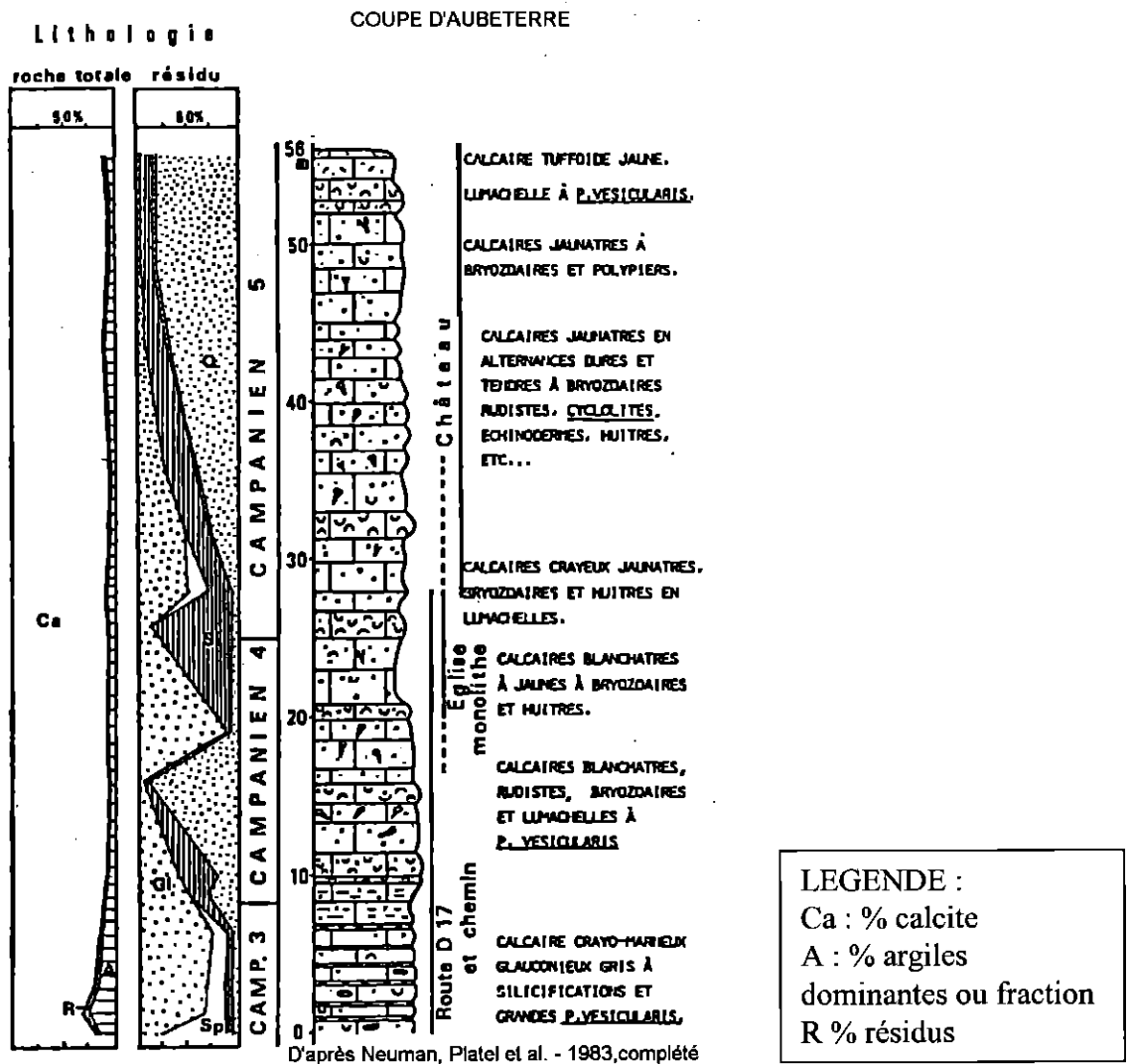


Fig. 3 - Coupe géologique du village d'Aubeterre par MM. Neuman, Platel et al

L'église se situe à cheval sur les unités 4 et 5 du Campanien dont une description lithologique est donnée ci-après.

- **Campanien 4**

Le Campanien 4 (épais de 17 m environ) est une unité de transition marquant le début de la régression fini-crétacée.

Le faciès comprend 15 à 20 % d'argiles constituées par des smectites, et une prédominance de spicules¹. Ces derniers disparaissent alors que le faciès s'enrichit en glauconie.

Ce sont des calcaires crypto à micro-cristallins blanc-jaune, assez tendres, se chargeant progressivement en gravelles et en débris bioclastiques, et entrecoupés par plusieurs bancs calcaires franchement graveleux et bioclastiques. Les résidus présentent de moins en moins de spicules, et sont surtout constitués de petits grains de quartz.

D'autre part, la faune y est très riche (lumachelle), avec la présence de pectinidés, polypiers, bryozoaires, oursins, etc... Cette formation correspond à la biozone C VI de foraminifères benthiques.

- **Campanien 5**

La puissance du Campanien 5 atteint 32 m à Aubeterre. Cette formation est constituée de calcaires bioclastiques jaunes. Les silts quartzeux et micacés sont fréquents.

Le Campanien 5 est très peu argileux (5 % du sédiment, dont 70 % de smectites dans ce cortège argileux).

Les lumachelles sont très développées et la macrofaune est semblable à celle du Campanien 4, mais avec une abondance de rudistes. Cette formation contient les biozones C VII et C VIII de foraminifères benthiques.

Une coupe géologique simplifiée de la paroi Ouest de la nef de l'église d'Aubeterre est donnée sur la figure n°4.

¹ Bâtonnets siliceux ou calcaires dont l'assemblage constitue tout ou partie du squelette de certains invertébrés.

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte
d'Aubeterre sur Dronne (16)

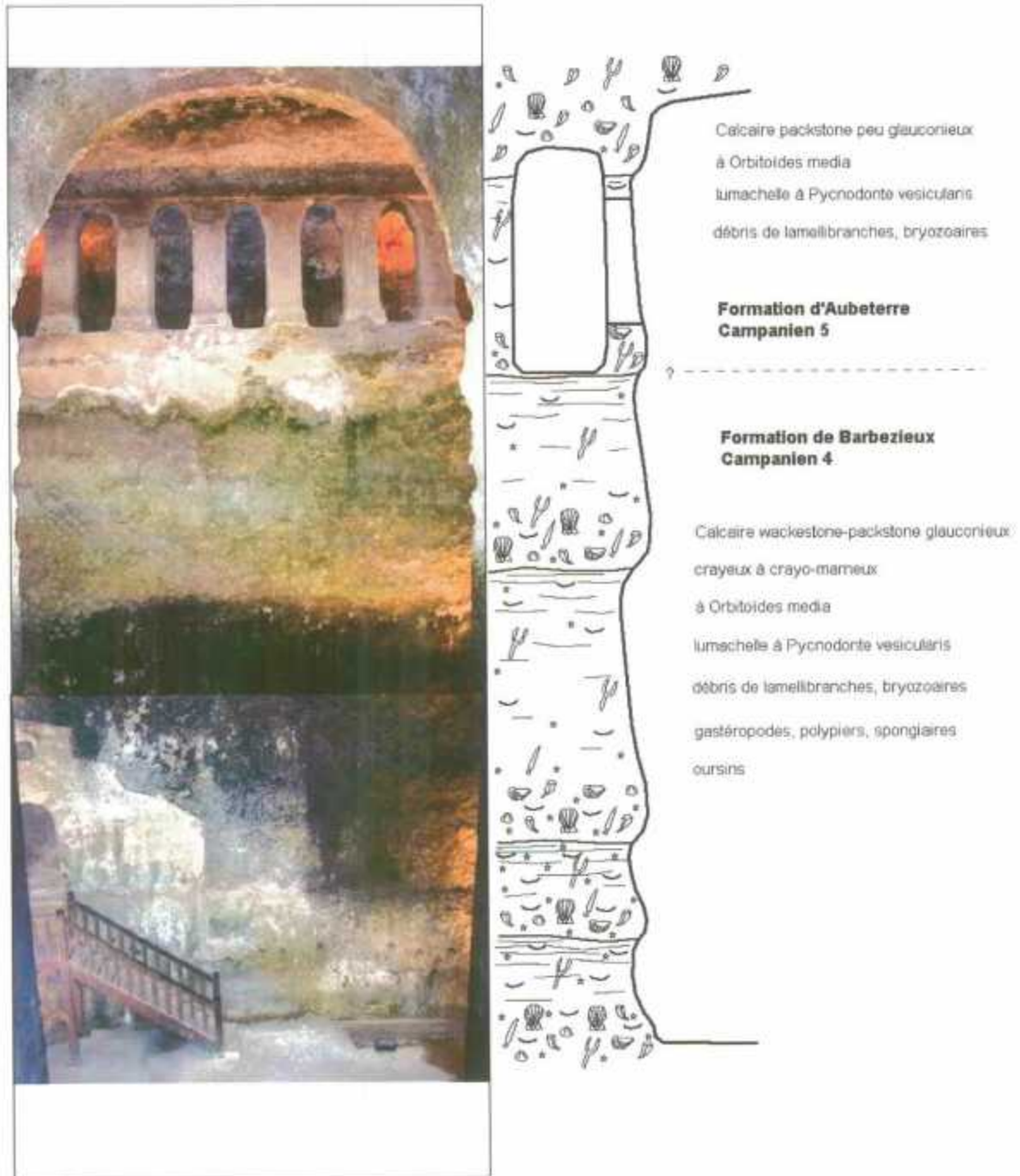


Fig. 4 – Coupe géologique simplifiée de la paroi Ouest de l'église d'Aubeterre

2.3 BILAN DES ETUDES ET TRAVAUX ANTERIEURS

2.3.1 Travaux réalisés depuis 1920

2.3.1.1 Travaux de consolidation structurelle

Outre les confortements du XIV et XVII^{ème} siècle, suite à l'effondrement de la voûte de l'entrée principale, les premiers travaux entrepris remonteraient vers 1920 et porteraient sur la consolidation de la voûte par la construction d'un pilier en maçonnerie situé dans le transept nord et dont la base est actuellement déchaussée.

En 1952, M. Jouven² proposa une consolidation en béton armé plus une projection de mortier de l'escalier menant au triforium devenu impraticable. Il proposa aussi la réalisation de deux étais en béton armé recouvert aussi d'enduit à la chaux projetée.

En 1966, l'entreprise Béligot, reprenant les principaux constats et recommandations de M. Mastorakis (successeur de M. Jouven), réalisa un pilier en béton armé pour soutenir une masse calcaire menaçant de s'écrouler et se situant dans l'angle extérieur nord-est du transept nord. Les fissures dans cette partie furent purgées puis du ciment y fut injecté et on y posa des agrafes. Cette zone fut ensuite recouverte d'enduit imitant la roche.

Cette même entreprise effectua de 1968 à 1969 une consolidation de la galerie haute de l'escalier reprenant le devis de M. Mastorakis de 1966. Dans la galerie haute, cinq piliers en béton armé, recouverts d'un enduit de mortier imitant la roche, furent édifiés entre le parapet et le toit de la galerie.

En 1987, le rocher extérieur situé au dessus de l'entrée fut purgé par l'entreprise MecanRoc sur devis de M. Oudin (A.C.M.H.), ainsi que des faux parements en mortier de chaux dans la nef. Cette même année, RBL réalisa la construction d'un mur en moellon avec enduit dans l'entrée du parvis. Cette entreprise reprit aussi l'encadrement en pierre de taille de la porte secondaire sud-est. Quelques deux années plus tard, elle procéda à une purge des murs et de la voûte de la nef.

De 1995 à 1996, RBL réalisa une série de purges et consolidations de diverses zones par tirants inox avec traitement algicide sur la paroi du bas-côté ouest, sur la paroi située entre l'entrée et le transept, et la partie ouest du mur sud du transept. Un traitement algicide accompagné du remplacement de certaines pierres a aussi été effectué sur la paroi ouest et la voûte de l'abside, de même qu'un rejointoiement avec coulis de chaux.

² Architecte des Monuments Historiques

L'éperon rocheux surmontant la partie ouest fut lui aussi consolidé par des tirants inox puis par la construction d'un mur en pierres de taille en 1998-1999.

Durant ces deux dernières années, suite au rapport de M. Oudin, les travaux de purge et de consolidation des parois rocheuses se poursuivent avec notamment traitement algicide et remplacement de pierres, rejointement et coulis de chaux sur les parois sud et est de la nef.

2.3.1.2 Travaux d'assainissement, d'accessibilité et d'esthétique

En 1959, 2 700 m³ de terre furent déblayés à la main sur l'ensemble des sols intérieurs pour que l'église recouvre son niveau de sol originel. De plus, afin de prévenir les remontées d'eau par capillarité, un dispositif de pompage a été mis en place au niveau du sol décapé.

L'entreprise Béligot réalisa d'autre part un système de drainage à la demande de M. Mastorakis en 1962. Les travaux consistèrent en l'aménagement d'un caniveau avec regards de décantation le long de la paroi de la galerie supérieure plus une descente d'eau vers l'église et une canalisation partant de la nef et menant ces eaux vers l'extérieur. Dans la salle des sarcophages, un caniveau le long de la façade sud fut mis en place ainsi que des barbacanes dans le mur est.

Le reliquaire placé au niveau du chœur de l'église et qui était attaquée à la base par le salpêtre et les moisissures, reçut un enduit en ciment blanc cette même année.

Après avoir été découverte accidentellement quelques années auparavant, la crypte se trouvant sous l'entrée principale fut déblayée et l'accès fut rendu possible au moyen d'un escalier en bois (1968-1970).

De 1973 à 1974, l'entreprise Béligot, sur devis Mastorakis, réalisa une autre série de travaux ; elle effectua notamment le terrassement pour abaisser les sols de la nef, de l'abside et du transept. Ensuite, elle coula une dalle de béton armé autour du mausolée et mit en place une passerelle en sapin dans la nef pour assurer le circuit de visite.

A la demande de M. Bonnard, l'entreprise Béligot coula une dalle en béton armé afin de reconstituer le niveau ancien du sol, recouvrant ainsi les sarcophages présents dans la nef.

De 1979 à 1981, les entreprises STR, Mériguet et Lassort, sur devis de M. Bonnard, réalisa une dalle en béton armé au dessus de la voûte de la crypte, ainsi que l'aménagement du parvis (auvent, passerelle en bois, grille d'entrée et emmarchement).

Le caniveau de la galerie haute fut curé en 1987 et un collecteur en P.V.C. fut mis en place. L'escalier menant à cette galerie fut refait en pierre de Chauvigny et les baies des parois est de la salle des sarcophages et de la nef furent fermées à l'aide de plaques en plastique blanc transparent.

2.3.2 Études réalisées

Deux principales études ont été réalisées sur l'église d'Aubeterre portant l'une et l'autre sur les deux problèmes chroniques de cet édifice : l'altération de la pierre en surface et les défauts de stabilité géomécanique.

2.3.2.1 Altération de la pierre

L'étude réalisée par le **Centre de Recherche Pétrographique et Géochimique de Nancy en 1975** avait pour but d'analyser les origines de l'altération de la pierre.

L'étude, très complète, a consisté en analyses pétrographiques de la roche, typologie et analyses microbiologiques des altérations, analyses chimiques et microbiologiques des points d'eau à l'intérieur et à l'extérieur de l'église, et enfin en un suivi pendant plusieurs mois des régimes hydrologiques et de la climatologie de l'église.

Sans entrer dans les détails de cette étude, les mécanismes d'altération de la roche étaient dus, selon le CRPG, à la conjonction de quatre facteurs principaux :

- la présence de pyrite dans la roche ;
- l'oxydation microbiologique de la pyrite ;
- le transport des sels formés par l'eau, vers la surface ;
- le dépôt des sels par évaporation près de la surface, dans la roche.

Le CRPG proposait comme solution, un drainage des eaux de ruissellement venant directement de la plate-forme du château et un étanchement des canalisations et des réservoirs. Ceci avait pour but d'éliminer une quantité notable des venues d'eau dans le triforium et au niveau de l'ancien clocher. En parallèle, le CRPG proposait de diminuer autant que possible l'évaporation en fermant les ouvertures de l'église de façon à limiter les variations thermo-hygrométriques à l'intérieur de l'édifice.

On peut remarquer que suite à ces recommandations, des mesures de fermeture de l'église ont été prises : fermeture des entrées hautes et du triforium, mise en place d'une porte en bois, pleine, à l'entrée. Le curage du caniveau de la galerie haute et la mise en place d'un collecteur en PVC ont été entrepris pour faciliter le drainage des eaux de ruissellement à l'intérieur de l'église.

2.3.2.2 Stabilité mécanique

En 1992, la DRAC a demandé au bureau d'études Batigéoconseil d'effectuer une étude sur les caractéristiques physiques et mécaniques de la roche, ainsi que des calculs de stabilité de l'édifice.

Batigéoconseil a procédé à cinq sondages (trois dans l'escalier, un dans la galerie et un dans le boyau) et à un sciage de blocs en partie basse, près des compteurs, afin de prélever des échantillons pour les essais de mécanique des sols. Ceux-ci ont permis de retenir les paramètres suivants:

Paramètres	valeur mini	valeur maxi	moyenne
W (%)	7	16	12 (hors bloc)
γ (kN/m³)	19.5 (partie basse)	14.7 (partie haute)	17,6
Rc (MPa)	0,9	17,9	2,7
Re (MPa)	0,6	3,9	2,7
E (MPa)	295	7364	2960
Rt (MPa)	0,1	0,3	0,22

Tab. 1 – Valeur des essais de mécanique des sols utilisées par Batigéoconseil (1992)

Avec :

- W% : teneur en eau
- γ (kN/m³) : densité
- Rc (MPa) : résistance en compression
- Re (MPa) : résistance limite élastique en compression
- E (MPa) : module de Young
- Rt (MPa) : résistance en traction

Une simulation numérique en trois dimensions, aux éléments finis, a été menée à l'aide du progiciel Cosmos afin de déterminer la répartition des contraintes et des déformations autour de l'église. Les conclusions tirées étaient les suivantes :

- l'influence sur les déplacements horizontaux d'une suppression éventuelle des piliers de la nef était négligeable ;
- une zone de 1,50 m d'épaisseur constituant le plafond de l'église était sollicitée au delà du seuil de rupture de la craie. La zone la plus sollicitée se situerait grossièrement dans un plan passant entre les deux piliers et l'entrée principale ;
- la paroi se situant entre l'entrée principale et la galerie sud était sollicitée au delà du seuil de rupture du calcaire crayeux.

3 Analyse de la fissuration

3.1 METHODOLOGIE

L'ensemble des discontinuités mécaniques observables à l'intérieur et à l'extérieur de l'édifice a été relevé à l'aide d'une boussole de géologue, d'un laser mètre et d'un décimètre. A chaque observation (géotechniques, hydrogéologiques, pétrographiques) est associée une photographie numérique. La nacelle élévatrice a permis d'accéder à tous les secteurs de la nef. Pour l'auscultation de la salle des sarcophages, du couloir sud et de l'extrémité du transept nord, le recours à une échelle s'est révélé indispensable.

Les observations de terrain ont été numérotées et font l'objet d'un report sur plan (fig. 6 et 8) Une description détaillée de ces observations est donnée en annexe 2. Une analyse synthétique des désordres observés au sein des différents secteurs de l'édifice est donnée dans les chapitres suivants.



Photo 1 – Nacelle élévatrice dans la nef

3.2 TRANSEPT NORD

Il s'agit du secteur le plus dégradé de l'église. On y retrouve à peu près tous les types de discontinuités d'origine mécanique (fissures de compression, fissures de traction, décollement de plaques, écaillage de piliers...) en raison de la position externe du transept par rapport au reste de l'église et de la faible épaisseur de la dalle calcaire de toit. Cette position excentrée lui vaut un report de charge du massif calcaire dont la tendance naturelle est de basculer vers la vallée.

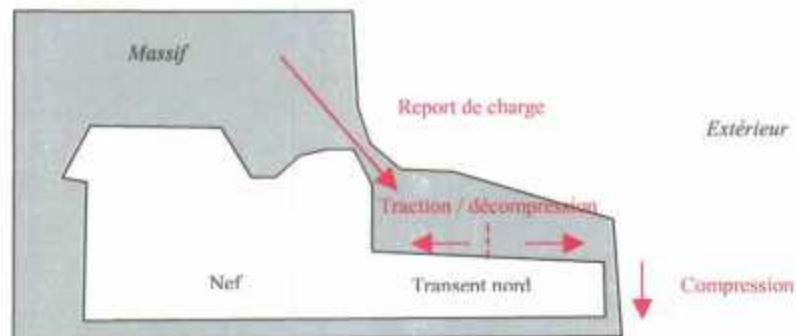


Fig. 5 – Hypothèse de schéma conceptuel des contraintes mécaniques régnant dans le transept nord

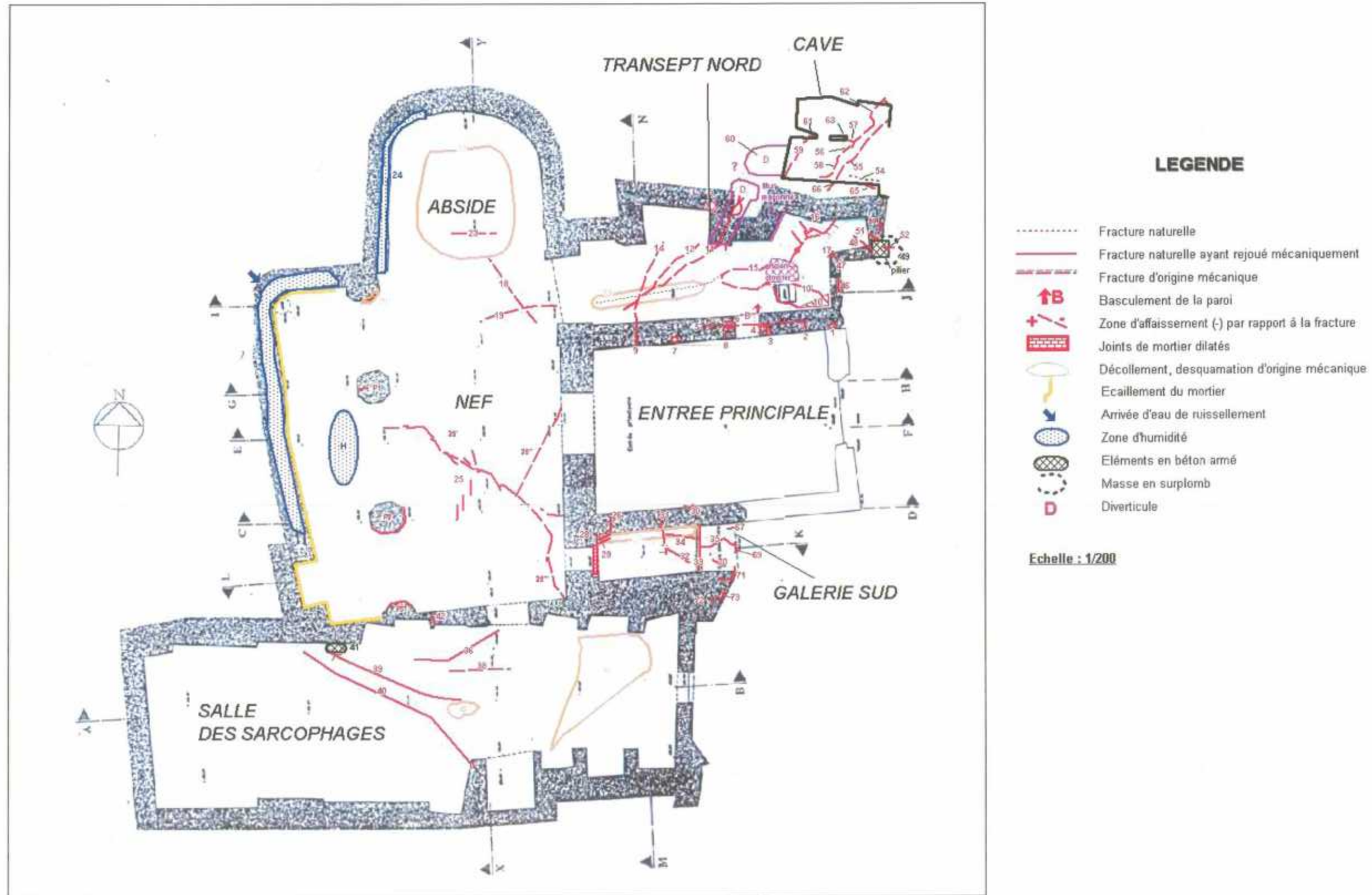


Fig. 6 - Relevé des désordres observés dans l'église d'Aubeterre (Nef, transept, couloir sud et salle des sarcophages)

3.2.1 Etat des parements

Les phénomènes de compression sont nombreux sur les parements maçonnés du transept où ils se traduisent par des fissures verticales dilatées horizontalement, des phénomènes de dilatation de joints de mortier ou encore un écaillage de piliers saillants. Les fissures n° 2 à 8 et 17 (fig. 6) en sont la manifestation. **Ces fissures traduisent un report de charge excédentaire du massif calcaire sur les parements.**



Photos 2 et 3 – Effets des mécanismes de compression sur le parement sud du transept nord

Des phénomènes similaires de compression sont perceptibles à l'extérieur du transept sur les parements en maçonnerie mais également sur un pilier en béton armé (fissure n°52) qui épaulé le rocher au niveau du portail donnant accès à une petite cave attenante.

On remarque également des phénomènes de compression au niveau de l'accès est du transept nord (fissure n°46) qui se traduit ici par une fissure horizontale d'écrasement du crépi sur les moellons de l'encadrement de la porte.

3.2.2 Etat de la voûte

L'état actuel de la voûte du transept nord est préoccupant en particulier en partie est du transept. Dans ce secteur, une chute de bloc de taille importante voire un effondrement de la voûte peut se produire à court ou moyen terme.

Les trois quarts est de la voûte du transept nord sont marqués par des contraintes qui traduisent dans leur ensemble un phénomène de décompression de bordure de massif. On peut remarquer que l'orientation variable de ces fissures induit probablement une décompression du massif calcaire à la fois dans le sens Est/Ouest mais également dans le sens Nord/Sud. Ce phénomène est normal car depuis l'effondrement de l'entrée principale, il y a deux siècles, **la poussée du massif calcaire au niveau du transept nord s'effectue non plus seulement vers l'Est mais également vers le Sud** où le contreventement autrefois exercé par le recouvrement du toit de l'entrée principale n'existe plus.

A l'intérieur du transept, ces fissures de décompression s'expriment particulièrement bien au droit de l'ancien clocher dont le débouché sur l'extérieur est actuellement muré. Ce type de fissures est également très présent au droit d'un diverticule situé à quelques mètres de hauteur sur la paroi nord du transept dont la fonction exacte reste ignorée. Notons que la reconnaissance de ce diverticule n'a pu être effectuée en raison des moyens d'escalade lourds que cela aurait nécessité.



Photo 4 – Vue générale du transept nord



Photo 5 – Aperçu de la fracturation au niveau du clocher

Ces phénomènes de traction et de décompression tendent à libérer des blocs comme cela a été apparemment le cas au niveau de la discontinuité n°10 (Cf. fig. 6) où l'on constate le départ d'un dièdre rocheux de 200 à 300 kg. Un phénomène identique est observable au droit des discontinuités n°15 et 16 au niveau desquelles des départs de blocs de taille équivalente, voire supérieure, sont possibles à court terme (au niveau de la discontinuité n°16, le bloc mobilisé par les fissures est descendu de 7 cm). A ce titre, le pilier situé à proximité de l'ancien clocher et dont l'assise a été déchaussée suite au décapage des remblais à l'intérieur du transept nord en 1957, semble supporter un bloc de l'ordre d'une tonne (discontinuité n°10'). Cette situation est préoccupante compte tenu du fait que l'assise déchaussée du pilier n'est constituée que de remblai compacté sur environ 1,80 m de hauteur.

Enfin, il est possible que le réseau de fissures n°11, 12 et 14 résulte d'une portée entre appuis localement excessive dans le sens Est/Ouest, synonyme **de rupture par flexion ou par effort tranchant**.

3.2.3 Extérieur du transept

A l'extérieur du transept, la fissure n°48 (d'abord subverticale puis 60° W) semble particulièrement pénétrante (elle affecte plusieurs dizaines de tonnes de rocher), traduit également un phénomène de décompression de bordure de massif. Plusieurs témoins en verre ont d'ailleurs été posés au droit de cette fissure et certains sont brisés sans que l'on puisse toutefois totalement exclure une cause anthropique pour cette rupture (chute de pierres, dilatation thermique ?). Il reste que ce secteur est mécaniquement très sollicité comme en atteste l'état du pilier en béton armé (fissure n°52) qui contribue largement à soutenir l'ensemble.

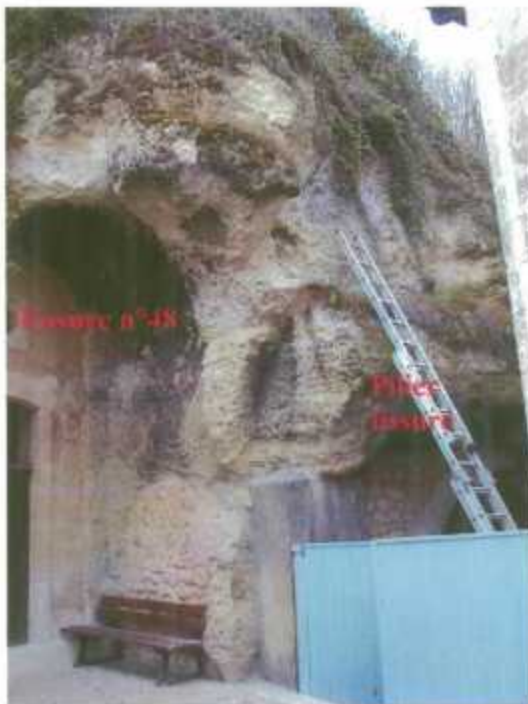


Photo 6 – Vue extérieure du transept

3.3 NEF

3.3.1 Fissuration de la voûte

Les dimensions exceptionnelles de la nef de l'église d'Aubeterre (hauteur sous voûte de 17,50 m) ainsi que l'épaisseur de la dalle calcaire de toit, localement très faible, semblent être à l'origine des désordres observés. En effet, sur la coupe ci-dessous on constate que l'apparition de fissures dans la voûte pourrait provenir d'un basculement du massif calcaire vers la vallée. Ce phénomène pourrait se traduire par **l'apparition de fissures sur la bordure du massif au niveau de laquelle l'épaisseur de calcaire est trop peu importante pour résister à l'effort tranchant appliqué.**

Cette hypothèse semble plausible au regard des fissures 25'' et 25''' qui présentent des signes **d'abaissement de la partie interne de la nef par rapport à la partie externe**, matérialisés par un rejet atteignant localement 1 cm.

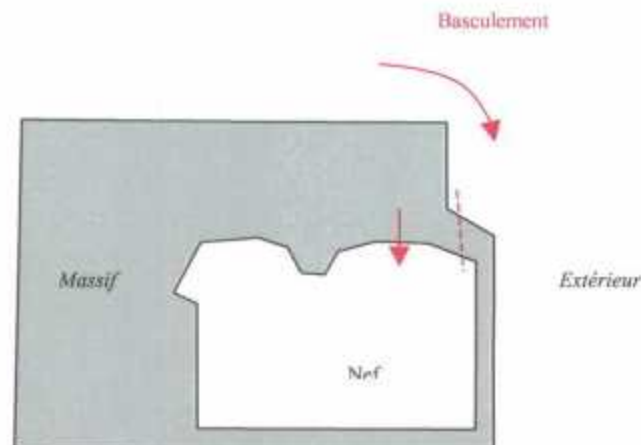


Fig. 7 – Hypothèse de schéma conceptuel du comportement mécanique de la Nef

Il est possible que ce mouvement s'accompagne d'un **basculement du parement en maçonnerie vers la vallée** comme en témoigne l'ouverture des fissures n°25'' et 25''' comprise entre 1 et 15 mm. Cependant, **aucun signe apparent d'instabilité ou de discontinuité n'est perceptible** sur ce parement.

Ces fissures se prolongent ensuite vers l'intérieur de la nef par l'intermédiaire de la discontinuité n° 25' au niveau de laquelle le rejet devient nul, et qui finit, après avoir pris une direction Est/Ouest, par se perdre entre les deux piliers. A mi-distance entre l'alignement des piliers et le parement en maçonnerie, la fissure n°25' intercepte un réseau de petites fissures mécaniques (n°25) d'orientation Nord /Sud.

Compte tenu de ces éléments, il est possible que **les discontinuités n°25 et 25'** traduisent dans un secteur où la portée entre appuis est grande (10 m), **une sollicitation en flexion trop importante** pour les premiers bancs calcaires de la voûte.



Photo 7 – Voûte de la nef – Fissure n° 25''

Photo 8 – Voûte de la nef - rejet vertical sur la fissure n°25''

Deux autres fissures (n°18 et 19) sont visibles en voûte au niveau du transept nord. Leur position externe par rapport à la nef nous incite à leur accorder une genèse similaire à celle des fissures n°25'' et 25''' situées au Sud de la nef. Cependant, elles ne comportent aucun rejet vertical et leurs pendages respectifs (subvertical et 40°N) traduisent potentiellement des contraintes de natures différentes. Il est possible que plusieurs phénomènes interagissent à ce niveau (décompression du transept, effort tranchant sur la bordure de la nef. On remarque en effet que la fissure n°19 possède à peu près la même direction Est/Ouest que la fissure n°15 qui affecte le transept nord (hypothétiquement prolongée par la zone de discontinuité n°11), ce qui pourrait traduire une similitude des contraintes à savoir **une décompression du massif vers le Sud**.

La fissure n°18 présente des similitudes avec la fissure n°25''' en terme de direction mais son rejet est nul. Notons que cette discontinuité se prolonge dans le triforium où elle est en partie masquée par des reprises au mortier. Comme pour les fissures n° 25'' et 25''' , **la fissure n° 18 pourrait traduire l'effort appliqué par le basculement du massif sur la bordure peu épaisse de la nef**.

Enfin, il est intéressant de constater que l'ensemble des fissures qui affectent la nef se situent, si on les projette à l'extérieur de l'église, entre le parement ouest de l'église et le mur qui fait office de soutènement des terrasses du château. Cette observation montre bien que c'est la partie la moins épaisse du toit de l'église qui est la plus affectée par les désordres.

3.3.2 Paroi ouest de la nef

La paroi ouest de la nef est marquée par la présence d'un niveau de source à 8 m de hauteur dans l'angle nord ouest. À ce niveau de source est associé un niveau de résurgence plus diffus, exprimé sur toute la façade ouest de la nef entraînant des développements algaires très importants, ainsi qu'un sous-cavage qui par endroits peut atteindre 1,20 m. Entre la galerie balcon et cette concavité, des épingles en inox de 60 cm de long ont été régulièrement disposées selon une maille sensiblement carrée de 25 cm environ. On retrouve ces épingles au-dessous du creux, à partir d'une hauteur de 2,75 m et pratiquement jusqu'au niveau du sol. À l'heure actuelle, **cette zone épinglée ne présente pas d'instabilité résiduelle apparente.**

Il n'en est pas de même **au niveau du pilier saillant nord** sur lequel on observe une **desquamation intense** à hauteur de la base du triforium (discontinuité n°20) entraînant une libération d'écailles de 40 cm d'épaisseur. À terme, ce phénomène entraîne un sous-cavage des piliers du triforium, de nature à remettre en cause leur stabilité et à provoquer un risque potentiel de chute de blocs dans la nef.

Signalons enfin que, sur tout le pourtour ouest de la nef, à hauteur du triforium, les **parements en mortier de chaux** projeté réalisés en 1987 présentent des **défauts manifestes d'adhérence entraînant des risques élevés de chute de blocs de mortier.**

3.3.3 Etat de l'abside

L'état général de l'abside est globalement meilleur que celui de la nef, en raison probablement de ses dimensions plus modestes. Ce secteur n'échappe cependant pas à une intense desquamation.

Il convient par ailleurs de signaler la présence d'une fissure Est/Ouest (n°23) sur la voûte à hauteur de la naissance du plancher du triforium. Cette fissure de 2,50 m d'extension et de 1 mm d'ouverture pourrait correspondre à **un effet de basculement vers le Sud du plancher du triforium situé au-dessus de l'abside.**

Les phénomènes de desquamation sont très importants dans l'abside, ainsi :

- la partie centrale de la coupole, au-dessus du reliquaire, est soumise à une desquamation intensive (de plaques de calcaire de quelques centimètres d'épaisseur). **Ces phénomènes traduisent probablement d'importantes contraintes de traction ;**
- côté Ouest, à environ 7,50 m de hauteur, on note la présence d'un encorbellement en voie de désagrégation entraînant une desquamation de la roche sur 5 à 6 cm d'épaisseur ;

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte
d'Aubeterre sur Dronne (16)

- un délitage en plaques est observable au Nord-Ouest de l'abside jusqu'à 3 m de hauteur sur une épaisseur de 5 cm au maximum.

On signalera enfin que l'abside présente, à trois hauteurs différentes, des surcreusements imputables à l'existence d'horizons géologiques de moindre qualité mécanique ou plus riches en argile. Ces niveaux sont soulignés sur la façade ouest de l'abside par des suintements d'eau. On observe ces surcreusements à 7,50 m, à 5,50 m et à 2,90 m de hauteur ; ils donnent à l'abside un aspect asymétrique.

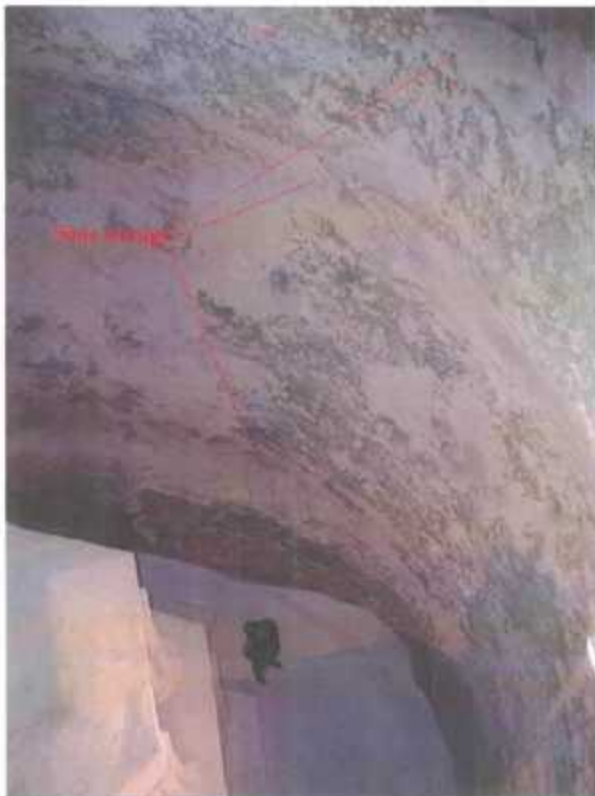


Photo 9 – Abside – phénomène de sous-cavage



Photo 10 – Abside, triforium et pilier saillant Nord

3.3.4 Etat des piliers de la nef

Si le parement en maçonnerie à l'Est de la nef ne présente pas de signes de compression, il n'en est pas de même pour les deux piliers centraux qui révèlent tous les deux, des traces d'écaillage et de micro-fissuration à la base des chapiteaux. Ces dégradations résultent de chargements excessifs des deux colonnes, et probablement d'une moindre résistance mécanique du calcaire en têtes de colonnes.

Pilier saillant nord :

Ce pilier a subi une perte de matière (rétrécissement de section) entre 5 et 8 m de hauteur, comptée à partir du plancher de la nef (n°20).

Pilier nord :

Sa tête se dégrade à partir de 10,75 m comptés depuis le plancher de la nef. On note une seule fissure mécanique (P1), verticale, longue de 0,30 m, vers 12 m de hauteur sur la face W. On ne peut apprécier la direction de cette fissure.

Pilier sud :

On observe la présence de différentes fissures (P2) sur la moitié sud vers 12 m de haut dans la partie altérée. Elles semblent parallèles à la facette du pilier en regard de laquelle elle se trouve. Il s'agit de fissures dues à la compression.

Pilier saillant nord :

On observe quelques fissures de compression également vers 12 m de hauteur. Contrairement à son homologue nord, ce faux pilier n'est pas adossé à la masse crayeuse du fait de la présence de la salle des sarcophages. On voit bien sur la vue en plan que sa section au sol est en réalité très réduite.



*Photo 11 – Pilier Sud – phénomène
d'écaillage à la naissance de la voûte*



*Photo 12 – Pilier Nord – réduction de section
du à l'écaillage*

3.4 GALERIE SUD

La fissuration du couloir sud présente des similitudes avec celle observée dans le transept nord. On y retrouve des phénomènes de compression sur les parements maçonnés et de décompression ou traction sur le toit calcaire.

3.4.1 Etat des parements

Des phénomènes de compression affectent le parement maçonné qui sépare le couloir sud de l'entrée principale, sous la forme de deux fissures (n°26 et 31). Sur ce parement, on note également un phénomène de dilatation de joint de mortier, coté entrée principale (discontinuité n°30). On observe que ce parement est globalement en très mauvais état (alvéolisation de la pierre, désagrégation des joints de mortier, écaillage ...)

3.4.2 Etat de la voûte

Plusieurs familles de fractures affectent la voûte de la galerie Sud :

A hauteur de la nef, un réseau de fissures de traction (n°28 et 29) apparemment récentes présentant des ouvertures millimétriques, est visible dans l'axe de la voûte.

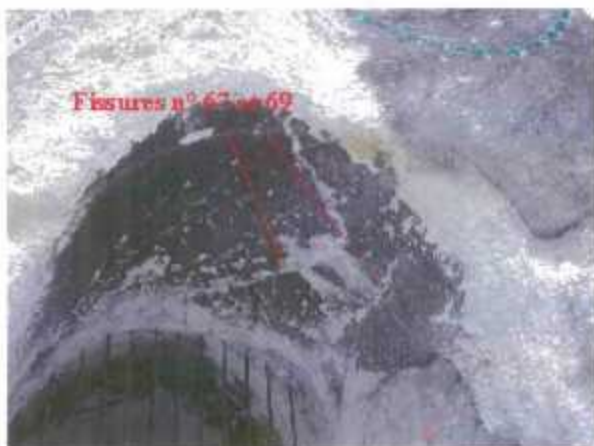
Au milieu du couloir, on observe un deuxième réseau de fissures visiblement anciennes de direction NW/SE (fissures n°32 et 34) traversant la voûte presque de part en part.

Au niveau de la porte, on distingue une fissuration de direction Nord/Sud (n°33), probablement établie à la faveur de la fragilisation induite par la fixation d'ancien barreaux métalliques qui surmontent la porte d'accès au couloir.

Au delà de la porte, en allant vers l'extérieur du couloir, on retrouve dans l'axe de la voûte, une fissure de traction subverticale (n°35), d'ouverture 1 cm, qui se prolonge vers l'extérieur du massif. Cette fissure est apparemment relayée par un réseau de fissures qui se prolonge sur la paroi extérieure du massif, affecté sur 1 m d'épaisseur dans le cas de la fissure n°67.

3.4.3 Extérieur de la galerie

Des accidents verticaux affectent, la partie extérieure du rocher située entre la galerie sud et la salle des sarcophages. La fissure n°71 située à 50 cm de la galerie sud se poursuit au moins jusqu'à 7 m du sol. Sa direction semble Est/Ouest. Une deuxième fissure subverticale (n°72) affecte le rocher à 1,90 m de l'entrée de la galerie Sud. Son extension verticale n'est pas connue.



*Photo 13 – Galerie sud –
Aperçu de la fissuration sur
la partie extérieure de la
voûte*

3.5 CAVE

La petite cavité située au Nord du transept comporte de nombreux indices de dégradation d'origine mécanique en rapport avec sa situation en bordure de massif rocheux et son faible recouvrement. Sa fissuration comporte des similitudes avec le transept. Cette petite cavité de 30 m² tout au plus est très basse, le toit se situant à une hauteur comprise entre 1,75 et 3,40 m par rapport au niveau du sol.

On observe au toit **un réseau de fissures de décompression** typique des bordures de massif : il s'agit des fissures n°55 à 59. Une de ces fissures (n°62) se prolonge sur les parois nord et est de la cave avec un pendage de 60°E, et sur la paroi sud de la cave (n°66) qui sépare cette cavité du transept nord ;

On peut remarquer que ce réseau de fissures orientées Sud-Ouest/ Nord-Est comporte des similitudes directionnelles avec celles observées dans le transept (n°11-12-14-16).

On observe par ailleurs sur la paroi sud, une fissure (n°65) à pendage Ouest qui semble traduire **un basculement du massif vers la vallée. Cette fissure comporte des similitudes avec la fissure n°48.**

On observe également divers **indices de compression** :

- fissure de compression sur le pilier saillant ouest (n°63) ;
- fissure verticale de compression affectant le petit pilier central (n°61).

Enfin, on note la présence d'un petit diverticule partiellement remblayé avec du tout-venant, d'une section 1×1,70 m, près de l'angle sud-ouest de la cavité. Sa profondeur, mesurée au laser-mètre, semble atteindre 2 m. Il est très probable que ce diverticule comportait des connexions avec celui du transept dont il est géographiquement très proche.

3.6 SALLE DES SARCOPHAGES

La salle des sarcophages –hauteur 7 m-, aussi appelée église primitive, révèle moins de signes d'instabilité que les autres secteurs de l'église en raison probablement de son recouvrement calcaire plus important. Sa longueur -28 m- l'absence de piliers et le décaissement du plancher de la nef, génèrent cependant des discontinuités mécaniques notamment au milieu de la salle et en bordure de la nef.

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte d'Aubeterre sur Dronne (16)

Au plafond et à environ 3 m au Sud de la nef, on observe deux fractures (n°36 et 38) globalement orientées Est/Ouest présentant des ouvertures de quelques millimètres. Il est probable que la fracture n°36 soit d'origine naturelle et ait rejoué ultérieurement sous l'action de sollicitations mécaniques dues à l'édification de l'église. Il est intéressant de noter que ces fractures se situent dans l'axe du triforium. Il est possible que ces fractures soient dues à des phénomènes de décompression de bordure de massif entre la salle des sarcophages et la nef.

Deux autres grandes fractures (n°39 et 40) quasiment parallèles traversent la salle des sarcophages selon un axe Nord Est/Sud Ouest. Il s'agit apparemment de fractures géologiques qui ont rejoué mécaniquement. La fracture n°39 vient rejoindre au NW une dalle en béton armée édifée en 1968 à l'occasion de la remise en état de l'escalier du triforium. Le rejeu ultérieur de ces deux fractures pourrait être imputable à la combinaison de deux facteurs :

- contraintes de traction dans les bancs de toit due à leur flexion (en raison de la grande portée entre appuis) ;
- décompression du massif entre la salle des sarcophages et la nef.

En outre, la salle des sarcophages est marquée par la présence de décollements de plaques de calcaire peu épaisses (15 cm maximum). Ces décollements sont importants dans le secteur situé à l'Est de la salle en bordure du massif (discontinuité n°45).



*Photo 14 – Salle des sarcophages
–Aperçu de la fissuration en
voûte*

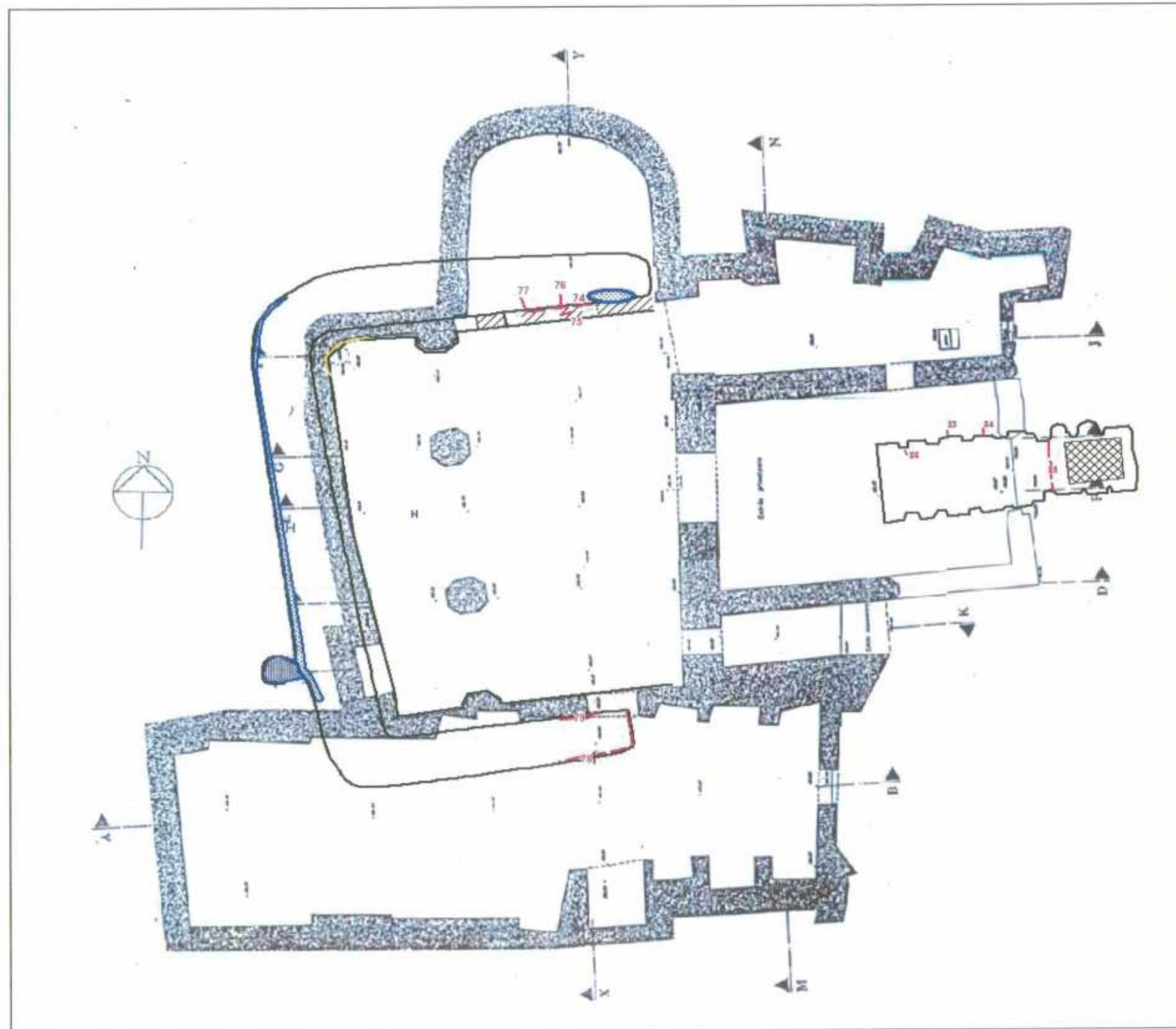


Fig. 8 - Relevé des désordres observés dans l'église d'Aubeterre (triforium et crypte)

3.7 TRIFORIUM

Le triforium de l'église consiste en une sorte de galerie balcon perchée à 10 m de hauteur autour de la nef. Il est difficile de repérer les signes d'instabilité au niveau du triforium en raison de l'omniprésence du mortier projeté. Les principales discontinuités observées sont situées aux extrémités du triforium, en bordure de massif. Elles semblent se prolonger vers le plancher de l'église, soit dans la nef, soit dans la salle des sarcophages.

Dans la partie nord du triforium, au-dessus de l'abside, on observe de nombreuses fissures :

- fissure n° 74, subhorizontale comblée au mortier ;
- fissure n°75, affectant le pied et la tête des arcades du triforium ;
- fissure n°77, presque subhorizontale rejoignant la fissure n°74 au niveau de la troisième arcade en partant de l'Est.

Ces fissures semblent confirmer le **phénomène de basculement/effondrement du plancher du triforium au dessus de l'abside**, hypothèse déjà évoquée au § 3.1.3.3.

Toujours dans la partie nord du triforium, on observe le prolongement de la fissure subverticale n°18 de la nef, qui porte ici le n°76. D'après ce qui a été dit au § 3.1.3.1, cette fissure pourrait résulter des efforts induits sur le côté peu épais de la nef par le basculement du massif.

Dans la partie sud du triforium, on observe la présence de fissures subverticales se développant à l'intersection des parois sud et est avec le plafond (n°78) et au droit des arcades du triforium (n° 79). Dans la fissure n° 78, on observe la présence de racines qui confirment la faible épaisseur du toit calcaire à cet endroit. Ces fissures pourraient correspondre au prolongement des discontinuités observées dans la partie sud de la nef (fissure n°25 ‘’).

3.8 BOYAU

Il s'agit d'une galerie qui s'ouvre à l'angle nord-est du triforium. Son extrémité, aujourd'hui murée, débouche dans les terrasses du château (Cf fig. 9). D'une hauteur moyenne de 1,50 m, elle est fortement pentée (30 à 45 °) et marquée par la présence d'une ancienne citerne évoquée au § 4.

Ce secteur ne présente pas d'instabilité mécanique, sauf à proximité de la surface. Signalons cependant la présence d'un petit diverticule au plafond situé à 3,30 m de la porte murée (discontinuité n°82).

3.9 CRYPTTE

La crypte découverte en 1961 ne révèle pas d'instabilité notable. Tout au plus peut-on noter des traces de vieillissement de la roche (desquamation) et quelques fissures de compression très ténues. Si cette cavité semble saine, son faible recouvrement ponctuel - moins de 1 m- doit inciter à une surveillance régulière, compte tenu des nombreux visiteurs que cette salle accueille.

4 Analyse hydrogéologique

On observe de nombreux écoulements ou suintements d'eau à l'intérieur de l'édifice. Ces écoulements jouent un rôle indéniable dans les processus d'altération de la pierre mais également sur la stabilité mécanique de l'ouvrage en « dégradant » sensiblement les caractéristiques mécaniques de l'encaissant calcaire.

L'étude réalisée par le centre de Recherche Pétrographique et Géochimique de Nancy en 1975 avait montré que l'église était soumise à deux régimes hydrogéologiques différents :

- la partie est de l'édifice réagit directement à la pluviosité extérieure ;
- la partie ouest a un régime hydrique plus stable à variations saisonnières et l'eau peut avoir une origine double :
 - infiltration de l'eau de pluie hors de l'aplomb de l'église et circulation dans les fractures avec imbibition locale du calcaire et résurgence permanente sur la face ouest ;
 - Alimentation de l'église par l'intermédiaire de galeries creusées dans la butte de la Muscardière, au nord-ouest de l'église, recueillant les écoulements superficiels d'une nappe perchée pérenne de faible débit .

4.1.1 Observations à l'intérieur de l'église

Lors de la campagne de terrain en mars-avril 2002, trois principaux points d'eau ont été observés dans l'église :

- **la réserve d'eau du boyau (notée 1 sur la figure n°9)**, encore appelée « citerne » en raison du rôle que cet ouvrage jouait apparemment au moyen âge dans le stockage de l'eau. Cet endroit se révèle aujourd'hui peu accessible en raison d'un remblai de terre poussé devant l'ouverture qui en permet l'accès, de sorte qu'il n'a pas été possible d'apprécier comment cette réserve est alimentée. Celle-ci semblait

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte d'Aubeterre sur Dronne (16)

pleine lors des visites effectuées. La conductivité de l'eau mesurée était de $860\mu\text{S}/\text{cm}$, le 25 avril 2002.

Cette réserve paraît avoir un lien direct avec les écoulements d'eau constatés dans le boyau, qui est totalement sec dans la partie située au-dessus de la réserve et au contraire détrempé à l'aval, jusqu'au triforium.

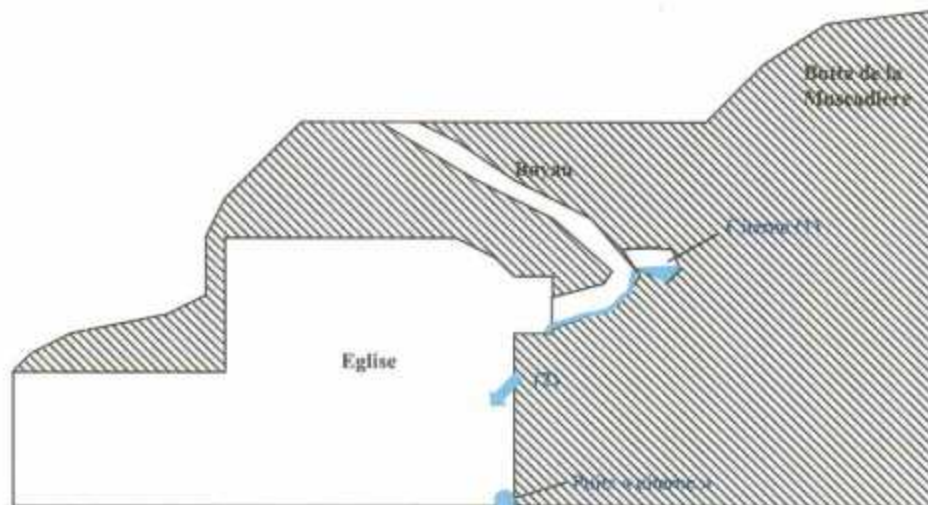


Fig. 9 – Coupe hydrogéologique transversale schématique de l'église

- **Un niveau de source plus ou moins pérenne (noté sur 2 sur la figure ci-dessus)** situé dans le coin nord ouest de la nef à environ 7,60 m de hauteur. Cette source ruisselle le long de la paroi jusqu'à une sorte de puits-citerne situé au niveau du sol où la conductivité de l'eau mesurée le 25 avril 2002 était de $2400\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette source entraîne une colonisation importante de la paroi de la nef par des algues. Elle est associée sur toute la paroi est de la nef à un niveau de résurgence diffus souligné par un sous-cavage entre 7 et 8 m de hauteur. Il est intéressant de remarquer que ce niveau se situe à peu près à hauteur de la transition entre le Campanien 5 et le Campanien 4, réputé plus riche en smectites (argiles). On note que ce niveau sous-cavé, plus humide et plus argileux, est également présent vers 8 m de hauteur dans l'abside. On observe par ailleurs dans l'abside la présence de deux autres niveaux surcreusés, à 3 et 5,50 m de hauteur environ.
- **Un niveau de source situé dans le diverticule du triforium** qui se matérialise par un égouttement lent. Ce secteur est par ailleurs prolongé par une large zone d'humidité sur toute la partie est du triforium jusqu'au boyau (Cf Fig. 8).

Les études antérieures ont fait part de l'existence de circulations d'eau dans la salle des sarcophages avec notamment un phénomène de remplissage des sarcophages par de l'eau en provenance du massif rocheux. Nous n'avons rien observé de tel lors de la campagne de mars-avril 2002, probablement en raison du bas niveau de la nappe durant cette période. Cependant, la présence de draperies calcitiques attestent de l'actualité de ce phénomène.

Nous n'avons pas constaté de phénomène de percolation de l'eau de pluie à travers la partie est de la voûte (hypothèse émise par l'étude du CRPG), peut-être en raison de l'absence de précipitations durant notre présence.

4.1.2 Observations à l'extérieur de l'église

Au-dessus de l'église, le château d'Aubeterre était autrefois alimenté en eau par un aqueduc creusé dans la butte de la *Muscadière*. Cet ouvrage hydraulique amenait l'eau issue de la **source de la Muscadière** à une vaste cuve enterrée encore visible aujourd'hui près de l'ancienne chapelle (Cf. figure n°10).

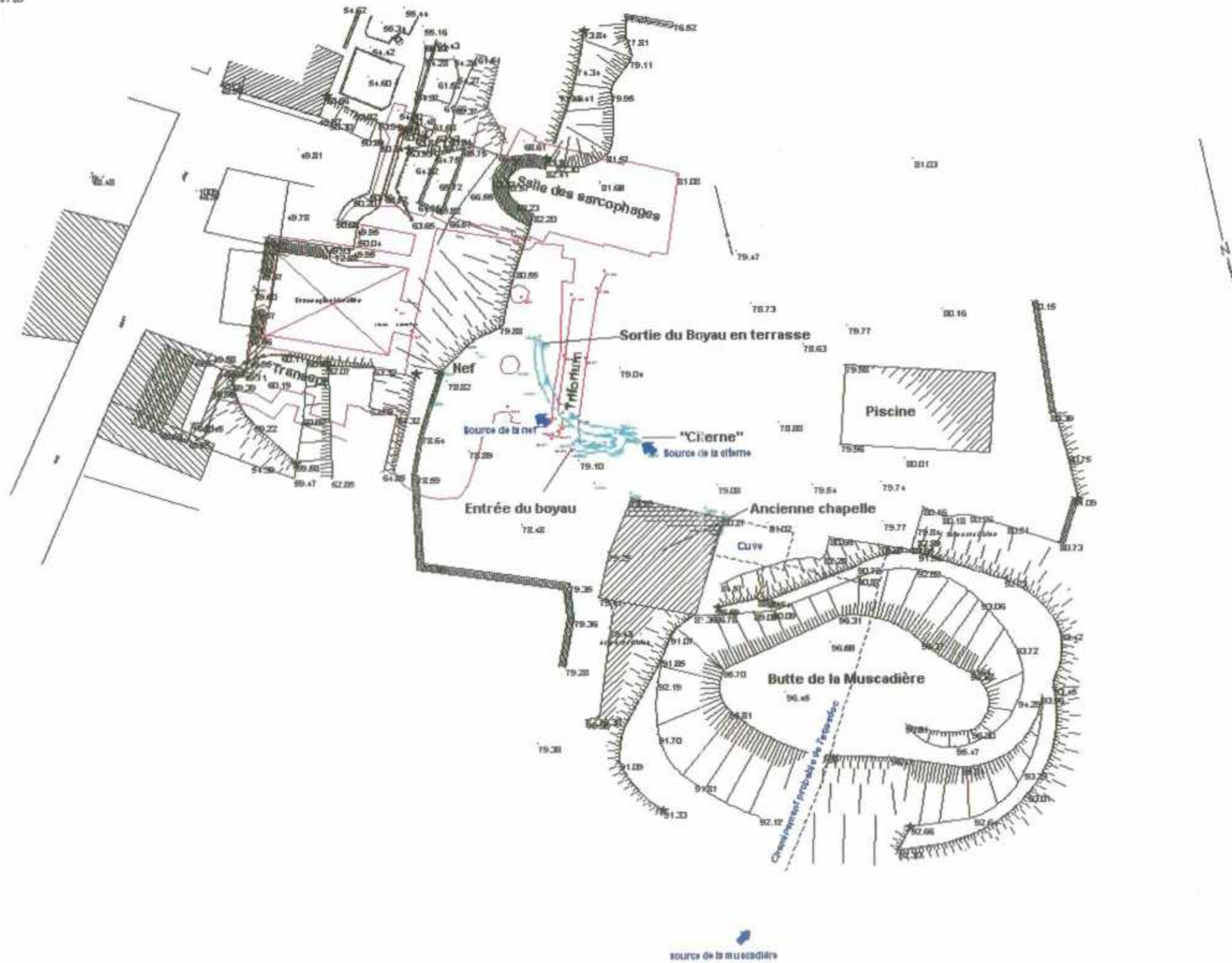
Cet ouvrage n'est actuellement plus en service, et la **source de la Muscadière** s'écoule aujourd'hui dans le chemin d'accès au château. Sa conductivité mesurée le 25 avril 2002 était de 640 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Aucune galerie susceptible de communiquer entre la source et l'église n'a pu être observée.

Outre la conciergerie, l'ancienne chapelle, une piscine et un chemin goudronné, les terrasses du château sont actuellement recouvertes par des pelouses arborées. Les eaux de vidange de la piscine ainsi que les eaux de ruissellement sont recueillies dans des avaloirs et évacuées hors de l'enceinte du château par une canalisation bétonnée. Les eaux usées du château sont évacuées dans une fosse septique vidangée régulièrement.

On trouve par ailleurs sur le trottoir qui fait face au parvis de l'église, un puits dont le niveau d'eau se situait le 25 avril 2002 entre 2 et 3 m en dessous du plancher de l'église.

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte
d'Aubeterre sur Dronne (16)

Dressé le 05 Août 2002 par
Jacques DURIEU
Géomètre Expert Foncier D.F.L.O.
23, Boulevard Ombreux
16000 BARBESIEUX
Tel 05 45 78 10 26



échelle : 1/500°

Fig. 10 – Contexte environnemental de l'église d'Aubeterre

4.1.3 Hypothèses

Malgré la sollicitation de la mémoire collective et les observations de terrain, l'origine et le cheminement de l'eau sur le site de l'église d'Aubeterre restent sujets à interrogation. À ce jour, aucune galerie d'origine humaine ayant pour vocation l'acheminement de l'eau depuis le château jusqu'à l'église n'a été identifiée. Le boyau de l'église ne semble pas avoir rempli ce rôle, car la « citerne » est actuellement pleine et le haut du boyau totalement sec.

Cette citerne pourrait être alimentée par des circulations d'eau à travers le massif calcaire à la faveur probable de fractures géologiques naturelles, de zones de karst et d'interlits plus argileux du massif calcaire du Campanien.

Il n'est pas exclu que des circulations préférentielles relient la butte de la Muscadière (alt. max. 97 m NGF) à la citerne du boyau (alt. 65m NGF) compte tenu de la direction N 300 qui sépare ces deux entités (cf fig. n°10) et qui est également une direction régionale de fracturation.

Il paraît également plausible qu'une relation hydraulique existe entre la source de la Muscadière (alt. 80m NGF) et la citerne compte-tenu de la différence d'altitude (15 m) et de la distance (50 m) qui sépare ces deux points. La faible différence entre les deux valeurs de conductivité mesurées sur ces deux sites pourrait également en témoigner. On ne peut malheureusement trancher à ce stade de l'étude sans une analyse hydrogéologique plus fine du site (analyse chimique de l'eau, traçage).

5 Analyse de l'altération

5.1 ANALYSE DES ETATS DE SURFACE

La localisation des contrôles visuels effectués dans **l'église médiévale** (abside, nef, transept, couloir) et **l'église primitive** (salle des sarcophages) est reportée sur figuré sur la vue en plan présentée en annexe. La localisation des échantillons de surface (croûtes, efflorescences, recouvrements...) est précisée sur les coupes figurant en annexe.

5.1.1 Description des altérations

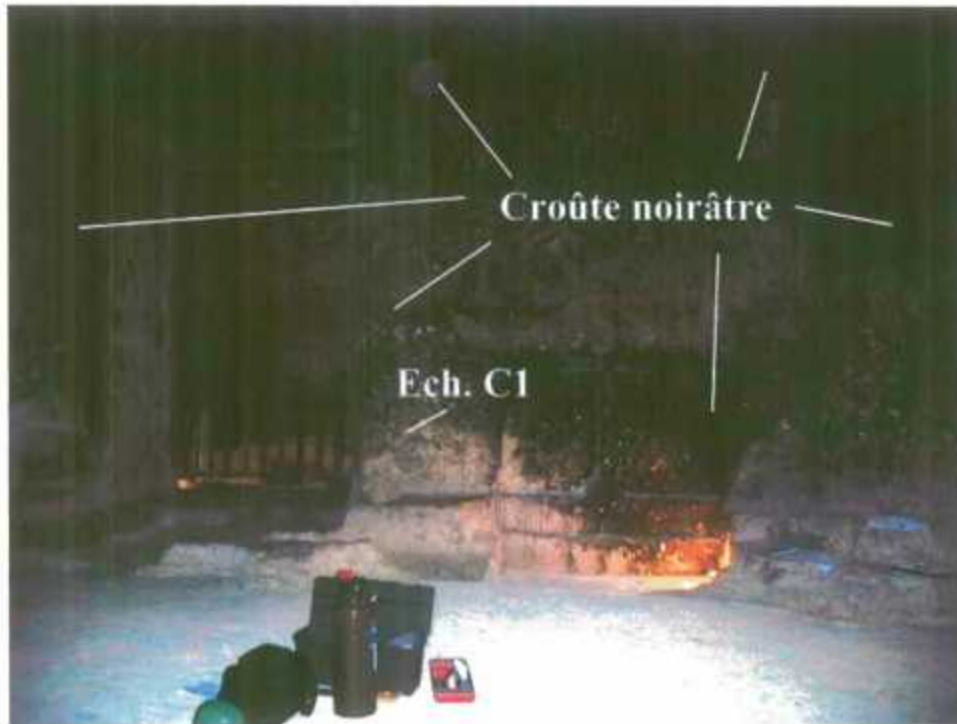
Contrôle visuel (C.V. 1) - Eglise médiévale - Façade sud à l'est du pilier mural (cf. photos 15 à 17) :

Recouvrement biologique brunâtre (algues) depuis la base de la paroi (49,29 m NGF) jusqu'à environ 10 m de hauteur ; au-dessus, recouvrement biologique moins épais jusqu'à 14 m au dessus du sol ; au-dessus, enduit projeté beige jusqu'à la voûte ; recouvrement d'algues maximum à proximité des projecteurs.

La partie brunâtre présente un état de surface correct, sans perte de matière significative ni recul de la façade ; la partie verdâtre correspond à un niveau altéré avec recul de la paroi pouvant atteindre 0,4 m aux alentours de 12 m de haut.

Prélèvement d'un échantillon C1 de la croûte brunâtre (repérage : cf. photos / plan au sol / coupe XY).

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte
d'Aubeterre sur Dronne (16)



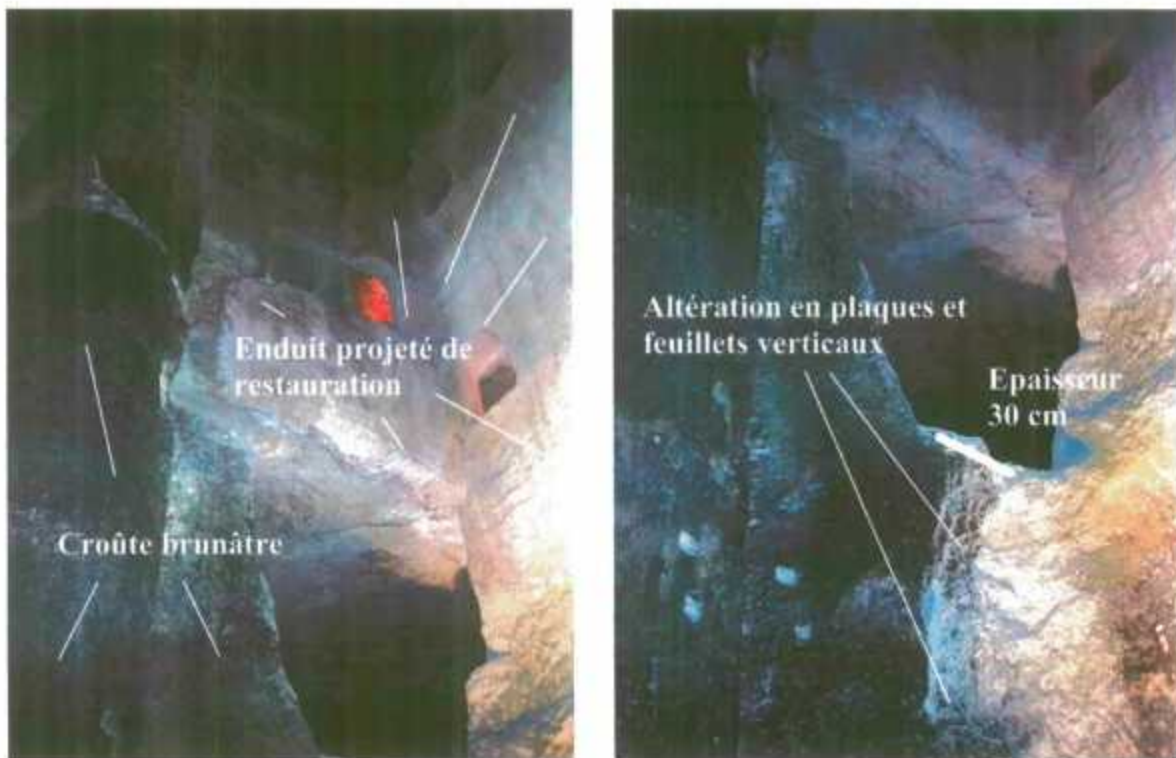
Photos 15 à 17 - Eglise médiévale - Façade sud - Croûte biologique noirâtre recouvrant la façade - Développement d'algues plus marqué à proximité des sources lumineuses (lampe au sol et fenêtre de la façade est)

C.V. 2 - Eglise médiévale - Façade sud à l'ouest du pilier mural (cf. photos 18 à 21)

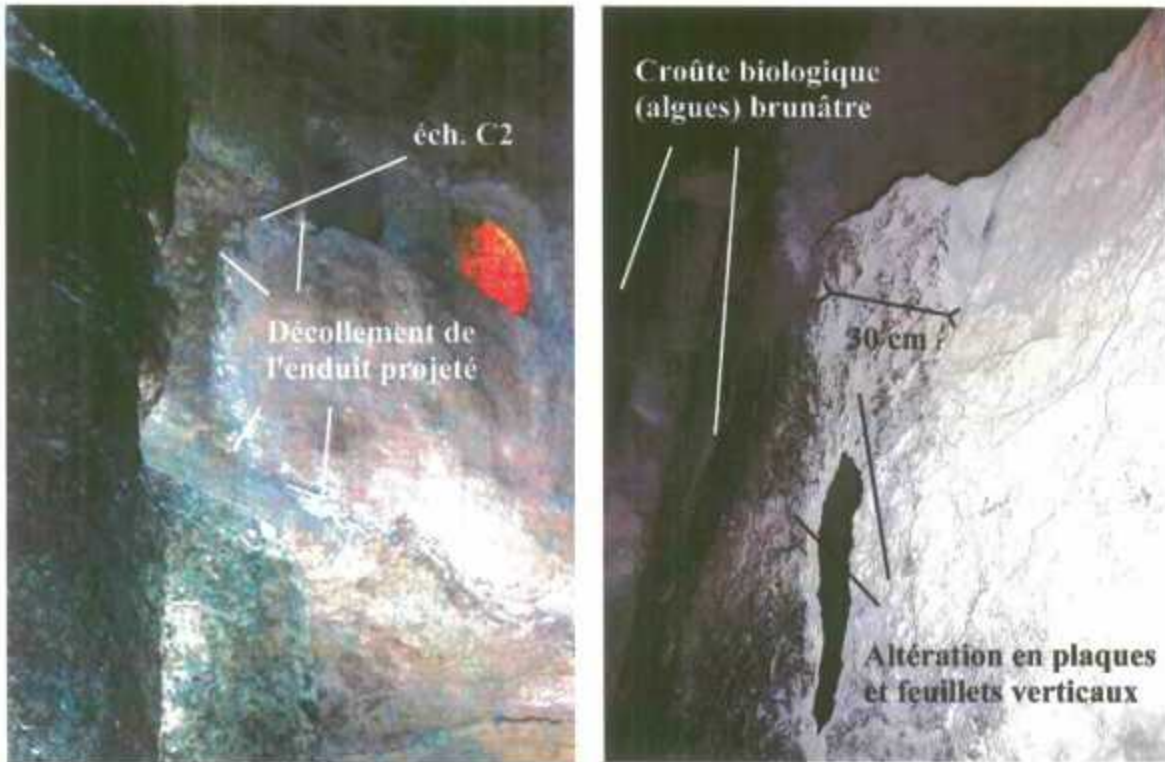
⋮

Enduit projeté beige depuis 4 m de haut jusqu'à environ 14 m, dans une zone présentant un retrait par rapport à la paroi d'origine de 0,1 à 0,3m ; enduit en décollement notable au dessus de la "fenêtre" ; recouvrement biologique brunâtre en partie basale ; altération en plaques et feuilletts verticaux importante à l'aplomb de la "fenêtre".

Prélèvement d'un échantillon C2 de l'enduit projeté (localisation : cf. plan du sol et photo).



Photos 18 et 19 - Eglise médiévale - Façade sud (angle ouest) - Croûte biologique noirâtre recouvrant le pilier et la base de la façade - Enduit projeté en décollement - Importante altération en plaques et feuilletts verticaux sous la fenêtre communiquant avec l'église primitive.



Photos 20 à 21 - Eglise médiévale - Façade sud (angle ouest) - Croûte biologique noirâtre recouvrant le pilier et la base de la façade - Enduit projeté en décollement - Importante altération en plaques et feuillets verticaux sous la fenêtre communiquant avec l'église primitive.

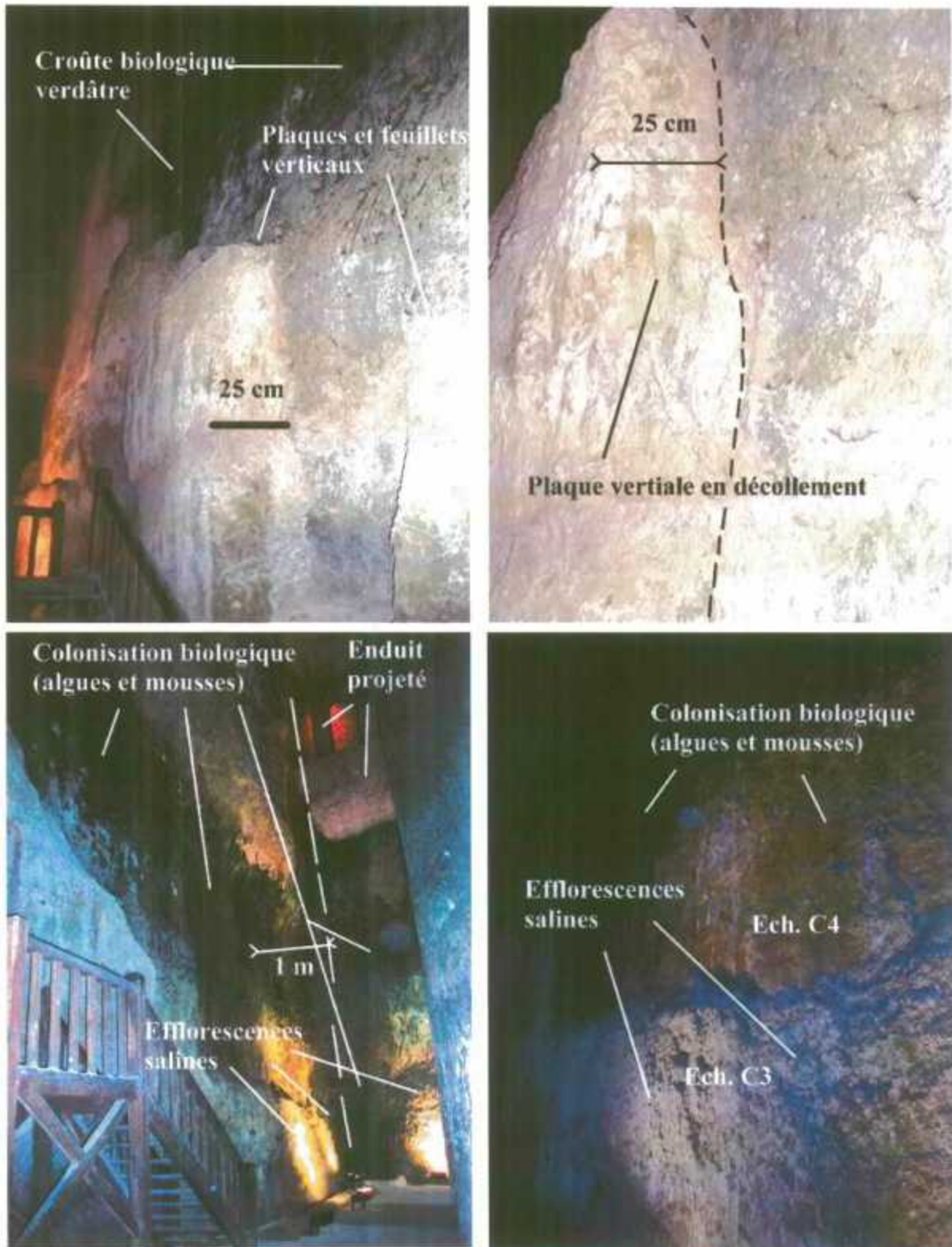
C.V. 3 - Eglise médiévale - Façade ouest et angle nord ouest (cf. photos 22 à 25) :

Développement biologique d'algues et mousses verdâtres particulièrement développée dans l'angle nord ouest depuis le sol (49 m NGF) jusqu'à la base du triforium correspondant à une zone de ruissellement continu d'eau (résurgence de la source ?) ; présence d'altérations en plaques millimétriques (feuillets) à pluridécimétriques dans la partie basale en "relief" de la façade ; recouvrement d'algues dans les niveaux en recul (atteignant 1 m) vers 8 m de hauteur ; efflorescences salines centimétriques en partie basale face aux projecteurs.

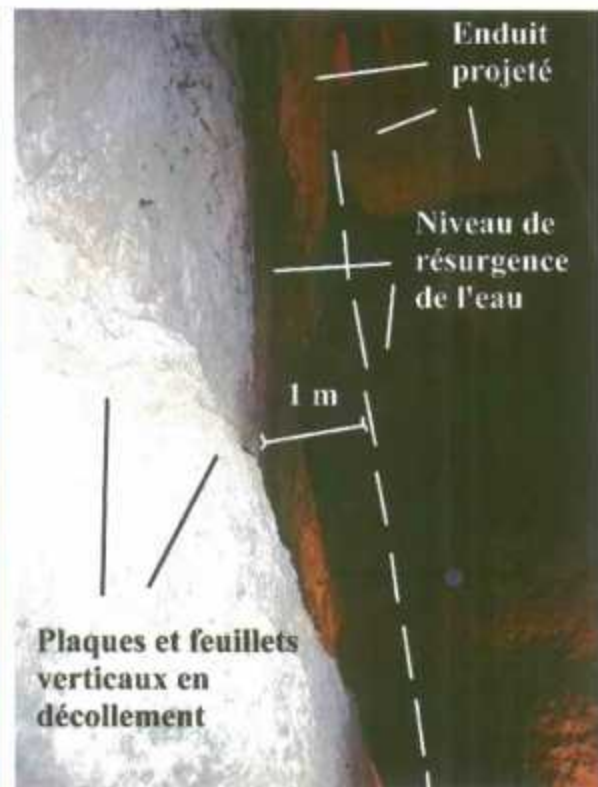
Prélèvement d'un échantillon C3 d'efflorescence saline (localisation : cf. plan du sol et photo).

Prélèvement d'un échantillon C4 de croûte verdâtre (localisation : cf. plan du sol et photo).

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte
d'Aubeterre sur Dronne (16)



Photos 22 à 25 - Eglise médiévale - Façade ouest - Plaques en décollement en partie basale - Colonisation biologique très importante en partie intermédiaire (recul maximum de la paroi = 1 m).



Photos 26 à 28 - Eglise médiévale - Angle Nord Ouest - Plaques en décollement en partie basale Colonisation biologique très importante en partie intermédiaire (recul maximum de la paroi = 1 m) correspondant à un niveau actuel de résurgence d'eau (source ?).

C.V. 4 - Eglise médiévale - Abside (cf. photos 29 à 31) :

Retrait de la paroi d'environ 20 cm au niveau des zones de remontée capillaire, sur une hauteur de 1 m à 1,50 m ; recouvrement biologique dans les niveaux en creux, actif côté ouest et fossile côté nord et est ; altération en plaques et feuilletés des niveaux en relief ; avec croûte beige en écaillage plus ou moins boursouflée, et désagrégation sableuse dans les zones où la croûte a déjà disparu ; voûte de l'abside avec croûte beige en écaillage, plus ou moins recouverte d'algues vertes.

Prélèvement d'un échantillon C6 de croûte beige (localisation : cf. plan du sol).



Photos 29 & 30 – Eglise médiévale - Abside - Recouvrement biologique verdâtre (algues) actif côté ouest et "fossile" côté est - Alternance de niveaux en creux (à recouvrement biologique) et en "relief" (à altération en plaques et feuilletés).



Photo 31 - Eglise médiévale - Abside - Recouvrement biologique verdâtre (algues) "fossile" côté est - Niveau en "relief" (à altération en plaques et feuillets).

C.V. 5 - Eglise médiévale - Piliers centraux (cf. photos 32 à 36) :

Parties basale et intermédiaires à état de surface bien conservé, à recouvrement biologique d'algues brunâtres ; partie sommitale blanchâtre présentant une altération marquée en feuillets et désagrégation sableuse, ainsi que fragments de croûte beige en cours d'écaillage, à recouvrement local d'algues vertes ; altération en plaques "fossile" au niveau du pied de chaque pilier.



Photos 32 à 34 – Eglise médiévale - Piliers "centraux"- Partie basale et intermédiaire à surface bien conservée - Partie sommitale à altération en feuillets et désagrégation sableuse - Présence d'une croûte résiduelle beige en cours d'écaillage.

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte
d'Aubeterre sur Dronne (16)



Photos 35 & 36 - Eglise médiévale - Piliers "centraux"- Partie intermédiaire à surface bien conservée - Zone de remontée capillaire avec altération en plaque "fossile".



C.V. 6 - Eglise médiévale - Façade est maçonnée (cf. photos 37 à 39) :

Maçonnerie en moellons taillées ; alvéolisation plus ou moins marquée et désagrégation sableuse, mettant en relief les parties indurées de la pierre (coquilles en particulier) ; présence localement d'une croûte brunâtre résiduelle à recouvrement d'algues ; dans l'angle sud est, zone "fossile" de ruissellement d'eau depuis le triforium, semblant avoir été stoppée depuis l'application d'enduit projeté en partie supérieure de la façade sud.

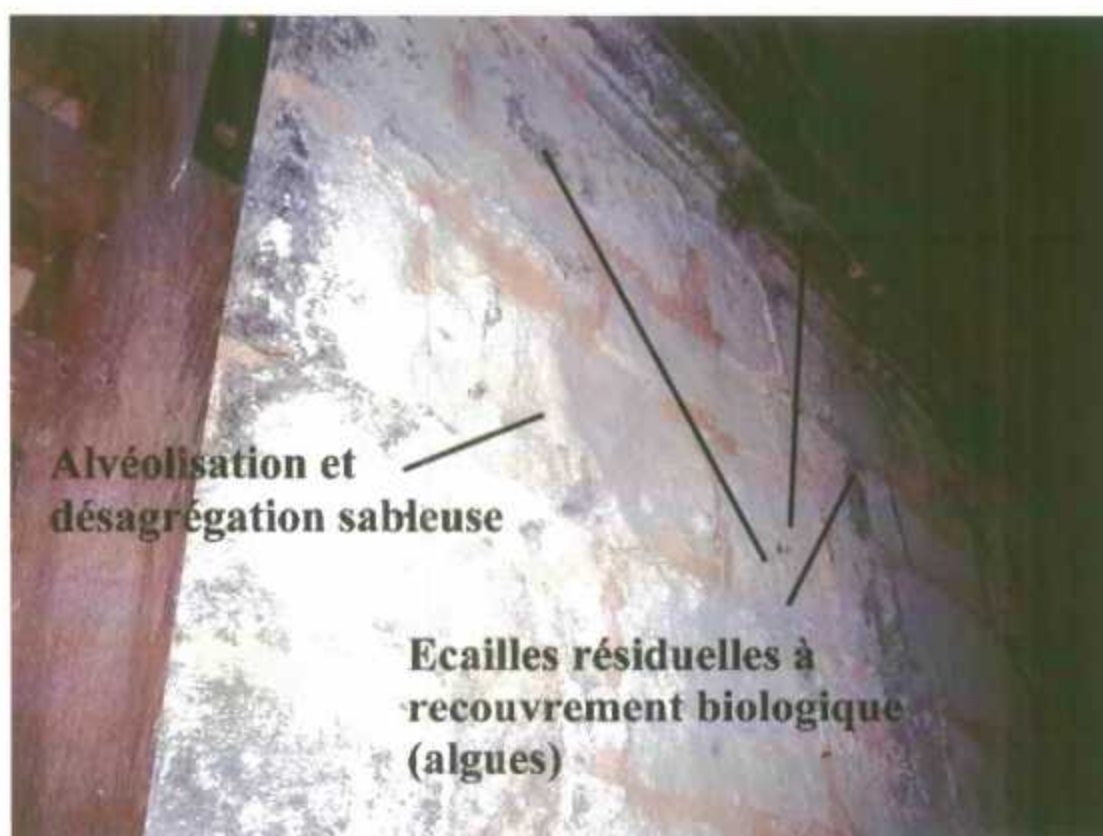
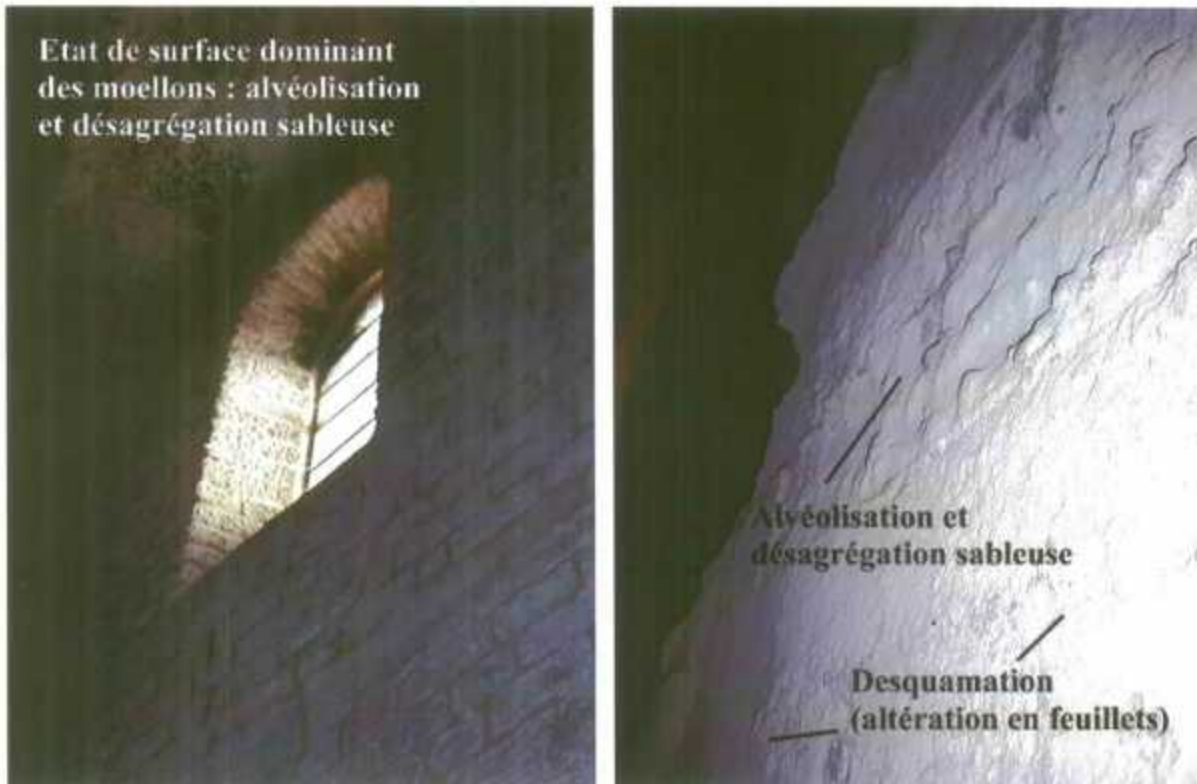


Photo 37 - Eglise médiévale - Façade est maçonnée : moellons à altération par désagrégation sableuse et alvéolisation - Présence de résidus de croûte brunâtre en cours d'écaillage, à recouvrement biologique (algues)



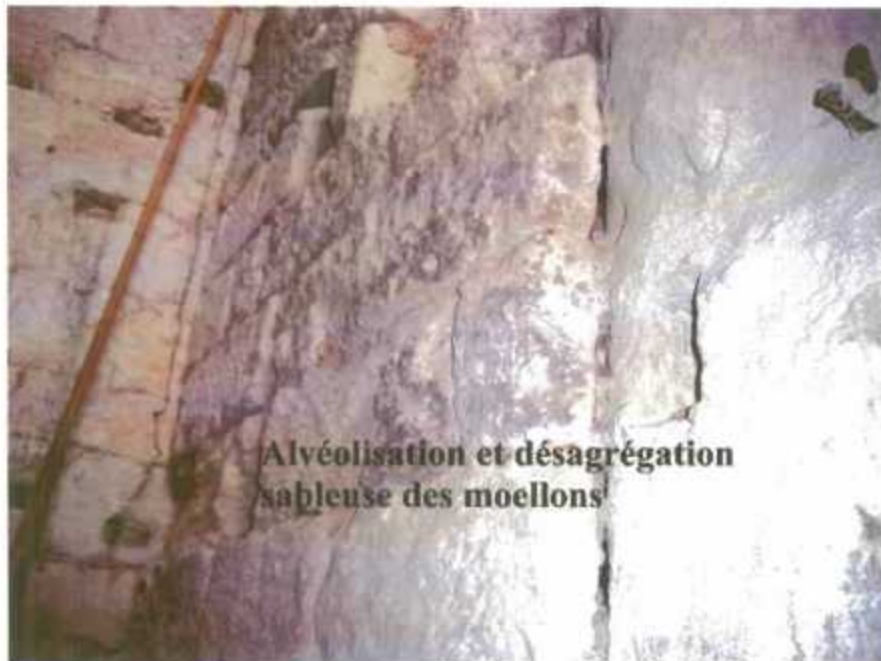
Photos 38 & 39 - Eglise médiévale - Façade Est maçonnée : moellons à altération par désagrégation sableuse et alvéolisation - Présence de résidus de croûte brunâtre en cours d'écaillage, à recouvrement biologique (algues)

C.V. 7 - Eglise médiévale - Galerie d'accès sud (cf. photos 40 à 42) :

Voûte à croûte noire en décollement - Désagrégation sableuse dans les zones "décollées"
- Alvéolisation des moellons et de la paroi naturelle.

Prélèvement d'un échantillon C7 de croûte noire (localisation : cf. plan du sol et photo).

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte
d'Aubeterre sur Dronne (16)



Photos 40 à 42 - Eglise médiévale - Façade Est - Galerie d'accès sud - Voûte à croûte noire en décollement - Désagrégation sableuse dans les zones "décollées" - Alvéolisation des moellons et de la paroi naturelle.

C.V. 8 - Eglise médiévale – transept nord (cf. photos 43 & 44) :

Voûte à croûte beige en décollement - Désagrégation sableuse dans les zones "décollées" - Recouvrement d'algues dans les zones plus humides (paroi et voûte côté nord) ; morceau de mur maçonné côté sud à nombreux blocs en alvéolisation et désagrégation sableuse.

Prélèvement d'un échantillon C8 de croûte beige (localisation : cf. plan du sol et photo).



Photo 43 - Eglise médiévale - Façade Est - Transept nord - Voûte à croûte beige en décollement - Désagrégation sableuse dans les zones "décollées" - Recouvrement d'algues dans les zones plus humides (paroi et voûte côté nord).

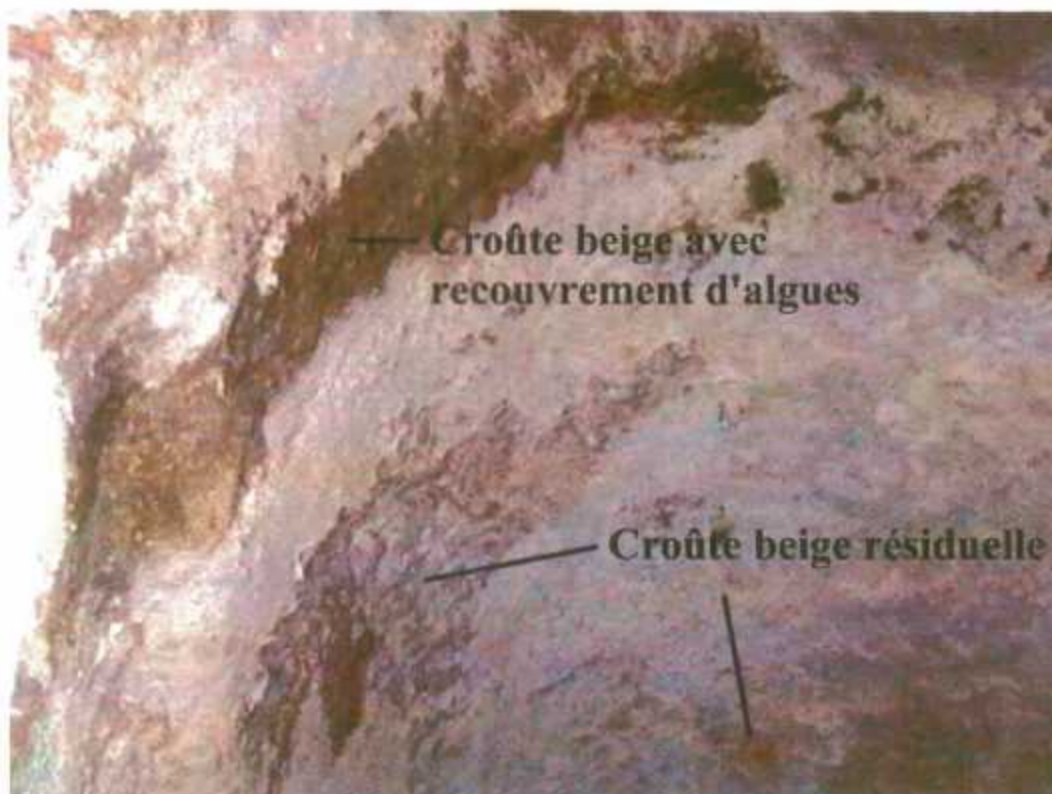
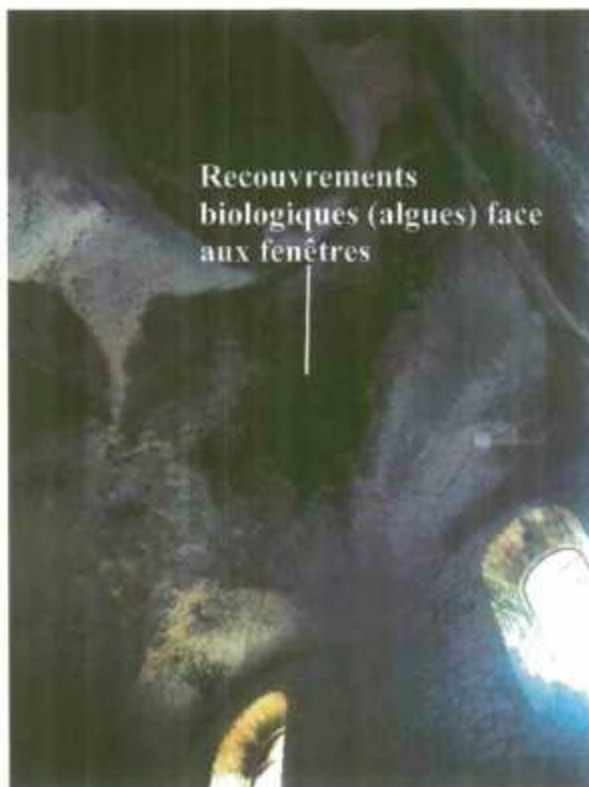
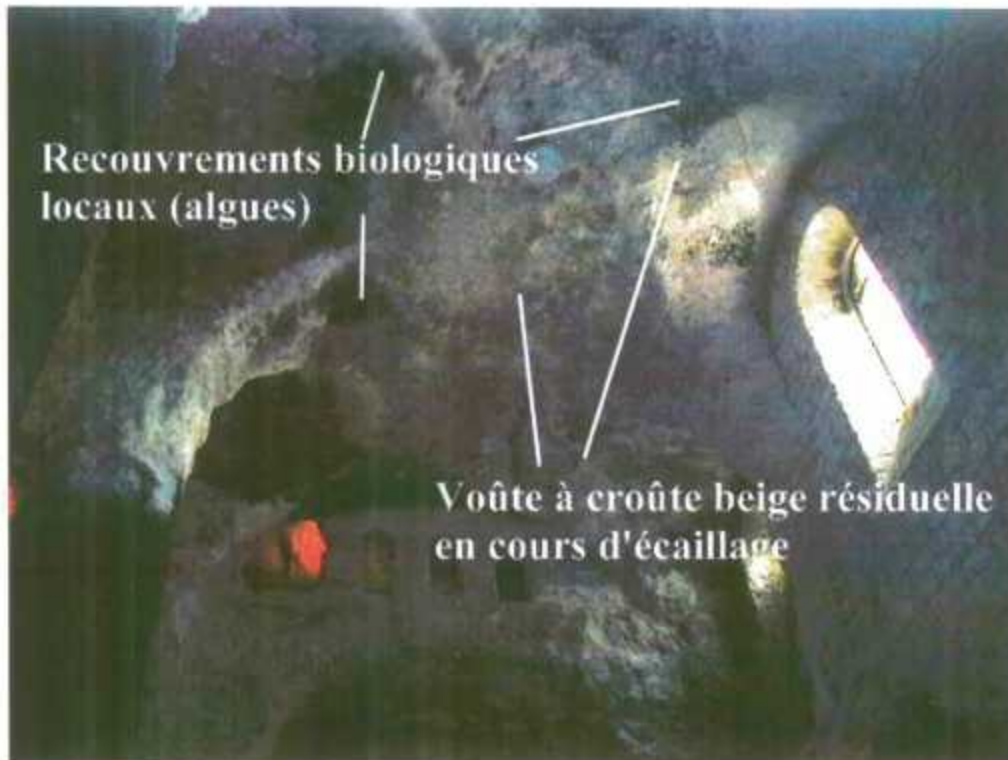


Photo 44 - Eglise médiévale - Façade Est - Transept nord - Voûte à croûte beige en décollement - Désagrégation sableuse dans les zones "décollées" - Recouvrement d'algues dans les zones plus humides (paroi et voûte côté nord).

C.V. 9 - Eglise médiévale - Voûte centrale (cf. photos 45 & 46) :

Croûte beige résiduelle en cours d'écaillage et désagrégation sableuse dans les zones "décollées" - Recouvrements biologiques locaux, en particulier face aux fenêtres.



Photos 45 et 46 - Eglise médiévale - Voûte - Croûte beige résiduelle en cours d'écaillage et désagrégation sableuse dans les zones "décollées" - Recouvrements biologiques locaux, en particulier face aux fenêtres.

C.V. 10 - Eglise médiévale - Triforium (cf. photos 47 à 50) :

Draperies "fossiles" (en particulier côté sud) et "actives" (en particulier côté ouest) - Croûtes grises "boursoflées" (côtés sud et nord) - Efflorescences blanchâtres "poudreuses" (côtés sud et ouest) ; piliers intérieurs recouverts d'enduit projeté ; parois sud et nord à aspect général "sec" ; paroi ouest à aspect général "humide" avec ruissellements locaux.

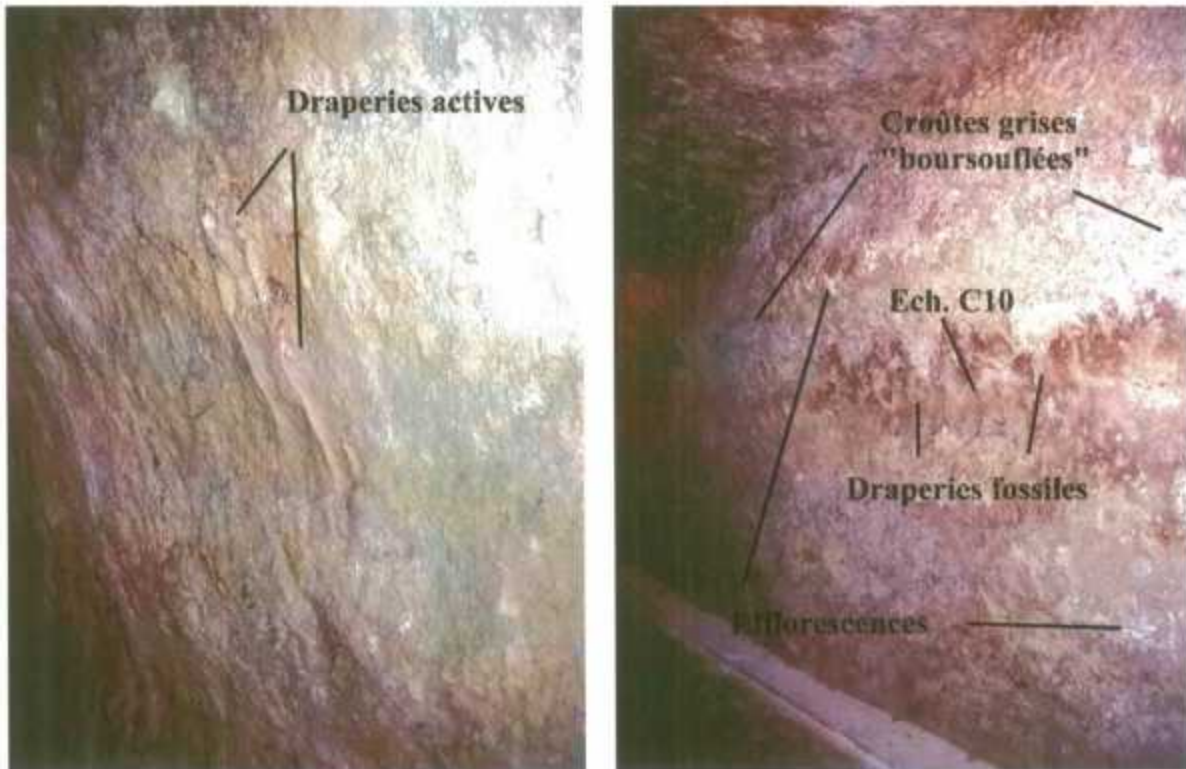
Prélèvement d'un échantillon C10 de draperie fossile (localisation : cf. photo).

Prélèvement d'un échantillon C11 de croûte grise "boursoflée" (localisation : cf. photo).

Prélèvement d'un échantillon C12 d'efflorescence "poudreuse" blanche (localisation : cf. photo).



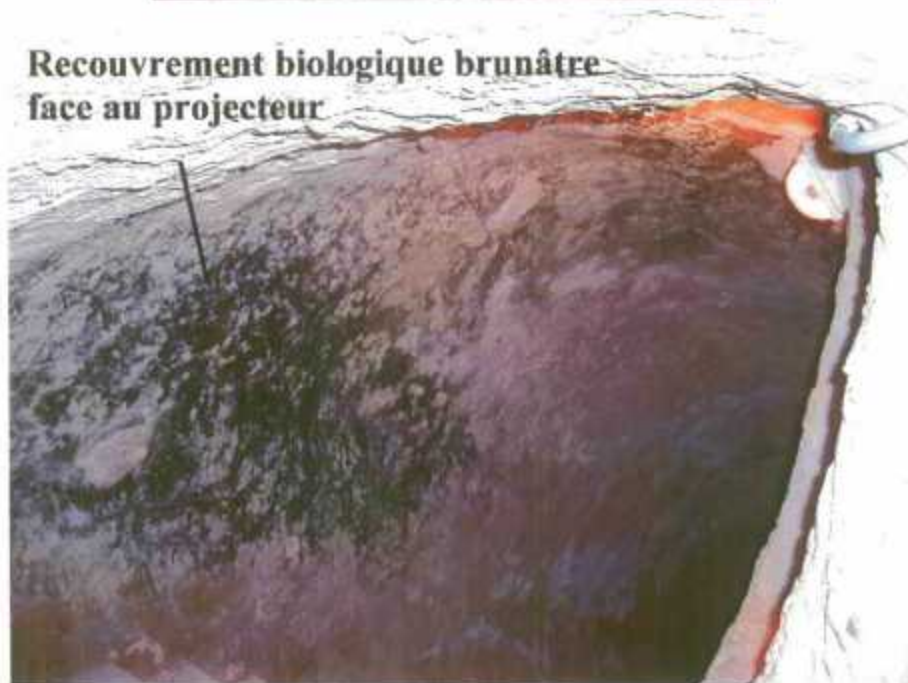
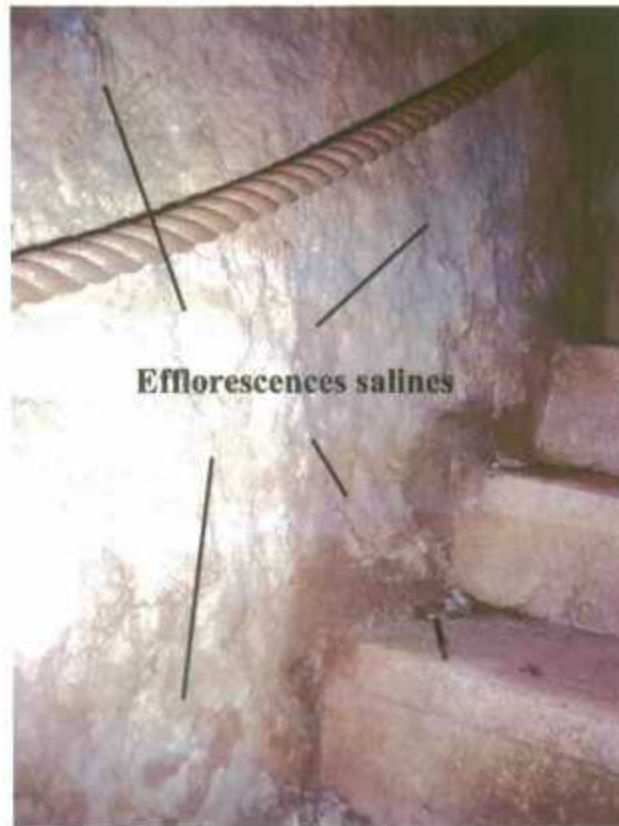
Photos 47 et 48 - Eglise médiévale - Triforium - Croûtes grises "boursoflées" - Efflorescences blanchâtres "poudreuses".



Photos 49 et 50 - Eglise médiévale - Triforium - Draperies "fossiles" et actives - Croûtes grises "boursouflées" - Efflorescences blanchâtres "poudreuses".

C.V. 11 - Eglise médiévale - Escalier d'accès au triforium (cf. photos 51 & 52) :

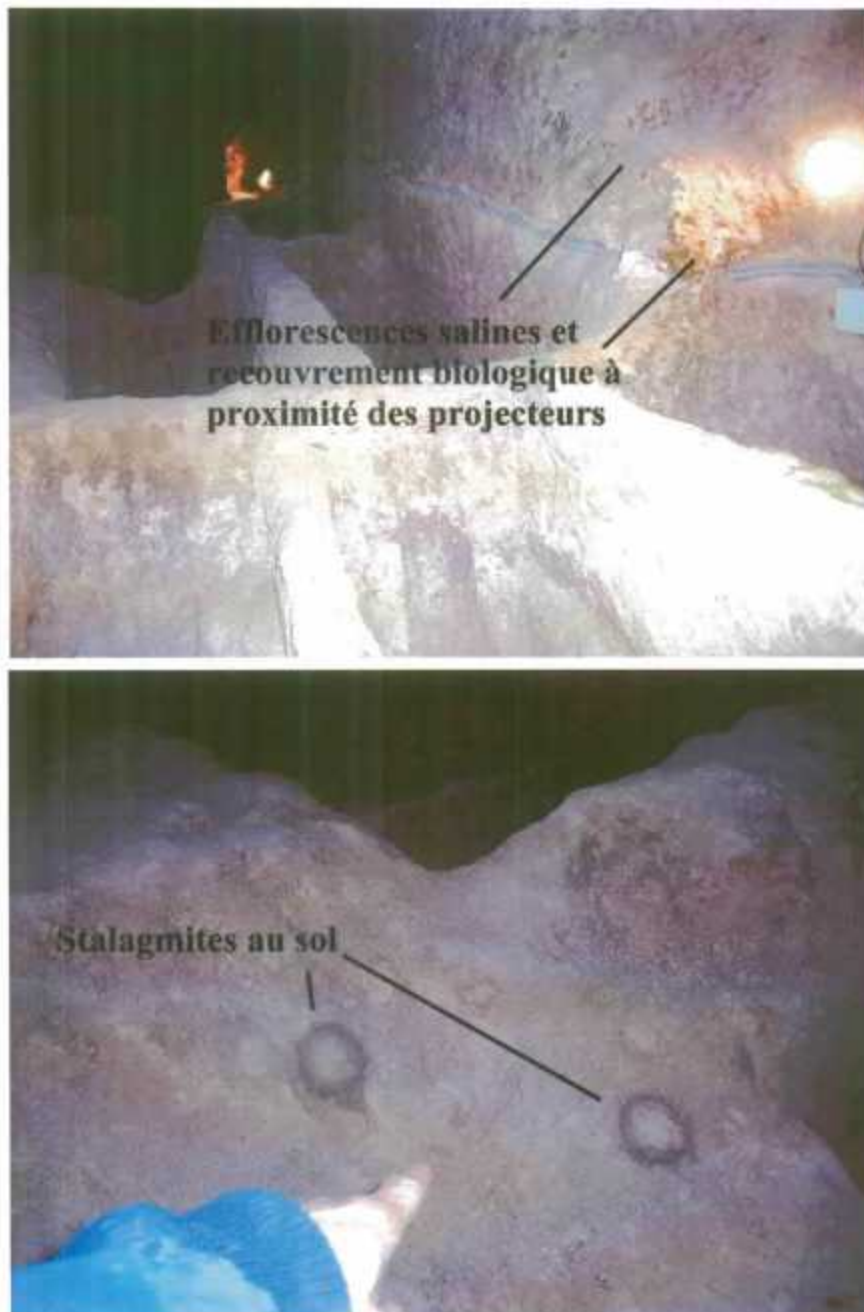
Efflorescences blanchâtre et recouvrement biologique brunâtre (algues) à proximité des projecteurs.



Photos 51 et 52 - Eglise médiévale - Escalier d'accès au triforium - Efflorescences et recouvrement biologique à proximité des projecteurs.

C.V. 12 - Eglise primitive (cf. photos 53 à 57) :

Efflorescences et recouvrement biologique à proximité des projecteurs - Stalagmite dans l'angle sud ouest.

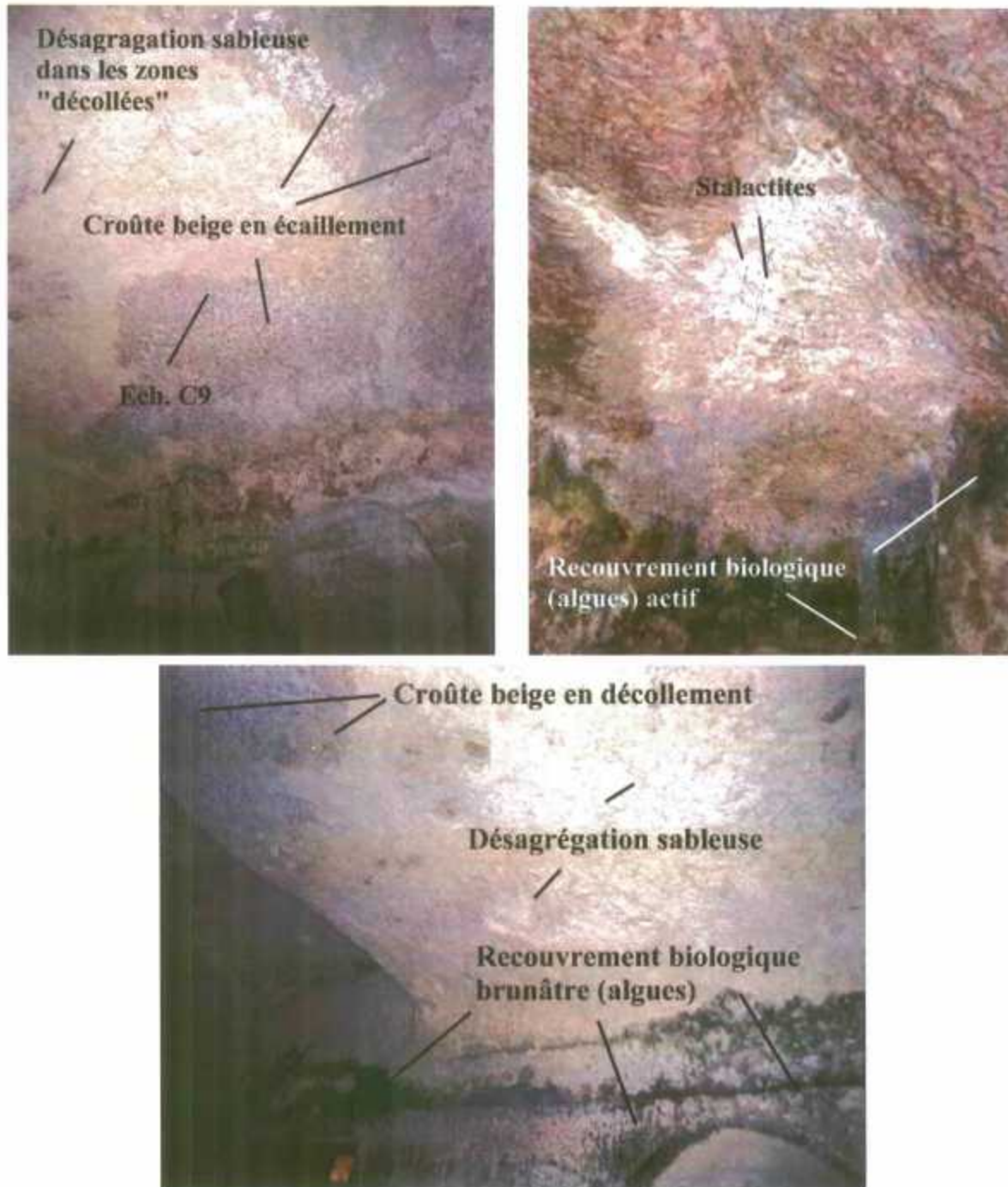


Photos 53 & 54 - Eglise primitive - Efflorescences et recouvrement biologique à proximité des projecteurs - Stalagmite dans l'angle sud ouest.

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte
d'Aubeterre sur Dronne (16)

Croûte en décollement et désagrégation sableuse au niveau de la voûte - Recouvrement biologique actif dans la partie ouest - Stalactites dans l'angle sud ouest

Prélèvement d'un échantillon C9 de croûte beige (localisation : cf. photo).



Photos 55 à 57 - Eglise primitive - Croûte en décollement et désagrégation sableuse au niveau de la voûte - Recouvrement biologique actif dans la partie ouest - Stalactites dans l'angle sud ouest.

5.1.2 Analyse des échantillons de "croûtes"

L'identification et l'estimation semi-quantitative des minéraux constitutifs des 12 échantillons de croûtes prélevés dans l'église ont été effectuées par diffractométrie des rayons X sur roche, suivant le mode opératoire BRGM MO 101 « Identification des minéraux isolés, des roches et des phases argileuses par diffractométrie des rayons X et micro-diffraction Debye-Scherrer ».

L'appareillage utilisé est un diffractomètre SIEMENS D5000 couplé à un logiciel de traitement des données DIFFRAC AT. L'estimation d'abondance des minéraux constitutifs est basée sur une appréciation visuelle, à partir des hauteurs de pics.

Les résultats d'analyses sont présentés dans le tableau 1.

Référence Echantillon	Analyse minéralogique par Diffractométrie des rayons X
C1	Calcite (CaCO ₃) présente / Bassanite (CaSO₄.1/2H₂O) présente Quartz (SiO ₂) en infra traces / Microcline (KAlSi ₃ O ₈) en infra traces
C2	Calcite (CaCO ₃) présente / Quartz (SiO ₂) faible Microcline (KAlSi ₃ O ₈) en infra traces
C3	Calcite (CaCO ₃) présente / Bassanite (CaSO₄.1/2H₂O) présente Quartz (SiO ₂) en infra traces / Thénardite (Na₂SO₄) en traces
C4	Calcite (CaCO ₃) présente / Bassanite (CaSO₄.1/2H₂O) présente Quartz (SiO ₂) en infra traces
C6	Calcite (CaCO ₃) présente / Bassanite (CaSO₄.1/2H₂O) présente
C7	Calcite (CaCO ₃) présente / Bassanite (CaSO₄.1/2H₂O) présente Quartz (SiO ₂) en infra traces
C8	Calcite (CaCO ₃) présente / Bassanite (CaSO₄.1/2H₂O) présente Quartz (SiO ₂) en infra traces
C9	Calcite (CaCO ₃) présente / Bassanite (CaSO₄.1/2H₂O) présente Quartz (SiO ₂) en infra traces
C10	Calcite (CaCO ₃) abondante / Quartz (SiO ₂) en infra traces
C11	Calcite (CaCO ₃) présente / Bassanite (CaSO₄.1/2H₂O) présente Quartz (SiO ₂) en infra traces
C12	Calcite (CaCO ₃) présente / Gypse (CaSO₄.2H₂O) présent Quartz (SiO ₂) en infra traces
C13	Calcite (CaCO ₃) présente / Quartz (SiO ₂) en infra traces Microcline (KAlSi ₃ O ₈) en infra traces / Albite (NaAlSi ₃ O ₈) en infra traces

Tab. 2 - Analyse minéralogique d'échantillons de croûtes prélevés dans l'église.

Sur la base de l'échantillonnage réalisé, on constate que les croûtes renferment dans une grande majorité, des sels néoformés. Il s'agit de 3 types de sulfates : bassanite dans la majorité des cas, gypse et thénardite plus ponctuellement. La présence de chlorures est également probable, mais pas mis en évidence par diffractométrie des rayons X, du fait d'une teneur insuffisante.

L'hémihydrate (bassanite) ne peut se former qu'à des températures de l'ordre de 130° à 150 °C, et sa présence dans les croûtes ne peut donc s'expliquer que par une origine anthropique : l'hypothèse la plus probable est qu'il soit constitutif d'un badigeon, appliqué à un moment donné sur les parois. Une analyse chimique multiéléments par ICP sur les échantillons de croûte a mis en évidence des teneurs anormales en zinc et strontium, semblant confirmer cette hypothèse de présence d'un badigeon résiduel.

5.1.3 Synthèse des résultats : typologie des altérations

L'église souterraine monolithe d'Aubeterre concentre sur un même édifice, les principaux types d'altérations habituellement observés sur les pierres des monuments.

5.1.3.1 Les dissolutions

Elles se développent classiquement dans les pierres calcaires, dans les zones exposées à des lessivages et sont d'autant plus rapides que les eaux sont plus acides. Il s'agit d'un mécanisme chimique sensu stricto. Dans le cas d'Aubeterre, elles sont généralisées dans les zones à alimentation importante (active ou fossile) en eau. Leur effet est bien observable et particulièrement dommageable dans certaines zones telles que :

- L'angle nord ouest de l'église médiévale = recul de la paroi de 1 m, en partie intermédiaire (alimentation en eau active).
- L'angle sud est de l'église médiévale = recul de la paroi d'environ 30 cm, à la base des fenêtres du triforium (alimentation en eau active).
- La partie intermédiaire du triforium (alimentation en eau semblant inactive actuellement).

5.1.3.2 Les altérations liées à des concentrations de sels

Suivant les conditions d'exposition de la pierre, on observe dans l'église 3 principaux types d'altérations de structures et morphologies différentes :

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte d'Aubeterre sur Dronne (16)

- Les **encroûtements** (croûtes noires ou beiges) sont observables dans les zones à l'abri des lessivages, générées lors de l'évaporation des solutions, et formées de l'agrégation de sels solubles (majoritairement bassanite d'un badigeon ?) et de calcite. Dans le cas d'Aubeterre, ils sont présents en surface en particulier des voûtes des églises médiévale et primitive, et majoritairement en cours d'écaillage.
- Les **altérations en plaques et feuilletés (desquamations)**, générées par des cycles répétés d'imbibition / séchage, avec en particulier les décollements résultant de dilatations de solution contenant des sels peu solubles. Les altérations en plaques sont particulièrement importantes en parties basses de l'église médiévale (zones de remontée capillaire).
- Les **désagréments sableux et alvéolisations** sont dues à la cristallisation de sels très solubles sous la surface, provoquant le dessertissage des grains, dans des zones humides mais "protégées" des cycles d'imbibition / séchage.

5.1.3.3 Les altérations biologiques

Elles sont liées à la présence de bactéries, végétaux et lichens, et génèrent des dégradations (biodétériorations) moins dommageables que les mécanismes physico-chimiques précédemment décrits.

Leur impact visuel est néanmoins particulièrement important dans l'église d'Aubeterre et à ce titre pénalisant pour l'esthétique de l'édifice : il s'agit de mousses vertes dans la zone à important ruissellement en partie nord ouest de l'église médiévale, mais en majorité, il s'agit d'algues vertes ou brunes très phototropes, et se développant donc préférentiellement dans les zones éclairées naturellement mais surtout artificiellement (face aux projecteurs).

En 1999, sur l'instigation de l'Architecte en chef des Monuments Historiques, un essai de traitement algicide a été effectué sur la base du pilier nord ; celui-ci a donné de bons résultats (disparition des algues au niveau de la zone traitée).

5.2 CARACTERISATION DES PIERRES

5.2.1 Echantillonnage

L'échantillonnage des pierres constitutives de l'église souterraine a été réalisé par carottage, au moyen d'une carotteuse portative munie d'un carottier de diamètre intérieur Ø40mm.

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte d'Aubeterre sur Dronne (16)

Au total, 17 échantillons ont ainsi été prélevés dans différentes zones et à différentes hauteurs de l'église médiévale, afin de disposer d'un échantillonnage le plus large possible, en terme de "types" de pierres constitutives.

Le tableau 3 donne une liste des échantillons prélevés, leur localisation approximative dans l'édifice, ainsi que leur cote.

Les 11 échantillons référencés G1 à G12 ont été prélevés en couvrant les 3 côtés du triforium (G1 à G5), puis en descendant l'escalier d'accès à ce dernier (G6 à G11), jusqu'à la base de l'entrée de l'escalier (G12).

Les 6 échantillons référencés E1 à E6 ont été prélevés sur la face ouest du pilier nord depuis son assise (E1) jusqu'à la base de son chapiteau (E6).

Référence Echantillon	Localisation sommaire	Cote NGF (m)
G1	Triforium - côté sud	63,60
G2	Triforium - côté ouest	63,60
G3	Triforium - côté nord	63,60
G5	Triforium - côté ouest	62,10
G6	Escalier d'accès au triforium	60,50
G7	Escalier d'accès au triforium	59,00
G8	Escalier d'accès au triforium	57,50
G9	Escalier d'accès au triforium	55,50
G10	Escalier d'accès au triforium	53,60
G11	Escalier d'accès au triforium	51,60
G12	Façade ouest	49,60
E1	Pilier nord	49,50
E2	Pilier nord	51,00
E3	Pilier nord	52,70
E4	Pilier nord	55,30
E5	Pilier nord	58,30
E6	Pilier nord	60,50

Tab. 3 - Echantillonnage des pierres constitutives de l'église médiévale

La localisation précise des échantillons de roche prélevés est reportée sur les plans de coupes joints en annexe 4.

5.2.2 Procédure analytique appliquée

Les échantillons précédents ont fait l'objet en totalité ou en partie de la procédure d'analyse détaillée ci-après.

5.2.2.1 Etude pétrographique

La description pétrographique de chaque pierre est basée sur :

- Un examen macroscopique direct et sous loupe binoculaire (grossissement x10).
- Une étude sur lames minces au moyen d'un microscope optique polarisant OLYMPUS BH2 (grossissement x100 à x400) couplé à une caméra CCD SONY et système d'acquisition d'image OLYMPUS Pégase.

La **définition pétrographique** de chaque pierre est ensuite effectuée en utilisant les classifications usuelles des roches sédimentaires.

En outre, la teneur en calcite de chaque pierre est déterminée conformément aux spécifications de la norme NF ISO 10693 « Qualité du sol - Détermination de la teneur en carbonate - Méthode volumétrique » de juin 1995.

5.2.2.2 Caractérisation du milieu poreux

Le milieu poreux d'une pierre correspond à l'ensemble de ses espaces vides, limités par ses éléments minéraux constitutifs. La caractérisation du milieu poreux est effectuée au moyen de diverses méthodes qualitatives et quantitatives, directes et indirectes, complémentaires.

⇒ La **porosité totale** d'une pierre (notée N_t et exprimée en %) représente le volume total des espaces poreux rapporté au volume total de la roche :

$$N_t (\%) = 100 \cdot (V_v / V_t)$$

avec : V_v : volume des espaces poreux
 V_t : volume total de l'échantillon

Il s'agit d'un paramètre global ne fournissant pas d'information qualitative, mais permettant d'apprécier rapidement le remplissage maximum, c'est-à-dire l'**importance quantitative du milieu poreux** d'une pierre donnée. En général, les calcaires les plus poreux sont les plus sensibles à l'eau et les moins résistants.

La mesure de porosité totale de chaque pierre est réalisée suivant la norme NF B 10-503 « Produits de carrières - Pierres calcaires - Mesures de la porosité, de la masse volumique réelle et de la masse volumique apparente » d'août 1973. Dans cet essai, l'échantillon de pierre est saturé en eau par imbibition capillaire sous vide (régime monophasique).

⇒ La **porosimétrie au mercure** fournit le **spectre de porosité de la pierre** et rend compte de la distribution volumique des pores en fonction de leur dimension (rayon

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte
d'Aubeterre sur Dronne (16)

d'accès). Cet essai vient compléter la mesure de la porosité totale en quantifiant de manière continue le milieu poreux d'une pierre.

L'essai porosimétrique repose sur l'injection progressive de mercure dans les pores d'un échantillon initialement placé dans une enceinte sous vide. Le mercure étant un liquide non mouillant, toute augmentation de la quantité de mercure liquide dans les pores de l'échantillon nécessite l'application d'une pression plus élevée. La quantité de mercure injectée dépend, à une pression donnée, de la taille des pores et plus précisément de leur accès.

L'envahissement progressif du réseau poreux par le mercure sous pression croissante, répond à la **loi de Laplace** :

$$P = 2 \cdot \sigma \cdot \cos\theta / R$$

avec : σ : tension superficielle du mercure
 θ : angle de contact mercure - minéral
 R : rayon d'accès aux pores
 P : pression d'injection

Le mercure envahit progressivement tous les espaces poreux contrôlés par un rayon d'accès R. Le degré de saturation en mercure du milieu poreux est donc d'autant plus grand (proche de 100 %) que la pression appliquée est plus élevée.

Les mesures sur pierre sont réalisées suivant le mode opératoire BRGM MO 049 « Porosimétrie au mercure ». L'appareillage utilisé est un porosimètre à mercure CARLO ERBA - Porosimeter 2000, travaillant en fonctionnement automatique sur une gamme de pression d'injection de 0,01 à 200 MPa, couplé à un logiciel de traitement des données MILESTONE 200.

En pratique, l'essai porosimétrique permet de mesurer une **porosité totale accessible au mercure**, et d'obtenir un **histogramme de distribution de la porosité accessible au mercure en fonction des rayons d'accès de pores**, compris entre 75 μm et 3,7 nm.

Les fractions du spectre de porosité accessible par la porosimétrie au mercure sont la **macroporosité** (pores de rayon d'accès compris entre 75 et 7,5 μm) et la **microporosité** (pores de rayon d'accès compris entre 7,5 μm et 3,7 nm).

Il permet également de mettre en évidence certaines caractéristiques morphométriques du milieu poreux comme l'existence et la valeur d'un rayon d'interconnexion (seuil de percolation), intervenant en particulier dans l'absorption d'eau par capillarité.

Enfin, la porosimétrie au mercure permet au moyen d'un modèle géométrique de pores représentant au mieux la morphologie du milieu poreux étudié, d'en estimer la **surface spécifique** (notée S_{Hg} et exprimée en m^2/g). Cette dernière est généralement sous-estimée par rapport à la surface spécifique expérimentale déterminée par des méthodes

basées sur l'adsorption physique de gaz (azote, krypton) qui donnent des résultats plus justes.

5.2.2.3 Propriétés de stockage des fluides

Les propriétés de stockage d'eau des pierres sont appréciées en mesurant leur **porosité à 48 heures** et leur **coefficient d'absorption d'eau**.

La **porosité à 48 heures** d'une pierre (notée N_{48} et exprimée en %) représente le volume des pores accessibles à pression atmosphérique rapporté au volume total de la roche :

$$N_{48} (\%) = 100 \cdot (V_{48} / V_t)$$

avec : V_{48} : volume des pores accessibles à pression atmosphérique
 V_t : volume total de l'échantillon

La porosité à 48 heures est déterminée à partir d'un essai d'imbibition progressive d'eau en présence d'air (régime biphasique), à pression atmosphérique, pendant 48 heures. Elle donne une bonne approximation de la **porosité libre** d'un échantillon.

La porosité à 48 heures est toujours inférieure à la porosité totale : cette différence est assimilée à la **porosité piégée**, et correspond à la fraction de porosité totale occupée par le fluide le moins mouillant (air) lors de l'imbibition en régime biphasique.

En pratique, la détermination de la porosité à 48 heures permet d'apprécier la fraction du volume poreux total d'une pierre, réellement impliquée dans les processus de transfert d'eau liquide dans les conditions naturelles.

Le **coefficient d'absorption d'eau** (noté S_{48} et exprimé en %) ou degré de saturation naturel ou coefficient d'Hirschwald correspond à la porosité à 48 heures rapportée à la porosité totale de la roche :

$$S_{48} (\%) = 100 \cdot (N_{48} / N_t)$$

Le coefficient d'absorption d'eau d'une roche à la pression atmosphérique, donne une bonne estimation de la saturation maximale atteinte en milieu naturel, que les apports hydriques soient d'origine pluviale, ou proviennent de ruissellement ou de remontées capillaires.

Ce degré de saturation est lié directement à la nature de la roche et en particulier aux caractéristiques de son milieu poreux.

Les mesures de porosité à 48 heures et du coefficient d'absorption d'eau de chaque pierre sont réalisées suivant la norme NF B 10-504 « Produits de carrières - Pierres calcaires - Mesure du coefficient d'absorption d'eau » d'août 1973.

5.2.2.4 Mesure de la perméabilité à l'eau

La perméabilité définit l'aptitude d'une roche à laisser circuler les fluides contenus dans sa porosité. Sa mesure fournit des informations sur la morphologie du milieu poreux et en particulier sur la tortuosité et la connectivité des pores.

La mesure de perméabilité consiste à mettre en contact l'une des faces de éprouvette avec un gaz (*azote*) ou un liquide (*eau*), sous une pression connue et constante.

Le pourtour de l'éprouvette est étanchéifié au moyen d'une pression de confinement. On mesure alors le débit du fluide à la sortie de la deuxième face de l'échantillon.

La perméabilité à l'eau k_w est calculée en appliquant la loi de DARCY :

$$k = \frac{Q}{S} \times \eta \times \frac{L}{(p_1 - p_2)}$$

avec : k : perméabilité intrinsèque à l'eau (Da)

η : viscosité de l'eau (1 cPo)

Q : débit volumique de sortie du fluide (cm³/s)

P_1, P_2 : pression d'injection et de sortie du fluide (atm)

L : longueur de l'éprouvette (cm)

S : section de l'éprouvette (cm²)

On notera que cette approche s'applique à la roche massive. Toute discontinuité conduit à une modification de la perméabilité.

5.2.2.5 Résistance mécanique

De manière générale, la résistance mécanique d'une pierre peut être influencée par différentes caractéristiques intrinsèques :

- **La nature de ses minéraux constitutifs** (minéraux argileux en particulier) et leurs caractéristiques mécaniques spécifiques. Cette influence n'est pas toujours quantifiable à l'échelle de l'échantillon de laboratoire car la texture d'agrégat et les discontinuités (pores, fissures...) interviennent aussi.
- **La texture d'agrégat**, caractérisée par les dimensions absolues et relatives des minéraux constitutifs, leur mode d'arrangement et leur énergie de liaison (importance et qualité des joints intergranulaires qui représente un lieu de concentration des forces). Ainsi, l'augmentation de la taille moyenne des minéraux fait diminuer la résistance à la compression, en particulier dans les roches calcaires.

Plus le degré de cimentation d'une roche est élevé, plus sa résistance mécanique est importante, sous réserve que les caractéristiques mécaniques du ciment (granularité, forme et degré d'assemblage des grains) soient du même ordre de grandeur que celles des grains.

- **La fréquence et le type des discontinuités** (pores et/ou fissures) : ces paramètres influent fortement sur l'énergie de liaison des minéraux et donc sur les caractéristiques physiques et mécaniques de l'agrégat. Dans les roches calcaires carbonatées, la diminution de la porosité, consécutive à un processus de cimentation tend à favoriser une meilleure continuité du ciment de la roche, par augmentation de la surface de contact entre constituants, améliorant la résistance mécanique.
- **Le degré de saturation** : Les mesures sont généralement réalisées sur éprouvettes sèches, mais peuvent également être effectuées sur éprouvettes partiellement ou totalement saturées. La présence d'eau dans les discontinuités (fissures et/ou pores) de la roche, conduit à une réduction de la résistance mécanique, expliquée essentiellement par une diminution de l'énergie de liaison des grains constitutifs et une modification des liens intergranulaires du fait de la mise en pression de l'eau dans les pores non drainés. Cette réduction est variable selon la composition minéralogique de la roche, en particulier si celle-ci contient des minéraux argileux.

L'indice le plus communément utilisé pour décrire la résistance mécanique d'une pierre est la mesure de **résistance à la compression uniaxiale**, déterminée en laboratoire sur un échantillon de forme géométrique définie.

En pratique, la mesure de résistance à la compression de chaque pierre est réalisée suivant la norme NF B 10-509 « Produits de carrières - Pierres calcaires - Essai de compression » d'août 1973.

5.2.3 Synthèse des résultats

D'un point de vue stratigraphique, l'église monolithe se situe dans 2 formations principales (d'après carte géologique à 1/50 000, feuillet RIBERAC) appartenant au campanien supérieur (crétacé supérieur) :

- *Formation de Barbezieux* (puissance 10 à 30 m), composée à son extrême base de calcaires crayo-marneux grisâtres, puis ensuite de bancs calcaires bioclastiques à *Orbitoides media* entrecoupés de lumachelles à *Pycnodonte vesicularis*.
- *Formation d'Aubeterre* (puissance 30 à 50 m), composée de calcaires bioclastiques jaunâtres à rudistes et *Orbitoides media*, de lumachelles à *Pycnodonte vesicularis* et de calcaire tuffoïdes (cf fig. 4).

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte
d'Aubeterre sur Dronne (16)

L'église est presque entièrement creusée dans les bancs calcaires bioclastiques à *Orbitoides media* entrecoupés de trois banc principaux de lumachelles (1 à 2 m) à abondantes *Pycnodonte vesicularis* de la *Formation de Barbezieux* (cf. photos 58 à 60).



Photos 58 à 60 - Paroi extérieure de l'église - Alternance de bancs de lumachelles à *Pycnodonte vesicularis* et de bancs à calcaires bioclastiques plus tendres.

D'un point de vue pétrographique, les microfaciès correspondant sont dans l'ensemble des calcaires wackestones et packstone blanc-grisâtre, assez tendre, chargés en intraclastes et bioclastes, entrecoupés de plusieurs bancs calcaires packstones à grainstones bioclastiques. Tous renferment des grains épars de glauconie.

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte
d'Aubeterre sur Dronne (16)

Deux illustrations des échantillons observés au microscope optique polarisant sont présentées à travers les photos 61 & 62.



G8 - LN x40



G9 - LN x40

Photos 61 & 62 – Observations d'échantillons de pierres au microscope optique polarisant - Calcaires bioclastiques wackestones à packstones - Nombreux Bioclastes et grains de glauconie dans un ciment de calcite micritique plus ou moins abondant.

La teneur en calcite de chaque échantillon est donnée dans le tableau 4. Cette dernière est comprise, pour l'échantillonnage réalisé, entre 91 et 100%.

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte
d'Aubeterre sur Dronne (16)

Référence Echantillon	Cote NGF (m)	Calcite (%)	Référence Echantillon	Cote NGF (m)	Calcite (%)
G1	63,60	91 ± 2			
G2	63,60	96 ± 2			
G3	63,60	98 ± 2			
G5	62,10	100 ± 2			
G6	60,50	93 ± 2	E6	60,50	93 ± 2
G7	59,00	94 ± 2	E5	58,30	98 ± 2
G8	57,50	96 ± 2			
G9	55,50	100 ± 2	E4	55,30	98 ± 2
G10	53,60	100 ± 2	E3	52,70	98 ± 2
G11	51,60	94 ± 2	E2	51,00	98 ± 2
G12	49,60	94 ± 2	E1	49,50	97 ± 2

Tab. 4 - Teneur en calcite des échantillons de pierres (classement suivant la cote)

Le tableau 5 regroupe les données numériques concernant la **caractérisation du milieu poreux (porosités totales à l'eau Nt et au mercure NHg)**, les **propriétés de stockage des fluides (coefficient d'absorption d'eau S48)**, les mesures de **perméabilité à l'eau (K)** et de **résistance à la compression (Rc)**

Référence Echantillon	Nt (%)	NHg (%)	S48	K (mDa)	Rc (MPa)
G1	36,7	35,7	0,85	1,15	-
G2	38,9	32,1	0,84	2,43	-
G3	31,2	31,9	0,84	-	10,5
G5	24,6	21,2	0,84	0,76	-
G6	41,6	35,4	0,86	2,62	8,3
G7	38,2*	35,1	0,96*	-	13,5
G8	27,4	28,4	0,83	-	11,0
G9	27,4	36,1	0,83	20,2	18,8
G10	30,9	25,6	0,85	0,66	22,3
G11	41,3*	30,6	0,89*	-	-
G12	40,3	35,5	0,84	-	13,9
E1	32,3	29,4	0,82	0,19	-
E2	27,5	24,0	0,73	-	-
E3	25,6	20,9	0,74	0,98	-
E4	24,5	23,0	0,77	0,53	-
E5	26,8	26,9	0,76	-	11,8
E6	46,5*	31,1	0,71*	-	-

Tab. 5 - Caractéristiques physiques et mécaniques des échantillons de pierres.

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte d'Aubeterre sur Dronne (16)

* Les échantillons E6, G7 et G11 ont gonflé lorsqu'ils ont été mis en imbibition dans l'eau lors de la réalisation des mesures de porosité totale, à relier probablement au changement de phase de sels présents dans les pores. Ce phénomène s'est accompagné d'une perte de matière conduisant à des erreurs possibles sur la porosité totale et le coefficient d'absorption d'eau.

Les caractéristiques physiques et mécaniques mesurées sur les échantillons montrent une forte variabilité, et témoignent de la grande hétérogénéité des microfaciès correspondants :

- Les porosités totales varient du simple au double (min ~ 20 % et max ~ 40 %) pour des échantillons distants parfois de moins de 2 m.
- Les résistances à la compression sont logiquement corrélées à l'inverse de la porosité totale et présentent également de fortes variations d'un échantillon à l'autre (minimum autour de 8 MPa et maximum de l'ordre de 22 MPa).

Selon ces deux paramètres, les échantillons se répartissent en deux catégories :

- Type A = Microfaciès moyennement poreux et moyennement résistants mécaniquement.
- Type B = Microfaciès très poreux et peu résistants mécaniquement

Les coefficients d'absorption d'eau mesurés sont relativement peu discriminants avec une valeur moyenne autour de 0,8 grandeur habituelle pour des pierres calcaires.

Les perméabilités sont par contre assez discriminantes même si pour l'ensemble des échantillons (à l'exception de G9), elles demeurent très faibles (pour des calcaires poreux). Pour l'échantillon G9, la présence de micro fissures explique en partie la valeur mesurée, nettement plus élevée. Dans tous les cas, la perméabilité n'a pu être facilement corrélées aux autres paramètres mesurés, du fait de l'absence de mesure pour de nombreux échantillons.

Les essais de porosimétrie au mercure n'ont quant à eux pas mis en évidence de facteur discriminant, avec une distribution de la porosité assez étalée (entre 0,1 et 10 μm), et centrée autour de 1 μm , correspondant à des faciès microporeux pour l'ensemble des échantillons.

5.3 DIAGNOSTIC

L'église d'Aubeterre est sujette à une typologie d'altération classique des monuments réalisés dans ce type de matériau.

Compte tenu de ses spécificités d'ouvrage souterrain, l'état d'altération de l'église d'Aubeterre est encore plus que pour un édifice bâti aérien, conditionné non seulement par **les facteurs externes d'altération**, c'est à dire par les **conditions d'exposition** des pierres, mais surtout par les **conditions d'alimentation en eau** du massif. L'eau constitue le principal facteur externe d'altération, en agissant indirectement par son rôle de **vecteur d'éléments dissous** comme les **acides** (altération chimique par dissolution) et les **sels** (altération en plaque et désagrégation sableuse). Un apport permanent d'eau à travers la paroi ouest ainsi qu'une humidité résiduelle permanente importante sont donc autant d'éléments favorables au développement des altérations tant physico-chimiques que biologiques.

En terme de durabilité, d'un point de vue purement comparatif (= comparaison des propriétés physiques et mécaniques intrinsèques des microfaciès observés) et **indépendamment des facteurs externes d'altérations** précités, les microfaciès appartenant au "Type A" tel que décrit précédemment, présentent une meilleure durabilité que ceux du "Type B".

Les variations thermo-hygro-métriques par leur rôle dans les cycles d'imbibition et de séchage des surfaces, conditionnent également le développement de faciès d'altération. Il importe donc veiller à conserver des conditions atmosphériques aussi stables que possibles à l'intérieur de l'édifice. On constate que les dispositions prises dans ce sens depuis l'étude du CRPG en 1975 (fermetures des entrées et des ouvertures hautes) peuvent aujourd'hui difficilement être améliorées.

La lutte contre l'eau d'infiltration dans le massif calcaire, notamment dans la partie Ouest de l'édifice où l'on compte plusieurs niveaux de source plus ou moins pérennes, constitue donc le point clé de la lutte contre l'altération de la roche et contre le développement biologique. Il convient de limiter les apports en eau à travers la roche en supprimant autant que possible toutes les résurgences qui favorisent la migration des sels vers la surface du rocher et qui participent ainsi à la formation de faciès « altérés ». Des propositions d'assainissement de l'église sont évoquées au chapitre 8.

En ce qui concerne le **mortier de chaux** mis en place en 1968-1969, une purge des zones en décollement actuel ou imminent est à envisager. Dans les endroits sains, il peut être laissé en place.

Concernant les recouvrements biologiques, on peut envisager le retrait au moyen de diverses méthodes et produits. Des essais ont été faits sur la base du pilier nord avec le LRMH. Une étude complémentaire est à envisager, afin de définir ce qu'on veut retirer et de mener les essais de faisabilité des techniques pouvant être mises en œuvre sur les différents types de recouvrements biologiques observés dans l'église.

Comme il s'agit de développements biologiques très phototropes, il pourrait également être envisagé de remplacer les lampes existantes par des lampes spéciales peu calorigènes du même type que celles qui sont utilisées dans les musées.

6 Modélisation du comportement mécanique

6.1 INTRODUCTION

Les simulations numériques aux éléments finis ont été réalisées avec le code de calculs GEFDYN, développé à l'Ecole Centrale de Paris en collaboration notamment avec le BRGM. Ces simulations que nous présentons dans le présent rapport, visaient à :

- confirmer les mécanismes éventuellement mis en jeu au niveau de la stabilité de l'ouvrage ;
- préciser les zones potentielles de renforcement, pour lesquelles on observe le maximum de désordres, notamment au niveau des déplacements et des contraintes calculés (tractions ou compressions importantes).

Pour ce faire, deux modèles ont été envisagés :

- **un modèle bidimensionnel** en déformations planes, présenté dans le premier chapitre, qui permet de se placer dans une section où de nombreux désordres ont été constatés en place (coupe référencée IJ au niveau du plan général de l'église à travers le transept nord) ;
- **un modèle tridimensionnel**, présenté dans le second, qui permet de tenir compte de la géométrie réelle de l'ouvrage.

En reproduisant l'excavation de l'ouvrage souterrain sans renforcements, les calculs ont permis d'évaluer les zones critiques vis-à-vis de la stabilité de l'ouvrage, zones pour lesquelles des solutions de renforcement peuvent être envisagées.

6.2 MODELE BIDIMENSIONNEL

6.2.1 Hypothèses générales des calculs

Les hypothèses principales faites au niveau de la modélisation numérique sont les suivantes :

- l'étude est réalisée en géométrie bidimensionnelle avec l'hypothèse des déformations planes ;
- le milieu est supposé homogène et continu (non prise en compte d'hétérogénéités latérales ou d'une fissuration éventuelle du milieu) ;
- les calculs sont réalisés en monophasique (densités des matériaux secs considérées dans les calculs).

L'hypothèse des déformations planes implique que la section, ainsi que les solutions éventuelles de renforcement, sont calculées pour une tranche de 1 mètre d'épaisseur.

Deux modèles de comportement différents ont été utilisés pour les calculs, à savoir un modèle élastique linéaire pour les groupes de massif en partie basse (altitude maximale de 54 m NGF) et/ou éloignés de l'excavation, et un modèle élastoplastique parfait de type Mohr-Coulomb pour les autres groupes. La caractérisation de ces différentes parties est précisée dans la section 6.2.2. ci-après.

6.2.2 Caractéristiques du modèle

6.2.2.1 Géométrie

La géométrie choisie pour les calculs bidimensionnels est celle d'une section verticale, reprenant les données de la coupe II du plan de l'église établi par R. Guilloteau en 1996. Cette coupe a été retenue, car c'est à ce niveau de l'église qu'ont été relevés les désordres les plus importants, tant au niveau du toit du transept nord que celui de la voûte de la nef.

Les altitudes NGF considérées pour les calculs sont celles mentionnées sur les plans fournis. La géométrie adoptée pour nos simulations et résumée sur la figure 10, est la suivante :

- plancher de l'église à l'altitude 49 m ;
- hauteur maximale du transept nord : 7 m ;
- largeur maximale de l'excavation : 34 m ;
- altitude maximale de l'excavation : 66,2 m (bas côté et triforium).

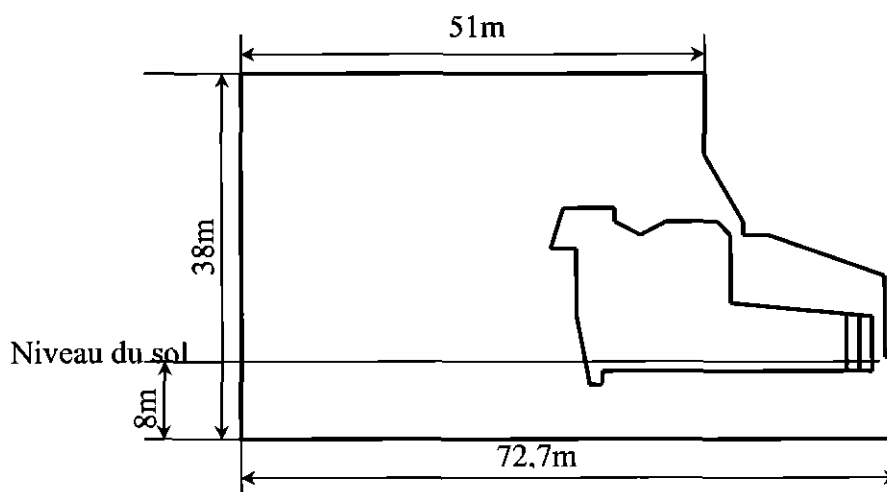


Fig. 11 – Géométrie de la section 2D

6.2.2.2 Caractéristiques des matériaux

Nous avons subdivisé le massif en 15 groupes de matériaux, chaque matériau correspondant à des propriétés mécaniques et physiques différentes, déterminées essentiellement à partir des essais réalisés par le BRGM et ANTEA. Lorsque les données manquaient (exemple : module d'Young, angle de frottement, etc.), nous avons considéré des propriétés obtenues à partir de rapports précédents ou bien tirées de la littérature en considérant des matériaux comparables. La figure 11 présente les différents groupes de matériaux considérés et leur dénomination.

Les fortes disparités des résultats des essais ne permettent pas de considérer un massif homogène d'un point de vue mécanique. Nous avons émis l'hypothèse d'une caractérisation tabulaire des matériaux. Il en résulte une répartition des caractéristiques en trois zones en ce qui concerne les groupes proches de l'intérieur de l'église :

- une **zone basse** (matériaux cal5, cal9, cal13, cal16 et mat1), dans laquelle la résistance à la compression et le poids spécifique ont été déterminés à partir des valeurs des échantillons G10, G12, E8-1 et E8-3 ;
- une **zone intermédiaire** (matériaux cal6, cal8, cal10, cal12, cal13, cal15, cal16, mat2 et mat4), dans laquelle les caractéristiques ont été déterminées à partir des valeurs des échantillons G6, G8, E5 et E7 ;
- une **zone haute** (cal7, cal11 et cal14) dont les caractéristiques ont été calculées à partir des valeurs des échantillons G3 et G6.

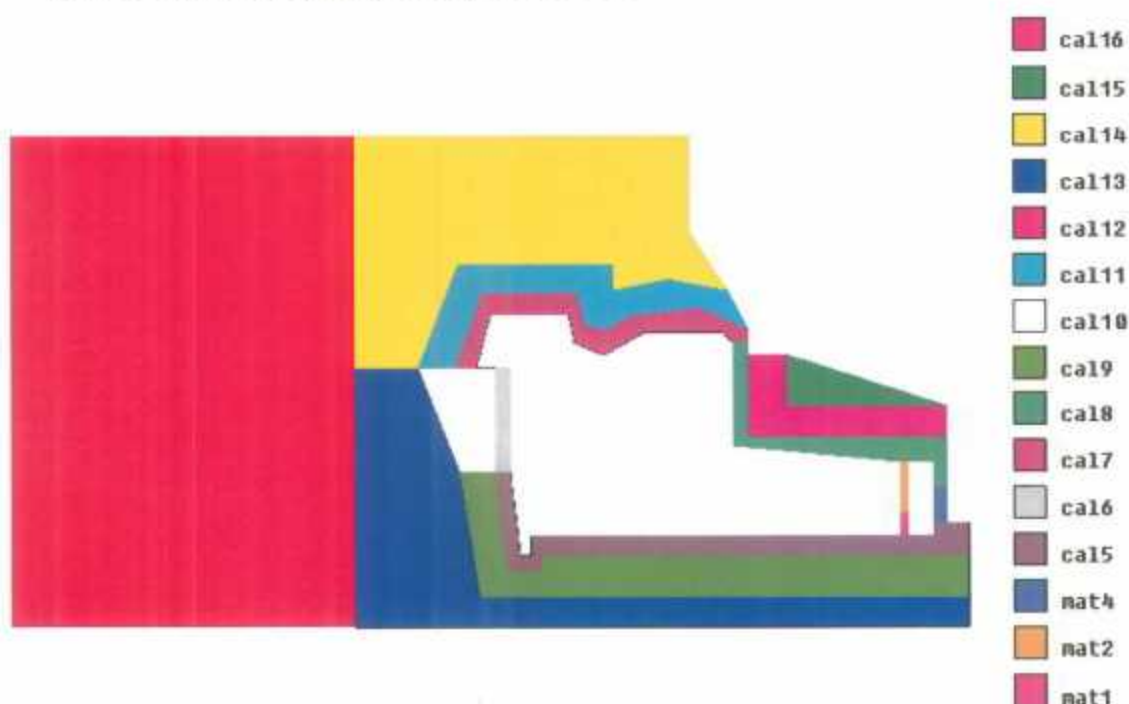


Fig. 12 – Groupes de matériaux pour le modèle 2D

Pour déterminer les paramètres manquants pour le modèle de Mohr-Coulomb, tout en tenant compte des propriétés disponibles (résistances à la compression), nous avons utilisé la classification et les équivalences proposées par Bieniawski³, ainsi que les propriétés courantes des calcaires indiquées dans l'ouvrage de Talobre⁴.

La classification de Bieniawski permet de caractériser une roche suivant plusieurs critères (indice RMR, etc.), et comprend 5 grandes classes, numérotées de I (roche « excellente ») à V (roche « très mauvaise »). Par ailleurs, pour chaque classe, Bieniawski indique des intervalles de valeurs possibles pour l'angle de frottement interne et la cohésion de la roche.

Dans notre cas, nous avons classé les matériaux de façon qualitative, d'après les observations faites sur les désordres, et nous avons utilisé les bornes inférieures des intervalles proposés par Bieniawski, afin de placer les calculs dans le sens de la sécurité (hypothèses pessimistes). Les différentes valeurs retenues pour les calculs sont résumées dans le tableau 6. Les notations utilisées sont les suivantes :

- E : module d'Young ;
- ϕ : angle de frottement interne ;
- C : cohésion ;
- R_c : résistance à la compression simple ;
- ρ_d : masse volumique sèche.

Par ailleurs, tous les matériaux non renforcés ont un coefficient de Poisson (ν) pris égal à 0,33. Enfin, nous n'indiquons pas de valeur de cohésion ou d'angle de frottement pour les matériaux traités en élasticité linéaire (essentiellement en classe I).

Matériaux	Classes	ρ_d (kN/m ³)	E (MPa)	ϕ (°)	C (MPa)	R_c (MPa)
mat1	III	18,5	1178	48	8,5	12,5
mat2, mat4, cal8, cal15	III	19,5	1277	48	8,5	12,5
cal5, cal9, cal13	I	18,5	1178	-	-	21,5
cal6, cal10	II	19,5	1277	55	15	12,5
cal7, cal11	IV	18,5	442	41	4,5	9,4
cal12	III	18,5	1277	48	8,5	12,5
cal14	III	18,5	442	48	8,5	9,4
cal16	I	18,5	966	-	-	21,5

Tab. 6 – Propriétés physiques et mécaniques utilisées pour le modèle 2D

³ Z.T. Bieniawski - Engineering rock mass classifications. 1989.

⁴ J.A. Talobre – La mécanique des roches et ses applications. 2^{ème} ed. Dunod, Paris. 1967.

6.2.2.3 Conditions aux limites et initiales

Les conditions aux limites et initiales sont présentées sur la figure 12. La contrainte initiale verticale (σ_{vo}) correspond aux poids des terres dans le massif. Nous avons considéré des poids spécifiques différents (γ_d) dans les trois zones mentionnées au paragraphe précédent (2.2.2), ce qui explique les ruptures de pente visibles au niveau du diagramme des contraintes (cf. figure 12). Par ailleurs, le coefficient de poussée des terres au repos a été pris égal à 0.7.

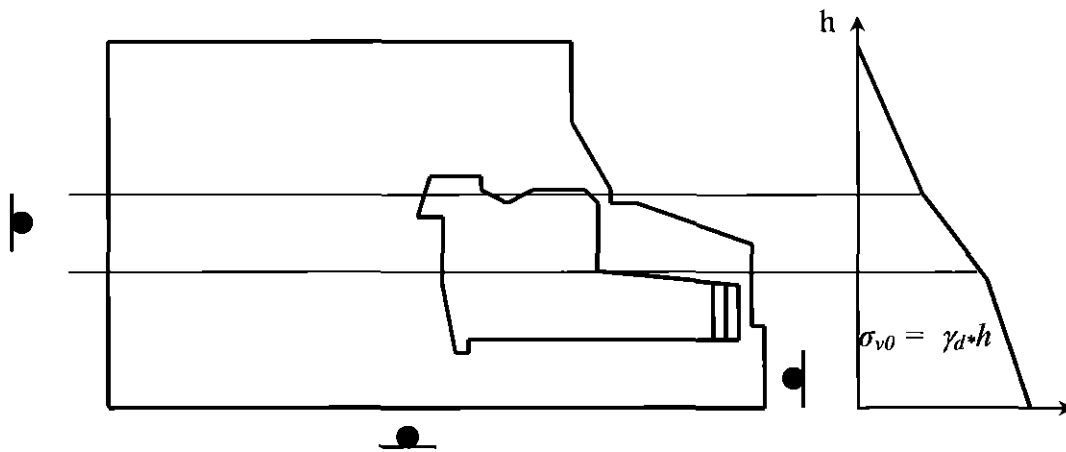


Fig. 13 – Conditions aux limites et initiales 2D

6.2.2.4 Caractéristiques du maillage éléments finis

Le maillage utilisé pour les calculs est constitué de 1254 nœuds et 1437 éléments isoparamétriques linéaires, comprenant 814 éléments quadrangulaires et 623 éléments triangulaires (cf. figure 13).

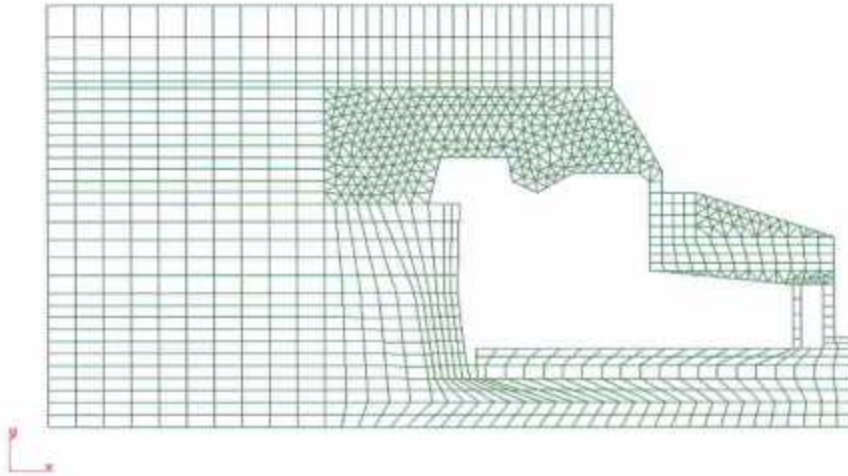


Fig. 14 – Maillage éléments finis 2D

6.2.3 Simulations réalisées

6.2.3.1 Scénario de l'excavation

Du fait de la mise en contrainte initiale du massif (poids des terres), ce dernier doit être maintenu en équilibre au niveau de l'ouverture au moyen de forces appliquées contre les parois intérieures de l'église. Cette technique permet d'une part, d'éviter de mailler la partie à excaver et d'autre part, de simuler l'excavation simplement en réduisant progressivement les forces d'équilibre appliquées (cf. le schéma de la figure 14).

De plus, du fait de l'analyse élastoplastique, toute sollicitation appliquée, en l'occurrence la décharge liée à l'excavation, induit une réponse immédiate et définitive de la part du massif. Si l'on souhaite construire des éléments de renforcement (maçonnerie, etc.), il est donc nécessaire de le faire avant la fin de la réduction totale des forces d'équilibre, afin qu'ils puissent reprendre réellement une partie des déformations du massif. L'étape 2 de la figure 14 représente le début des renforcements éventuellement envisagés dans nos simulations.

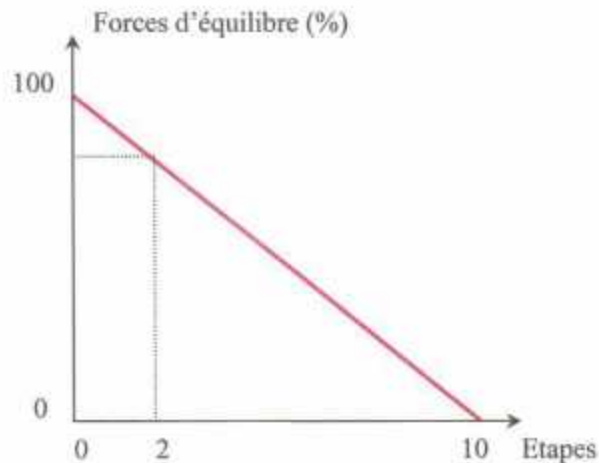


Fig. 15 – Scénario de l'excavation

6.2.3.2 Résultats des simulations 2D

Nous avons tout d'abord réalisé une simulation de l'excavation sans renforcement. Suite aux résultats de cette première simulation, nous avons considérés deux secteurs principaux de renforcement (cf. figure 15) :

- secteur 1 : partie occidentale de la voûte de la nef et partie sommitale de la façade ;
- secteur 2 : partie intermédiaire de la façade.

Dans ces secteurs, nous avons simplement remplacé les propriétés des matériaux par celles d'un béton (caractéristiques à long terme : $E = 30 \text{ GPa}$ et $\nu = 0,2$), sans annuler leur état de contraintes lié aux sollicitations des étapes précédentes. Ceci a simplement permis d'évaluer l'impact d'une amélioration éventuelle des propriétés locales sur le comportement cinématique global de l'ouvrage (et non pas l'effet réel d'une construction qui suppose un état des contraintes initialement nul pour les matériaux de renforcement).

Une première simulation a été réalisée en renforçant uniquement le secteur 1, et une seconde, en renforçant simultanément les deux secteurs. Les valeurs maximales de déplacements, obtenues suivant le type de simulation envisagée (avec ou sans renforcement), sont indiquées dans le tableau 7. Les valeurs maximales de traction et compression calculées sont indiquées dans le tableau 8. La convention de signe pour les contraintes est celle de la Mécanique des Milieux Continus (traction positive).

On constate que le massif subit un mouvement de basculement au cours de l'excavation (avec ou sans renforcement), induisant des déplacements importants au niveau du toit du transept, à l'intersection entre la voûte et la façade. C'est également l'endroit où les tractions maximales sont observées (côté façade). On observe également une compression importante au niveau du pilier du transept.

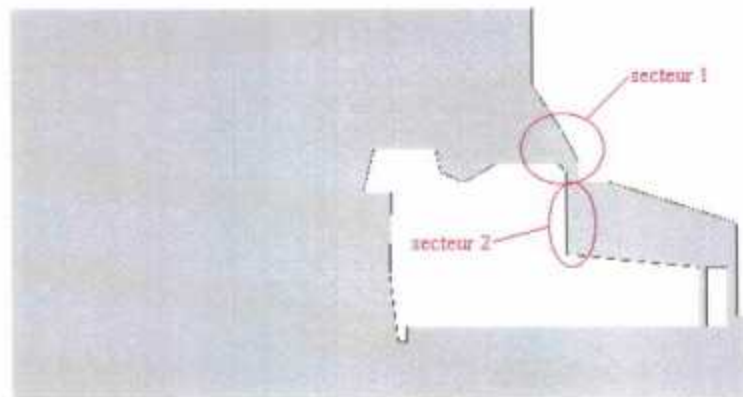


Fig. 16 – Secteurs de renforcement envisagés pour le modèle 2D

<i>Simulation</i>	<i>Déplacement horizontal u_x (cm)</i>	<i>Déplacement vertical u_y (cm)</i>	<i>Norme (cm^2)</i>
<i>Sans renforcement</i>	-22,9	-37,3	41,6
<i>Renforcement secteur 1</i>	-10,5	-19,3	20,8
<i>Renforcement secteurs 1+2</i>	-8,5	-17,2	18,5

Tab. 7 – Déplacements maximums obtenus avec le modèle bidimensionnel

<i>Contrainte horizontale σ_{xx} (MPa)</i>	<i>Contrainte verticale σ_{yy} (MPa)</i>	<i>Cisaillement σ_{xy} (MPa)</i>
+11,6	+11,8	+3,7
-15	-15	-1,6

Tab. 8 – Contraintes minimales et maximales obtenues avec le modèle bidimensionnel sans renforcement

6.3 MODELE TRIDIMENSIONNEL

6.3.1 Hypothèses générales des calculs

Les hypothèses principales faites au niveau de la modélisation numérique sont les suivantes :

- l'étude est réalisée en géométrie tridimensionnelle ;
- le milieu est supposé homogène et continu (non prise en compte d'une fissuration éventuelle du milieu) ;
- les calculs sont réalisés en monophasique (densités des matériaux secs considérées dans les calculs).

Comme pour le cas bidimensionnel, deux modèles de comportement différents ont été utilisés pour les calculs, à savoir un modèle élastique linéaire pour les groupes de massif en partie basse (altitude maximale de 54 m) et/ou éloignés de l'excavation, et un modèle élastoplastique parfait de type Von Mises pour les autres groupes. La caractérisation de ces différentes parties est précisée dans la section ci-après.

6.3.2 Caractéristiques du modèle

6.3.2.1 Géométrie, conditions aux limites et initiales

La géométrie de l'ouvrage a été reproduite conformément aux plans et coupes établis par R. Guilloteau en 1996 et par J. Dourieux en 2002. Afin de limiter le nombre d'éléments finis pour le calcul, la limite supérieure considérée se situe au pied des remparts du château et non pas au niveau de la terrasse de celui-ci. La géométrie, ainsi que les conditions aux limites adoptées pour nos simulations, sont résumées sur les profils des figures 16 à 18.

Les altitudes NGF considérées pour les calculs, mentionnées sur les plans fournis, sont les suivantes :

- plancher de l'église (nef, salle des sarcophages, chapelles latérales) à l'altitude 48,7 m ;
- longueur de la nef (abside comprise) : 29,1 m ;
- largeur maximale de l'excavation : 34,86 m ;
- altitude maximale de l'excavation : 65,5 m (mi-voûte de la nef, bas côté et triforium).

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte
d'Aubeterre sur Dronne (16)

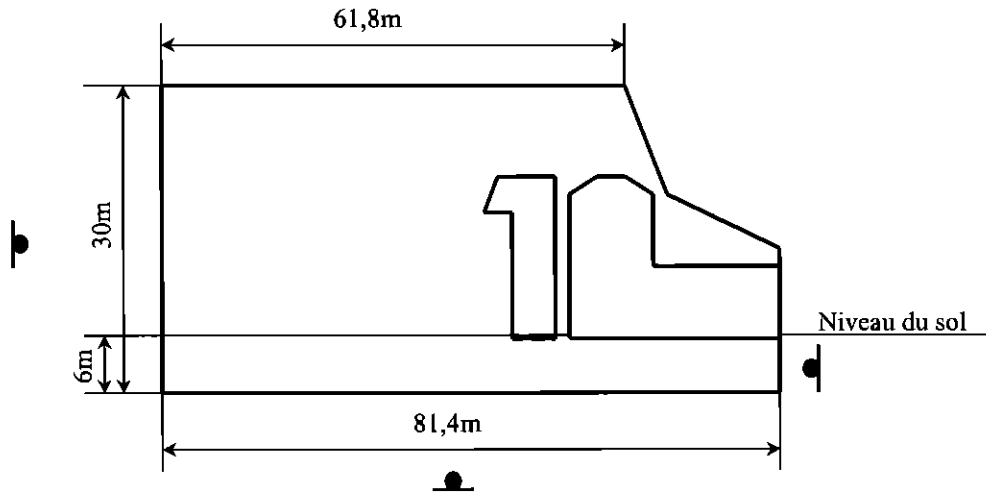


Fig. 17 – Géométrie de la section 3D : coupe transversale de la nef et du transept nord
(coupe IJ + colonne nord)

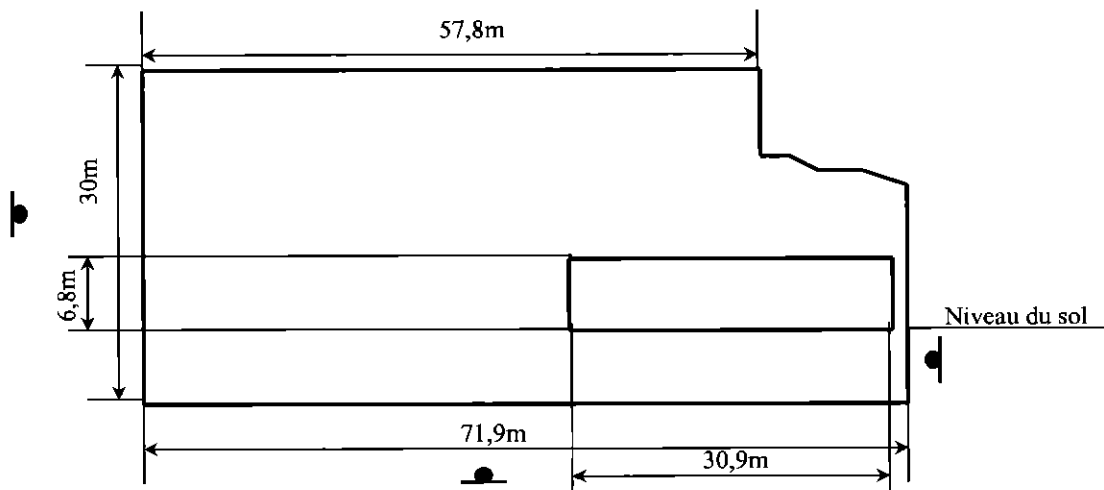


Fig. 18 – Géométrie de la section 3D : coupe transversale de la salle des sarcophages

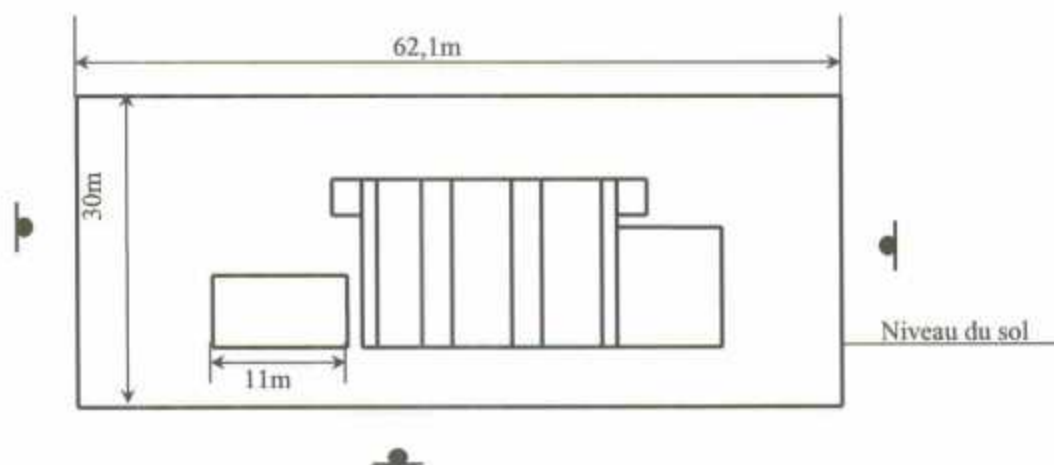


Fig. 19 – Géométrie de la section 3D : coupe longitudinale (salle des sarcophages et piliers)

6.3.2.2 Caractéristiques des matériaux

Nous avons subdivisé le massif en 12 groupes de matériaux, chaque matériau correspondant à des propriétés mécaniques et physiques différentes, déterminées suivant la même méthodologie que pour le cas bidimensionnel. Nous avons également émis l'hypothèse d'une caractérisation tabulaire des matériaux, résultant en une répartition des caractéristiques en trois zones (basse, intermédiaire, haute), avec comme altitudes limites 54 m et 62 m.

Les groupes les plus éloignés de l'excavation sont regroupés sous la dénomination « massif ouest » et possèdent un comportement élastique linéaire pour les calculs. Les autres groupes (« massif », « pilier nord », « pilier sud ») ont un comportement de type Von Mises. Les figures 19 et 20 présentent les différents groupes de matériaux considérés et leur dénomination.

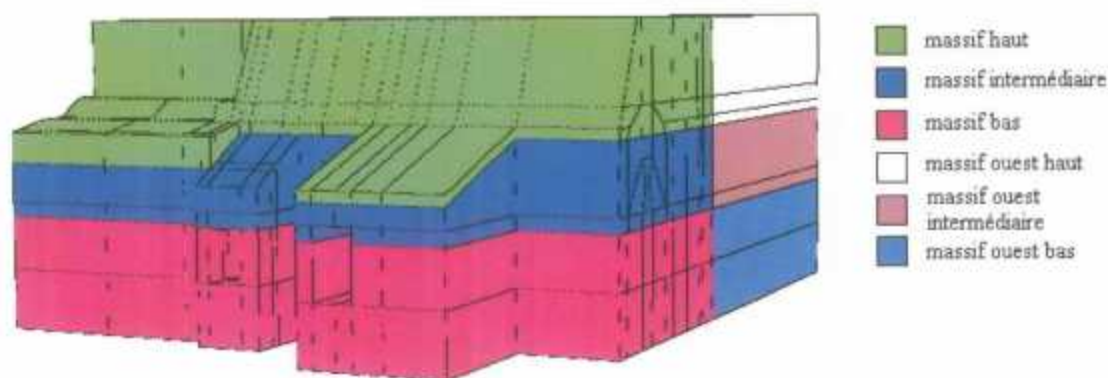


Fig. 20 – Groupes de matériaux pour le modèle 3D : vue en perspective

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte
d'Aubeterre sur Dronne (16)

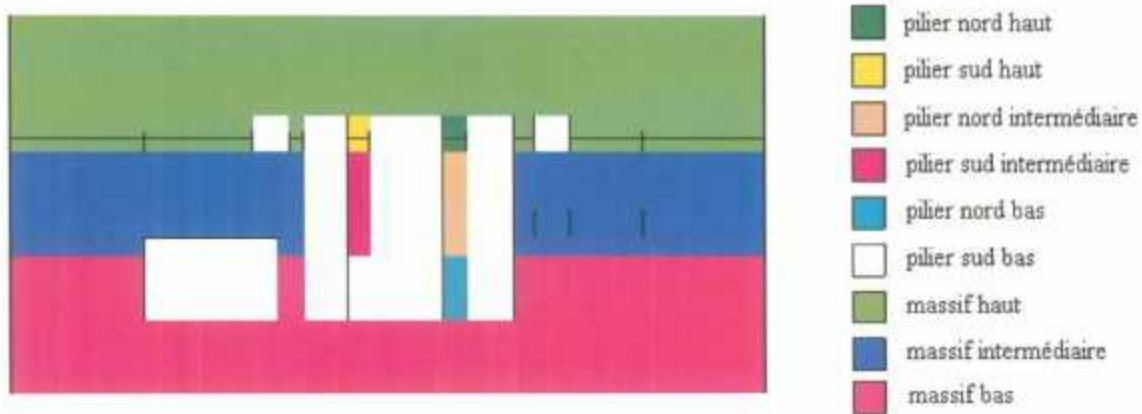


Fig. 21 – Groupes de matériaux pour le modèle 3D : vue intérieure (coupe longitudinale)

Les matériaux ont un coefficient de Poisson (ν) pris égal à 0,33. Enfin, nous n'indiquons pas de valeur de résistance à la traction pour les matériaux traités en élasticité linéaire.

Matériaux	ν (kN/m ³)	E (MPa)	R _t (MPa)
Massif bas	18,5	1178	-
Massif intermédiaire	19,5	1277	0,3
Massif haut	18,5	442	0,15
Pilier bas (nord, sud)	18,5	1178	1
Pilier intermédiaire (nord, sud)	19,5	1277	0,3
Pilier haut (nord, sud)	18,5	442	0,15
Massif ouest bas	18,5	1178	-
Massif ouest intermédiaire	19,5	1277	-
Massif ouest haut	18,5	442	-

Tab. 9 – Propriétés physiques et mécaniques utilisées pour le modèle 3D

6.3.2.3 Conditions aux limites et initiales

De même que pour le modèle 2D, l'état de contrainte initial vertical correspond aux poids des terres dans le massif, en considérant un poids spécifique différent pour chacune des trois zones mentionnées précédemment. Le recouvrement se situant entre la base des remparts et la terrasse a été simulé par l'intermédiaire d'une contrainte initiale

équivalente au poids des terres correspondant, à savoir 6,5 m de hauteur pour un poids spécifique de $18,5 \text{ kN/m}^3$.

Le coefficient de poussée des terres au repos a également été pris égal à 0,7.

6.3.2.4 Caractéristiques du maillage éléments finis

Le maillage utilisé pour les calculs est constitué de 5365 nœuds et 3972 éléments hexaédriques linéaires (cf. figures 21 et 22).

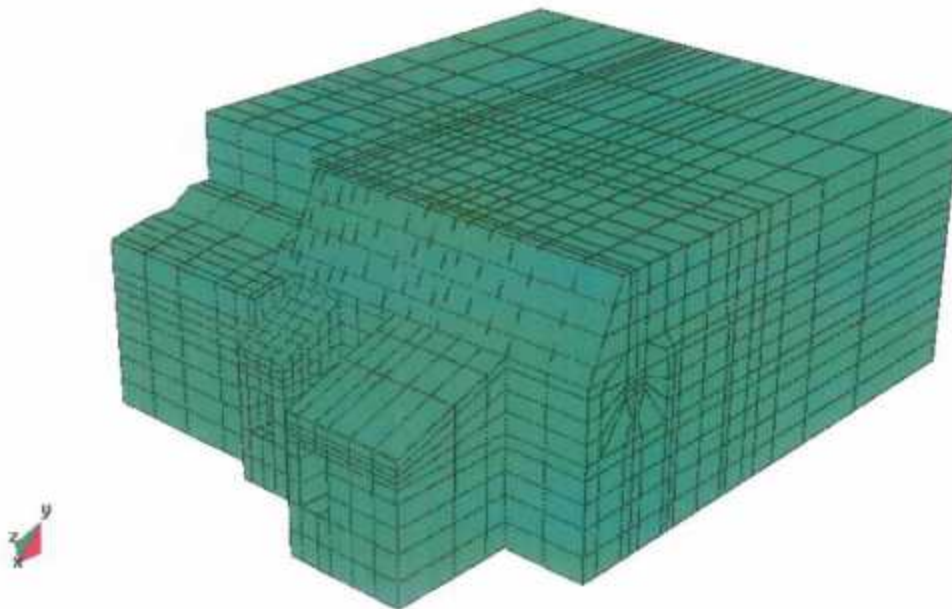


Fig. 22 - Maillage éléments finis 3D : vue en perspective

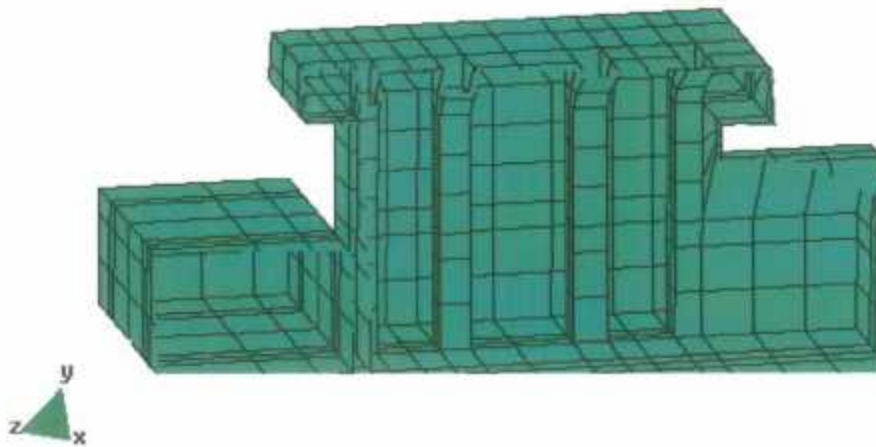


Fig. 23 - Maillage éléments finis 3D : vue intérieure (coupe longitudinale)

6.3.3 Résultats de la simulation

Nous avons ici réalisé une simulation de l'excavation sans renforcement uniquement, en suivant le même scénario que pour le modèle bidimensionnel. Les valeurs maximales de déplacements obtenues pour différentes coupes transversales du modèle 3D, ainsi que pour les piliers nord et sud, sont indiquées dans le tableau 10. Les valeurs maximales de traction et compression obtenues au niveau des mêmes parties du modèle sont indiquées dans le tableau 11.

Ici encore, on constate que le massif subit un mouvement de basculement au cours de l'excavation, induisant des déplacements et contraintes importantes essentiellement au niveau de la façade au-dessus de l'entrée de l'église, ainsi qu'au niveau du mur situé devant la salle des sarcophages. Les valeurs maximales de déplacements sont néanmoins plus faibles que celles obtenues avec le modèle 2D sans renforcement, la prise en compte de la géométrie réelle de l'ouvrage ayant un effet stabilisateur important.

On constate également que la tête du pilier nord subit un écrasement d'environ 2 cm, pour un déplacement horizontal maximal du même ordre. Le même phénomène est observable pour le pilier sud, avec un écrasement combiné à un déplacement horizontal de l'ordre de 3,5 cm. Par ailleurs, la compression maximale se produit au niveau de la tête et de la base des deux piliers (-1,1 MPa pour le pilier sud et -0,8 MPa pour le nord), tandis que la traction maximale est observée uniquement en partie supérieure (+0,4 MPa pour le pilier sud et +0,8 MPa pour le nord).

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte
d'Aubeterre sur Dronne (16)

<i>Localisation</i>	<i>Déplacement horizontal u_x (cm)</i>	<i>Déplacement horizontal u_z (cm)</i>	<i>Déplacement vertical u_y (cm)</i>
<i>Coupe « pilier nord »</i>	+4 -2	0 -5	-0,5 -6
<i>Pilier nord</i>	+1 -0,5	0,2 -2	0 -2
<i>Coupe « pilier sud »</i>	+1 -6	+0,5 -11	+0,3 -18
<i>Pilier sud</i>	+0,1 -0,9	+0,3 -3,5	+0,3 -3,5
<i>Coupe « salle des sarcophages »</i>	0 -4	0 -6	0 -14
<i>Coupe « entrée de l'église »</i>	0 -1,5	0 -10,8	0 -24

Tab. 10 – Déplacements minimums et maximums obtenus avec le modèle tridimensionnel sans renforcement

<i>Localisation</i>	σ_{xx} (MPa)	σ_{zz} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	σ_{yz} (MPa)	σ_{xz} (MPa)	σ_{xy} (MPa)
<i>Coupe « pilier nord »</i>	3 -2,5	3 -2,5	3 -2,5	+0,3 -0,5	+0,15 -0,3	+0,15 -0,2
<i>Pilier nord</i>	+0,8 -0,8	+0,6 -0,8	+0,8 -0,8	+0,15 -0,06	+0,15 -0,11	+0,09 -0,11
<i>Coupe « pilier sud »</i>	+3 -2,5	+3 -2,5	+3 -2,5	+0,15 -0,5	+0,2 -0,4	+0,25 -0,25
<i>Pilier sud</i>	+0,4 -0,6	+0,35 -1,1	+0,4 -0,7	+0,04 -0,06	+0,03 -0,05	+0,05 -0,05
<i>Coupe « salle des sarcophages »</i>	+3 -3	+3 -3	+3 -3	+0,3 -0,3	+0,3 -0,15	+0,15 -0,3
<i>Coupe « entrée de l'église »</i>	+3,9 -4,4	+3,8 -4,5	+4,1 -4,3	+0,36 -0,53	0,1 -0,4	+0,23 -0,43

Tab. 11 – Contraintes minimales et maximales obtenues avec le modèle tridimensionnel sans renforcement

6.4 CONCLUSIONS

La présente étude avait pour objectif de confirmer les mécanismes éventuellement mis en jeu au niveau de la stabilité de l'ouvrage, et de préciser les zones potentielles de renforcement, pour lesquelles on observe le maximum de désordres, notamment au niveau des déplacements et des contraintes calculés (tractions ou compressions importantes).

Les résultats des simulations 2D semblent indiquer un basculement au niveau du toit du transept, les valeurs maximales de déplacements et de contraintes (traction notamment) étant obtenues à l'intersection entre la voûte et le toit (côté façade). Les valeurs obtenues après simulation de l'excavation sans renforcement sont très importantes, du fait de l'hypothèse des déformations planes (hypothèse pessimiste) qui considère une section infinie dans la direction z. De ce fait, la couverture que doit supporter l'unique pilier de la coupe est supposée infinie. Par ailleurs, le modèle ne peut pas tenir compte de la structure réelle latérale qui joue un rôle stabilisateur. Cet effet est visible au niveau des résultats de la simulation 3D, qui présente des valeurs maximales de déplacements et de contraintes plus faibles. Ces dernières sont essentiellement localisées en façade au-dessus de l'entrée principale, ainsi qu'au niveau du mur est situé devant la salle des sarcophages.

7 Orientations en matière de confortement

D'une manière générale les simulations numériques indiquent que les secteurs les plus sollicités, en terme de contraintes, sont la façade extérieure (défaut de contreforts allant jusqu'à sa partie supérieure), le transept nord et la séparation nef - salle des sarcophages. Les désordres observés dans l'ouvrage ne contredisent pas ces résultats.

Bien qu'apparemment modérément sollicités, les têtes des piliers nord et sud subissent des déplacements, hors prise en compte de la fissuration mécanique qui s'est développée parallèlement et en arrière de la façade extérieure- de 2 à 3,5 cm. Cette fissuration, qui représente une discontinuité mécanique, est de nature à entraîner une surcharge des piliers du fait de l'augmentation du porte à faux du toit de la nef. Si corrélativement, il y a augmentation des déplacements horizontaux, les piliers étant très élancés, il faut prendre garde au problème de flambement.

Le programme proposé s'articule en trois priorités qui sont fonctions du degré d'urgence des travaux à réaliser. Ces priorités ont pour objet d'aider le maître d'ouvrage à échelonner les travaux prévisionnels dans le temps mais ne préjugent en rien de leur nécessité sur le long terme.

7.1 TRAVAUX DE PRIORITE 1

En préalable à la réalisation des travaux de confortement, il y a lieu de prévoir quelques carottages complémentaires sur les parements en maçonnerie du transept, de la nef et de la galerie sud. Ces mesures permettront d'apprécier les épaisseurs respectives du calcaire crayeux et des moellons en maçonnerie ainsi que la qualité du contact entre ces deux entités. (par exemple au moyen d'un endoscope).

7.1.1 Confortement du transept Nord

Il est présenté deux solutions de confortement dont l'une tient compte du choix éventuel du maître d'ouvrage de conserver la longueur actuelle du transept ainsi que la porte donnant sur le parvis de l'église.

7.1.1.1 Solution 1

Cette solution est définitive mais elle comporte l'inconvénient de réduire de 25 à 30 % la longueur du transept et de condamner son accès au parvis de l'église. Les travaux envisagés devront procéder au :

- **Comblement du fond du transept (1)** derrière un mur en béton armé orienté Nord /Sud monté au ras de l'ouverture donnant sur l'entrée principale et passant à l'ouest de l'ancien clocher (fissure n°15). Ce mur pourrait être revêtu de moellons de craie pour l'esthétique ; cette opération impose par ailleurs de murer la porte donnant accès au parvis ainsi que l'ouverture située à son aplomb.
Le comblement de la salle ainsi formée pourrait être effectué à l'aide de sable hydraulique complété par un clavage au coulis de ciment. Les matériaux seraient injectés depuis le haut du transept par l'intermédiaire de cannes d'injections et d'évents. Les trous dans la voûte seraient réalisés à l'aide d'un perforateur ou d'une machine de forage.
- **Comblement du diverticule D (2)** après une reconnaissance préalable à l'aide de moyens d'escalade : construction d'un mur en moellon calcaire (ou en béton armé) à l'entrée du diverticule et injection du diverticule depuis la surface à l'aide d'un coulis de ciment ou de sable hydraulique complété par un coulis de clavage. Cette opération devra être réalisée par passes successives afin d'éviter l'éclatement du parement ;
- **Boulonnage incliné de la voûte dans les deux tiers ouest du transept (3)** en particulier dans le secteur des fissures n° 11, 12, 14, 15 (boulons à ancrage réparti Ø 20 mm, longueur 2,5 m.). Cela permettra d'améliorer le monolithisme et le comportement mécanique de la voûte.

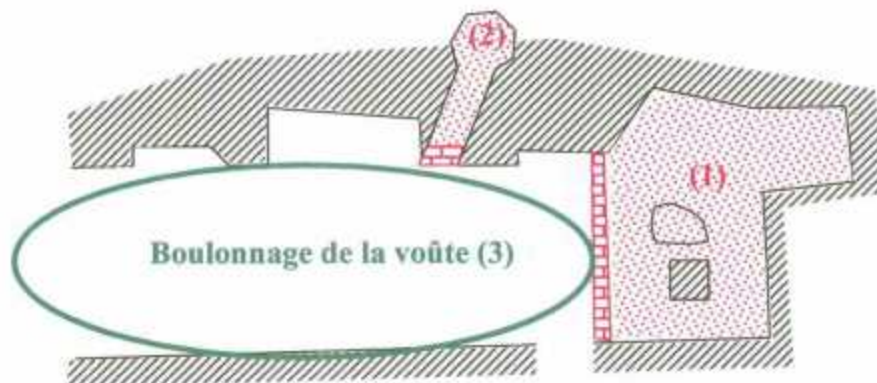


Fig. 24 – Confortement du transept (solution 1)

7.1.1.2 Solution 2

Cette solution a l'avantage de conserver l'ouverture du transept sur le parvis de l'église ainsi que l'intégralité de sa longueur. Cependant, elle est plus compliquée à mettre en œuvre et peut ne pas être définitive (surveillance à prévoir). Elle nécessite par ailleurs une injection de l'ancien clocher, après un recerclage de la fondation et un élargissement du pilier interne sous le clocher. Les travaux suivants devront être menés :

- **Comblement du Nord Est du transept (1)** derrière un mur orienté Est Ouest monté depuis l'angle marqué par la discontinuité n°17, perpendiculairement au réseau de fissures n°16 et jusqu'à l'angle du mur maçonné situé au nord de l'ancien clocher. La technique de comblement serait la même que pour la solution 1 ;
- **Confinement du massif de fondation (remblai) du pilier interne (2)** : coffrage en béton armé de 0,20 m d'épaisseur ancré sous le remblai. Pour ne pas trop déchausser le dé en remblai, il faudra procéder par passes : creusement sur un côté puis bétonnage immédiat en laissant des fers en attente, creusement sur le côté opposé, et ainsi de suite ;
- **Coulage d'une dalle en béton armé à la base de l'ancien clocher (3)** éventuellement recouverte de moellons calcaires pour l'esthétique ;
- **Élargissement du pilier interne sous la dalle du clocher (4)** de manière à reprendre les nouvelles contraintes générées par le comblement du clocher avec du coulis de ciment ou du sable ;
- **Injection du clocher (5)** depuis le haut par passes successives à l'aide d'un coulis de ciment ou du sable complété par un coulis de clavage ;
- **Comblement du diverticule D (6)** après une reconnaissance préalable à l'aide de moyens d'escalade. Montage d'un mur en moellon calcaire (ou en BA) à l'entrée du diverticule et injection du diverticule depuis la surface à l'aide d'un coulis de ciment ou de sable hydraulique complété par un coulis de clavage. Cette opération devra être réalisée par passes successives afin d'éviter l'éclatement du parement ;
- **Boulonnage incliné de la voûte dans tout le transept (7)** en particulier dans le secteur des fissures n° 10, 10', 11, 12, 14, 15 (boulons à ancrage réparti Ø 20 mm, longueur 2,5 m.)

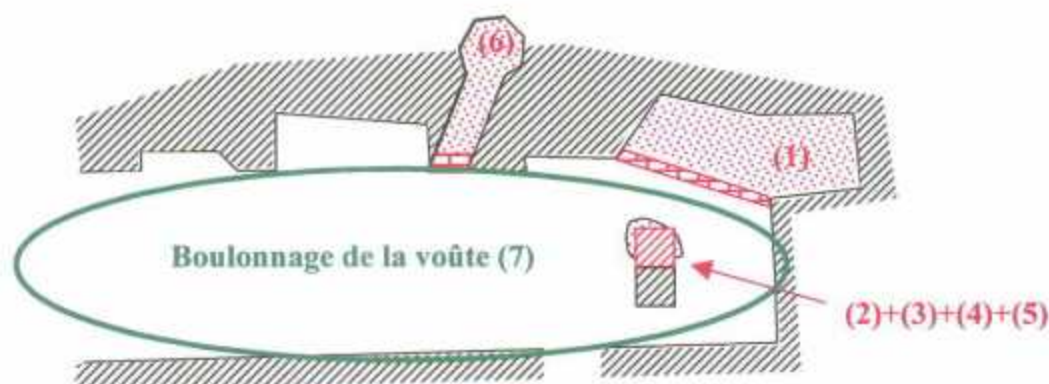


Fig. 25 – Confortement du transept (solution 2)

7.1.2 Travaux de purge

Des travaux de purge sont à envisager en priorité 1 dans tous les secteurs de l'église susceptibles d'accueillir du public en particulier dans la nef et dans l'abside. Ces travaux n'excluent pas des opérations de purge dans des secteurs interdits au public mais au niveau desquels la desquamation et l'effritement sont particulièrement inesthétiques.

En vue d'assurer la sécurité du public, les travaux de purge devront concerner en premier lieu :

- Les écailles de mortier qui présentent des défauts manifestes d'adhérence à la paroi (cas de la paroi Ouest de la nef).
- Les phénomènes d'écaillage et de desquamation constatés en particulier sur la base des arcades du triforium, sur le pilier saillant nord, sur la voûte de la nef, sur les parois de l'abside et sur la voûte du couloir Sud.

7.1.3 Mise en place d'un système d'auscultation dans la nef

L'installation du système d'auscultation dans la nef aura pour objectif :

- ◆ d'évaluer quantitativement le processus de dégradation de la nef en mesurant :
 - l'évolution de la fissuration en voûte ;
 - les termes de convergence sol/voûte et tête pilier/base pilier ;
 - l'effet de basculement de la façade de la nef vers la vallée ;

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte d'Aubeterre sur Dronne (16)

- ◆ de permettre une meilleure programmation dans le temps de la phase de confortement de la nef ;
- ◆ d'améliorer la sécurité du public par une connaissance plus fine du phénomène.

1) Mesures en continu avec télétransmission :

Le principe de ces mesures consiste à mettre en place des capteurs couplés à une centrale d'acquisition en continu, consultable à distance via un modem et une ligne téléphonique.

A ce titre, il est proposé de mettre en place :

- 5 capteurs fissuromètres + un capteur de température sur la voûte de la nef et de l'abside ;
- 3 capteurs de rotation + un capteur de température en partie supérieure de la façade de la nef (peuvent éventuellement être posés à l'extérieur, mais encastrés pour les protéger un minimum des intempéries).

2) Mesures discontinues (1 mois ou plus) :

La fréquentation de l'église ne permet pas la pose de fil invar à demeure nécessaire à la réalisation de mesures de convergence en continu. On se propose donc de réaliser des mesures discontinues sur des bornes réfléchissantes à l'aide d'un télémètre laser de haute précision. Les paramètres suivants seront appréhendés :

- convergence voûte nef / sol nef par l'intermédiaire de 4 points de mesures ;
- convergence tête piliers / base piliers par l'intermédiaire de 2 points de mesures.

7.1.4 Travaux d'assainissement

Les travaux d'assainissement devront viser à réduire les résurgences qui se manifestent le long de la paroi Ouest de la nef. L'action la plus simple consiste dans un premier temps à évacuer par siphonnage l'eau stockée dans la « citerne » du boyau.

Les actions suivantes devront être menées :

- **Dégagement de l'entrée de la « citerne »** (évacuation des remblais déposés devant l'étréouiture qui en conditionne l'accès) ;
- **Vidange complète de la « citerne »** ;
- **Examen de la cavité** par un géologue qui devra rechercher comment cette cavité est alimentée ;
- Selon l'origine de l'eau, on devra adopter **une solution de drainage adaptée**. Plusieurs solutions peuvent être d'ores et déjà évoquées le choix étant fait en fonction des observations qui seront faites sur place :

Diagnostic général de l'état de stabilité de l'église troglodyte d'Aubeterre sur Dronne (16)

- Mise en place d'un système de **siphonnage permanent** de la « citerne » ;
- Étanchement de la partie basse de la citerne avec mise en place d'une pompe à déclenchement automatique ;
- Étanchement de la partie basse de la citerne avec évacuation gravitaire de l'eau vers le caniveau du triforium.

Tous les cavités, canalisations, caniveaux, cunettes, rigoles qui serviront à l'évacuation ou au stockage de l'eau de la citerne devront être étanchéifiées afin de limiter les possibilités de ré-infiltration.

En fonction des résultats des opérations menées sur la citerne, des solutions plus lourdes peuvent être imaginées, mais nous pensons qu'elles nécessitent une étude hydrogéologique plus fine (caractérisation géochimique des sources, traçage de la source de la Muscadière...).

A ce stade, on peut évoquer des solutions comme :

- Captage de la source de la Muscadière ;
- Mise en place de drains siphons ou de drains horizontaux dans l'église.

De tels travaux, s'ils s'avèrent nécessaires, pourront être envisagés en priorité 3.

7.2 TRAVAUX DE PRIORITE 2

7.2.1 Confortement de la nef

En ce qui concerne la nef, il importe de réduire l'impact de l'effort appliqué par le basculement du massif sur la partie est de la voûte ; on proposera donc :

- La mise en place de contreforts en béton armé extérieurs à la façade, solidarités à cette dernière et au massif par des ancrages. Pour des raisons esthétiques, ces contreforts pourront être recouverts par des moellons calcaires.

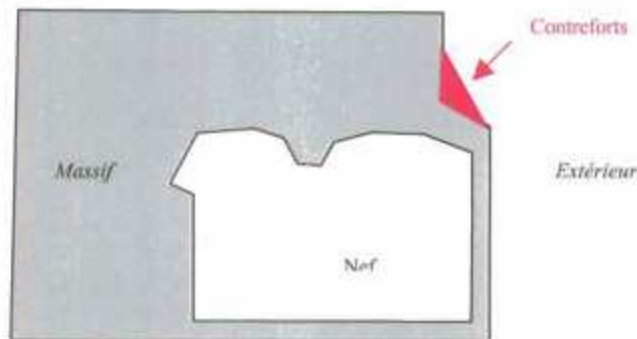


Fig. 26 - Principe de confortement de la nef par l'intermédiaire de contreforts.

- A défaut, dans les secteurs où la mise en place de ces contreforts est impossible du fait de la géométrie de l'édifice, on procèdera à un boulonnage incliné de la partie Est de la voûte depuis l'intérieur de l'église. Cette opération est délicate à réaliser, c'est pourquoi on préférera la solution des contreforts.

En ce qui concerne la partie centrale de la voûte jusqu'aux deux piliers:

- Clouage vertical depuis l'intérieur de l'église de la voûte de la nef sur un secteur compris entre les piliers et la coupe XY (voire plus près du parement selon les résultats du dimensionnement).

En ce qui concerne les piliers (saillants et isolés), il est nécessaire de compenser les pertes de matière observées à la base des chapiteaux. On procèdera donc sur la partie haute des piliers à la mise en place d'un béton projeté sur un treillis soudé préalablement épinglé sur le pilier. Certaines arcades du triforium notamment celles situées directement à l'Est du pilier saillant nord devront faire l'objet du même traitement en raison de leur déchaussement. Le béton projeté sera teinté de manière à imiter la roche.

7.2.2 Confortement de la galerie Sud :

- **La voûte de la galerie sud** présentant une très forte densité de fracturation notamment dans sa partie externe, il est indispensable de procéder à une opération de **boulonnage incliné depuis l'intérieur de la galerie**. Pour améliorer la stabilité de la galerie, il est nécessaire d'envisager en complément **la mise en place d'un béton projeté** sur un treillis soudé épinglé au rocher. Le béton sera teinté de manière à imiter la roche.

En ce qui concerne les effets de compression perceptibles sur les parements de la galerie, plusieurs solutions sont envisageables :

- **Elargissement du parement nord** de manière à limiter les effets de la compression sur celui-ci. D'après les observations faites sur place, le parement maçonné pourrait être élargi d'environ 80 cm et devenir ainsi tangent à l'ouverture sur la nef.
- **Création d'un parement maçonné au niveau de la porte** avec éventuellement réduction de sa section si les conditions de sécurité l'autorisent (issue de secours ?). A défaut, la mise en place d'une **arche en maçonnerie** du même type que celle existant dans la cave paraît être une solution envisageable.

7.2.3 Confortement de la cave :

Pour ce secteur, quatre actions sont à réaliser :

- **Injection du diverticule** situé au fond de la cave depuis la surface, à l'aide d'un mortier de ciment ou de sable complété par un coulis de clavage ; préalablement, on fermera l'ouverture du diverticule sur la cave à l'aide d'un petit ouvrage en maçonnerie. La méthode adoptée sera la même que pour le diverticule du transept.
- **Renforcement des appuis centraux** en créant un mur en maçonnerie ou en B.A. entre le pilier saillant et le pilier isolé qui montrent tous les deux des traces de compression ;
- **Clouage du rocher constituant la façade extérieure** perpendiculairement à la direction de la fissure n°48. Toute la zone de rocher comprise entre le pilier en béton armé n° 49 et la paroi nord de la cave est concernée par cette opération.
- En complément de l'opération de clouage, il paraît nécessaire de **renforcer le pilier n°49** qui est fissuré en doublant sa section porteuse vis à vis du surplomb rocheux.

7.3 TRAVAUX DE PRIORITE 3 (SALLE DES SARCOPHAGES)

Il est nécessaire de renforcer la paroi qui sépare la nef de la salle des sarcophages. A cet effet on procédera à la **construction d'un mur en béton armé** pour combler le vide existant sur cette paroi au-dessus de l'ossuaire de la nef. Pour des raisons esthétiques, on pourra avoir recours à un habillage de ce mur avec des moellons calcaires.

Dans un deuxième temps, il sera nécessaire de **procéder à un boulonnage incliné de la voûte de la salle des sarcophages** immédiatement à l'arrière de ce mur jusqu'au niveau de la discontinuité n°43, c'est à dire à peu près jusqu'à mi-voûte et intégrant latéralement les fissures n°36 à 40.

Conclusion

Au terme des investigations menées par le BRGM dans le cadre d'un diagnostic global de stabilité de l'église d'Aubeterre, les conclusions peuvent être les suivantes :

D'un point de vue mécanique, les simulations numériques et les observations de terrain indiquent que les secteurs de l'église les plus sollicités, en terme de contraintes, sont le **transept nord, la partie externe de la voûte de la nef, la façade extérieure, le couloir sud et la séparation nef/salle des sarcophages**. Bien qu'apparemment modérément sollicités, les têtes des piliers de la nef subissent également des déplacements.

En terme d'altération, trois grands types de phénomènes ont été dénombrés : **les dissolutions**, les **altérations liées à des concentrations de sel** et les **altérations biologiques**. Face à ces facteurs dégradants, la pierre d'Aubeterre est apparue de qualité hétérogène et les échantillons prélevés permettent de distinguer deux faciès de durabilité distincte.

La lutte contre les phénomènes d'altération passe par un **confinement du site** et par une **maîtrise des écoulements d'eau permanents dans l'église**. Il est ainsi recommandé de procéder à une reconnaissance puis à un captage rigoureux de la citerne de l'église dont le régime d'alimentation reste obscur. Cette disposition précèdera l'éventuelle mise en œuvre de méthodes de drainage plus lourdes et nécessitant des études complémentaires.

Les orientations en terme de confortement sont évoquées sous forme de priorité d'action en fonction du degré d'urgence à réaliser les travaux. Ils concerneront en priorité le transept nord dont l'état de dégradation est très avancé, les travaux de purge des parois de l'église pour assurer la sécurité des visiteurs ainsi que les travaux simples d'assainissement. En première priorité, il est également nécessaire d'installer un système d'auscultation dans la nef.

Dans des phases ultérieures, les travaux concerneront la nef, le couloir sud, la cave du transept et la salle des Sarcophages.

Liste bibliographique

BATIGEOCONSEIL : Eglise monolithe d'Aubeterre sur Dronne – Rapport d'auscultation de l'ouvrage – 23 avril 1992.

DE BEAUCOURT F., PAULY J.P., JATON C. : L'église monolithe d'Aubeterre sur Dronne – Article paru dans le hors série de la revue Monuments historiques en 1975 – CRPG; CREO

BIENIAWSKI Z.T. - Engineering rock mass classifications. 1989.

CRMH, cellule de documentation – recensement : récapitulatif des travaux et études – Eglise monolithe Saint Jean d'Aubeterre - Octobre 1999

GAILLARDON E. : l'église souterraine de Saint Jean d'Aubeterre, paru dans le bulletin de la société archéologique de France - 1911.

MARCELIN V. : Eglise monolithe Saint Jean d'Aubeterre – étude de la stabilité – Rapport de projet de fin d'études EUDIL – Juin 2002

Mémoire du Congrès archéologique de France paru en 1913, p368 à 387 : « l'église d'Aubeterre »

PLATEL J.P. (1985) : Le crétaé supérieur de la Plate forme septentrionale du Bassin d'Aquitaine – stratigraphie et évolution dynamique – BRGM

TALOBRE J.A. – La mécanique des roches et ses applications. 2^{ème} ed. Dunod, Paris. 1967.

Annexe 1

**Relevé des discontinuités mécaniques observées dans
l'église d'Aubeterre
Etat des lieux en Mars 2002**

A - Paroi nord de l'entrée principale

1 : Fissure superficielle à 3 m du sol, mobilisant un bloc rocheux de 15 cm d'épaisseur, 25 cm de largeur et de 50 cm de hauteur. Sa direction est N 105° et son pendage est subvertical. Un arbuste pousse au droit de cette fissure.

2 : Réseau de fissures décimétriques à la jointure des murs maçonnés, ayant un pendage de 80° W et une direction N 335°E ; ces fissures se perdent à environ 3 m du sol.

3 : Réseau de trois fissures subverticales réparties entre 20 et 75 cm à l'Est de l'ouverture sur le transept. Leur pendage est de 80° E ; le plan de fracturation est dirigé vers le Nord-Ouest.

7 : A 8 m de l'angle nord-est de l'entrée principale, présence de blocs maçonnés qui travaillent en compression avec des joints fissurés et dilatés.

8 : Deux fissures se rejoignant à 1 m au-dessus de l'ouverture sur le transept.

9 : Fissure verticale affectant la pleine masse calcaire à 6,20 m de hauteur au-dessus du parement en maçonnerie, à 10,40 m de l'angle nord-est de l'entrée.

B - Ouverture du transept sur l'entrée principale

4 : Réseaux de fissures verticales dirigées N 100°E à 15, 50 et 60 cm de l'arrête sud-ouest de l'ouverture traduisant de la compression.. Effet d'écrasement avec desquamation de mortier, et phénomène d'écaillage de la pierre en surface.

5 : Prolongement vers l'Ouest d'une des fissures 4.

6 : A l'Ouest de l'ouverture, un réseau de 2 fissures de direction N100° et de pendage 85°W. A leur voisinage, on observe de la desquamation et de l'effritement.

C - Paroi sud de l'entrée principale

30 : Fissures à 2 m de hauteur environ, très peu ouvertes, de pendage moyen 30° E.

D - Transept Nord

10 : Départ d'un bloc de 200-300 kg en forme de dièdre limité par des fractures rejointoyées au mortier. La direction et le pendage des fractures sont : N 60° et 70° N (première fracture), N 30° à 40° et 70° S pour le deuxième, et enfin N 340° et subverticale pour le troisième.

10' : Fissure N 320° E 60° SW.

10" : Fissure reprise au mortier apparentée à la fissure 10' de pendage 60°W.

11 : Fissure subverticale de direction N 245°. Elle présente une ouverture de 2 cm et traverse la voûte dans sa quasi-totalité depuis le haut du diverticule vers le sud.

12 : Fissure de direction N 225° et de pendage 85°E.

13 : Desquamation en plaque d'une épaisseur de 10 cm.

14(≡ 9) : Large fissure (jusqu'à 4 cm d'ouverture) traversant la voûte Elle est dirigée N 210° et pente subverticalement. Elle atteint le mur maçonné au sud sans s'y propager de manière visible.

15 : Large fissure de direction N 265° très visible sur 2,50 m à partir du clocher, puis hypothétique mais prolongée par la zone 13.

16 : Réseau de fissures verticales présentant une large ouverture partant de l'ancien clocher et se prolongeant vers le Nord Ouest jusqu'à la base de la voûte. Le bloc mobilisé par ces fissures est descendu de 7 cm.

17 : Pilier saillant fissuré et totalement laminé ; forme en diabolo ; fissure de compression verticale.

E - Nef et abside

18 : Fissure subverticale de direction N 175°.

19 : Fissure de direction N 80° et de pendage 40°N. L'ouverture est d'environ 1 cm.

20 : Desquamation intensive sur le pilier saillant nord sur une hauteur de 80 cm. Il y a une libération de blocs pelliculaire de 40 cm d'épaisseur.

21 : Corniche à 7,75 m du sol, haute de 5 cm et large de 1,8 m, et qui est en voie de désagrégation (desquamation de 5 à 6 cm d'épaisseur).

22 : Desquamation au niveau de la naissance de la voûte. Des plaques de quelques centimètres, au niveau de chœur, se délitent, traduisant probablement des contraintes de traction.

23 : Fissure perpendiculaire à la direction de la nef, d'extension 2,50 m et d'ouverture 1 mm. Cette fissure correspondrait à la galerie balcon.

24 : Ecoulement d'eau avec concrétions calcitiques au droit de la zone sous cavée (d'une hauteur de 80 cm environ)

25 : Fissuration mécanique en voûte :

25' : fissures présentant une ouverture de moins d'un cm. Ces fissures ne présentent pas de rejet.

25" : fissure ayant une ouverture comprise entre 1 et 3 mm environ.

25''' : fissure dans la continuité de 25', à l'intersection de cette dernière et 25". Elle présente une ouverture de 5 à 15 mm sur une extension de 3 m environ puis se prolonge jusqu'à l'angle NE de la nef avec une ouverture inférieure à 3 mm.

Les fissures 25''' et 25''' présentent un rejet pouvant atteindre localement 1 cm. Les déplacements ont localement provoqué la chute de pierres.

F - Galerie sud

26 : Fissure verticale et de direction nord-sud traduisant des contraintes de compression. Elle s'étend sur 40 cm et présente une ouverture de 5 mm.

27 : Décollement superficiel de plaques d'épaisseur allant jusqu'à 10 cm.

28 : Fissure de traction en voûte vraisemblablement récente, de direction N 250°, présentant une ouverture millimétrique, et se situant dans un secteur très altéré.

29 : Fissure située à 30 cm de 28, avec une même direction.

30 : Dilatation des joints de mortier sur le parement ouest.

31 : Fissure de compression verticale de direction N 165° et d'ouverture de 3 à 4 mm. La partie située vers l'extérieure par rapport à cette fissure descend par rapport à la partie intérieure.

32 : Fissure subverticale, de 1,50 m d'extension et direction moyenne N 140°. Elle rejoint 31 à mi-voûte environ.

33 : "Fissure" perpendiculaire à l'axe de la galerie provenant sûrement de la fixation d'une imposte antérieure 15 cm vers l'ouest ; les barreaux en fer de la porte actuelle ont fragilisé la roche.

34 : Fissure subverticale de direction N 300° et d'ouverture millimétrique.

35 : Fissure subverticale allant vers l'extérieur, de direction N 240° sur 10 cm, puis N 300. Cette fissure se prolonge sur la masse rocheuse. Son ouverture est centimétrique.

G - Salle des sarcophages

36 : Fracture naturelle ayant rejoué mécaniquement, de direction N 240°, puis N 290° vers l'Ouest et avec une ouverture de quelques mm.

37 : Décollement de plaques de salpêtre et de roche.

38 : Fissure dirigée au N 95° et ouverte de 2 à 3 mm.

39 : Fracture naturelle ayant rejoué mécaniquement de direction N 300°. Des plaques se décollent au Nord de cette fissure.

40 : Fissure quasiment parallèle à 39 (N 310°), puis observe un changement de direction dans sa partie est (N 120°). Elle se prolonge sur la paroi sud.

41 : Dalle en béton armé enduit de mortier peu adhérent. La fissure 40 semble contourner la dalle.

42 : Fissures horizontales à l'Est de la fenêtre, pouvant libérer des plaques de 50 cm d'épaisseur.

43 : Décollement de plaques à mi-voûte.

44 : Décollement de salpêtre de 5 cm.

45 : Décollement de plaques de 15 cm.

H - Extérieur du transept Nord

46 : Fissure horizontale d'écrasement au niveau des moellons de la porte.

47 : Fissure verticale N 95° au niveau de la jointure du rocher et de la maçonnerie, et avec une ouverture millimétrique.

48 : Fissure globalement Nord Sud, débutant à la jointure du pilier en béton armé et de la partie rocheuse avec un pendage subvertical. Au-delà de 1,50 m de hauteur, elle est dirigée N 350°, et a un pendage de 75° E. Elle change de pente à 2,40 m de hauteur (63°

W). On la retrouve sur la face Est de la paroi rocheuse avec une direction N 310°. Des témoins de verre avaient été disposés le long de cette fissure, et certains se sont brisés. L'origine mécanique ou anthropique des bris de témoins n'a pu être établie.

49 : Basculement vers la vallée de la masse rocheuse située en dessous de la fissure 48.

50 : Fissure dirigée vers l'Ouest de 60 cm d'extension et de 2 mm d'ouverture qui intercepte perpendiculairement la fissure 48.

51 : Fissures subverticales mobilisant des blocs d'une dizaine de kg sur le bloc 49.

52 : Fissure de compression verticale affectant un pilier en béton armé.

I - Cave

53 : Fissure naturelle

54 : Fissure naturelle de direction N 295°.

55 : Fissure de direction N 240°.

56 : Fissure de direction N 245° et d'extension 2.40 m.

57 : Fissure de direction N 290° et d'extension 60 cm environ.

58 : Fissure de direction N 125° et de 2 m d'extension.

59 : Fissure de direction N 230°.

60 : Cavité voûtée remblayée d'une hauteur de 1 m et d'une largeur de 1.70 m.

61 : Fissure verticale de compression sur le pilier saillant. Elle présente une ouverture millimétrique et une extension de 40 cm.

62 : Fissure de direction N 215° et de 1 à 2 cm d'ouverture. Elle se prolonge sur la paroi nord de la cave avec un pendage de 60° E, puis sur la paroi Est.

63 : Fissure verticale de 60 cm sur le pilier est, de pendage 40° W et de 3 à 4 mm d'ouverture.

64 : Fissure sur la paroi nord, de pendage 40° W, et d'extension 1 m.

65 : Fissure de 70 cm et de pendage 45° W, se situant à une trentaine de cm de l'angle sud-est de la paroi.

66 : Fissure verticale d'ouverture millimétrique se situant sur la paroi sud, à 2,5 m de l'angle S-E.

J - Entrée de la galerie sud

67 : Fissure de pendage 60° S, d'ouverture millimétrique et de 1 m d'extension sur la paroi rocheuse. Elle se prolonge sous la voûte de l'entrée.

68 : Confère fissure 35.

69 : Fissure de pendage 30° N et d'extension 60 cm qui rejoint la fissure 35, 60cm au dessus de la voûte.

70 : Fissure de pendage 70° E sur la paroi sud de l'entrée de la galerie. Elle part de 1,75 m du sol, présente une ouverture millimétrique, et se prolonge jusqu'à mi-voûte.

71 : A 50 cm au Sud de l'entrée, fissure subverticale montant jusqu'à la terrasse. A une hauteur de 7,10 m, elle intercepte une fissure subhorizontale de 1,20 m d'extension.

72 : A 1,90 m de l'entrée, fissure verticale débutant à 1.60 m du sol et d'extension non connue.

73 : Fissure horizontale mobilisant un bloc de faible épaisseur. Elle rejoint la fissure 72 à une hauteur de 6,80 m.

K - Triforium

Galerie nord

74 : A 3 m de la partie murée, fissure subhorizontale comblée au mortier.

75 : Fissures en pied et en tête sur les piliers les plus à l'Est.

76 : Fissure subverticale d'ouverture millimétrique rejoignant à son extrémité basse la fissure 74.

77 : Fissure à léger pendage Est et rejoignant à l'aplomb de la troisième arcade en partant de l'Est, la fissure 74.

Galerie sud

78 : Fissure partant de l'angle N-E se prolongeant sur le plafond et restant parallèle à la paroi ouest, puis à la paroi sud ; forte présence de racines dans cette fissure.

79 : Fissure de 1,70 m d'extension partant de la première arcade en partant de l'Est. Cette fissure traduit des contraintes de cisaillement.

L - Boyau

80 : Fissure verticale d'ouverture millimétrique à 2 m de la porte murée sur la partie droite du boyau (lorsque l'on descend). Elle se prolonge jusqu'à la cavité 81.

81 : Cavité au plafond remblayée avec du "tout venant" à 3,3 m de la porte. Elle présente une ouverture de 0,8 m et une hauteur de 2,5 m.

82 : Galerie en partie remblayée menant à la citerne. A son entrée, elle mesure environ 1,75 m de hauteur, 0,6 m de largeur et 3 m environ de profondeur.

M - Crypte

83 : A 1,4 m de l'abside, sur la paroi nord, fissure à 2 m du sol traduisant de la compression et de la desquamation.

84 : Fissure à 3 m de l'abside sur la paroi nord, sensiblement à la même hauteur.

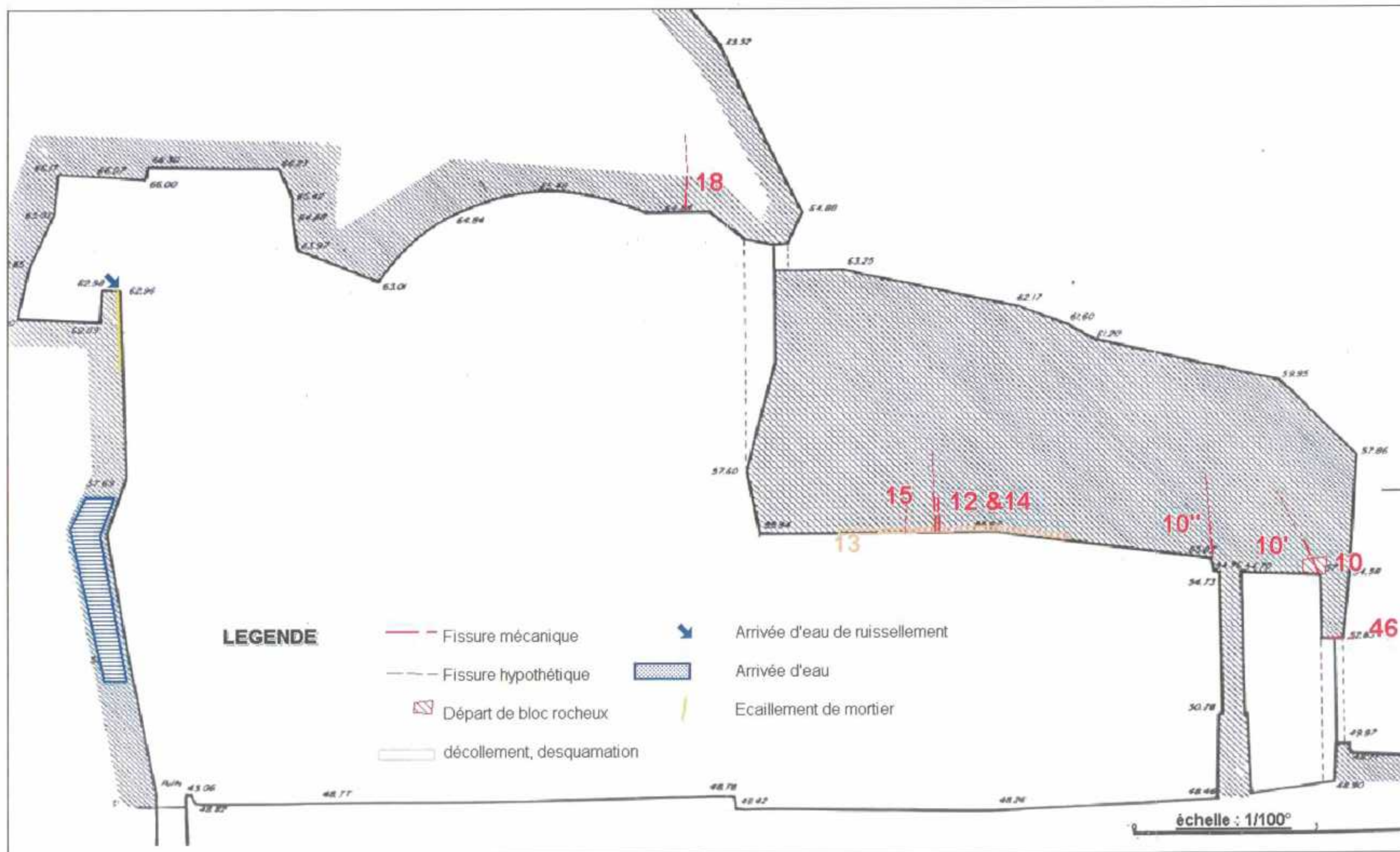
85 : Le linteau de l'arcade centrale est fissuré horizontalement.

86 : Fissure superficielle de 10 cm sur la paroi nord de l'abside, traduisant un vieillissement de la roche.

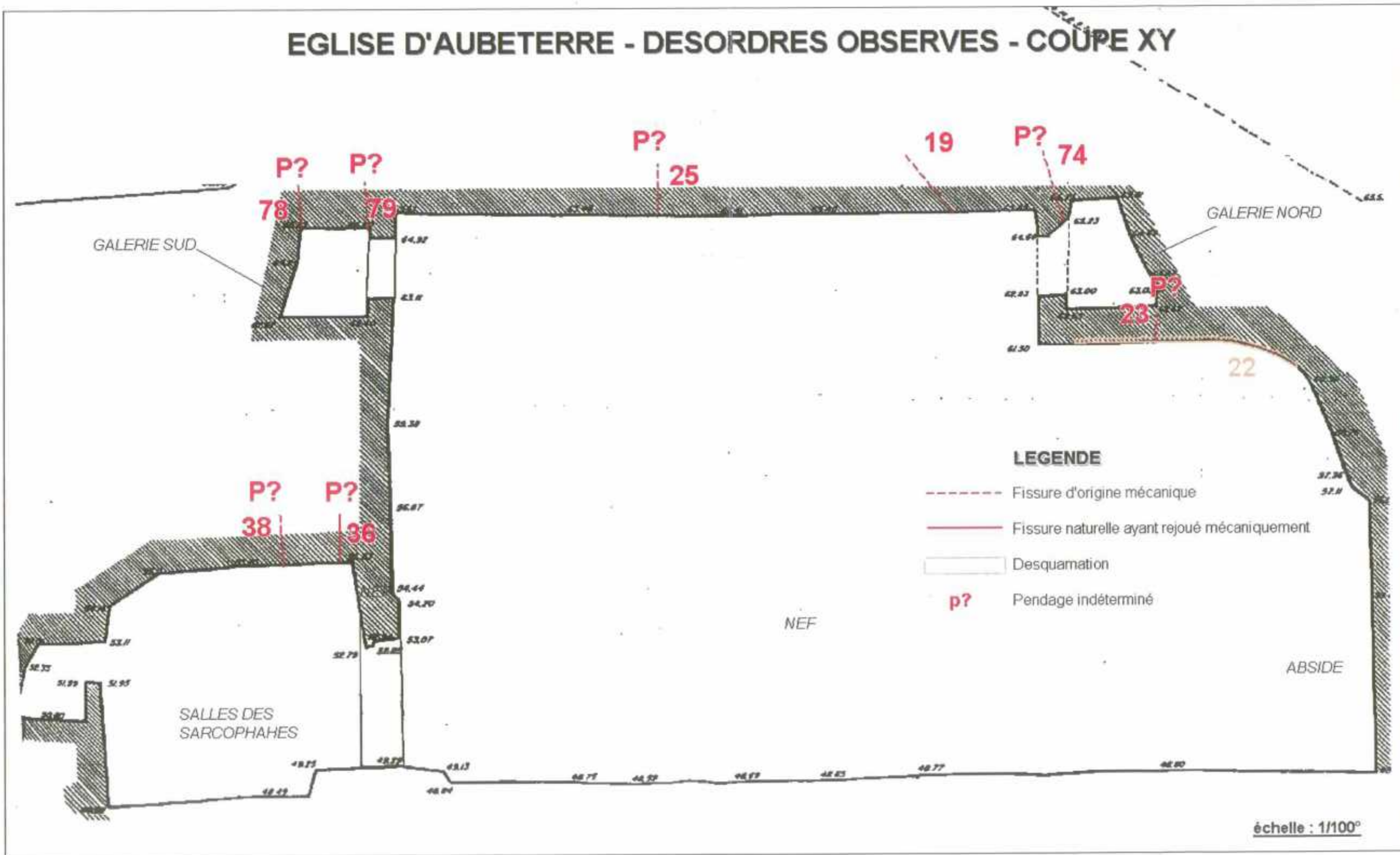
Annexe 2

Vue en coupe des discontinuités

EGLISE D'AUBETERRE - DESORDRES OBSERVES - COUPE IJ



EGLISE D'AUBETERRE - DESORDRES OBSERVES - COUPE XY



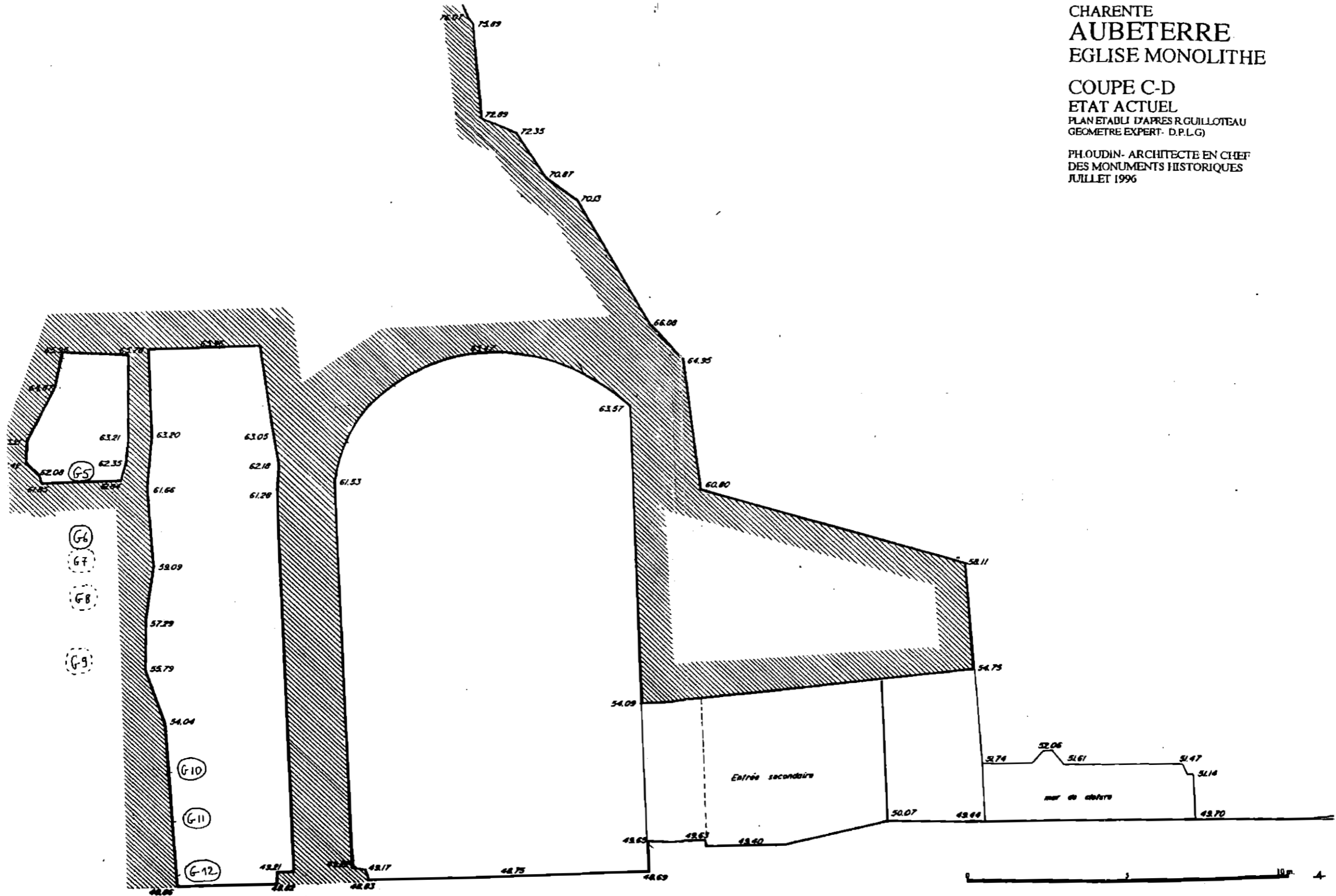
Annexe 3

Plan de localisation des prélèvements par carottage

CHARENTE
 AUBETERRE
 EGLISE MONOLITHE

COUPE C-D
 ETAT ACTUEL
 PLAN ETABLI D'APRES R.GUILLOTEAU
 GEOMETRE EXPERT - D.P.L.G)

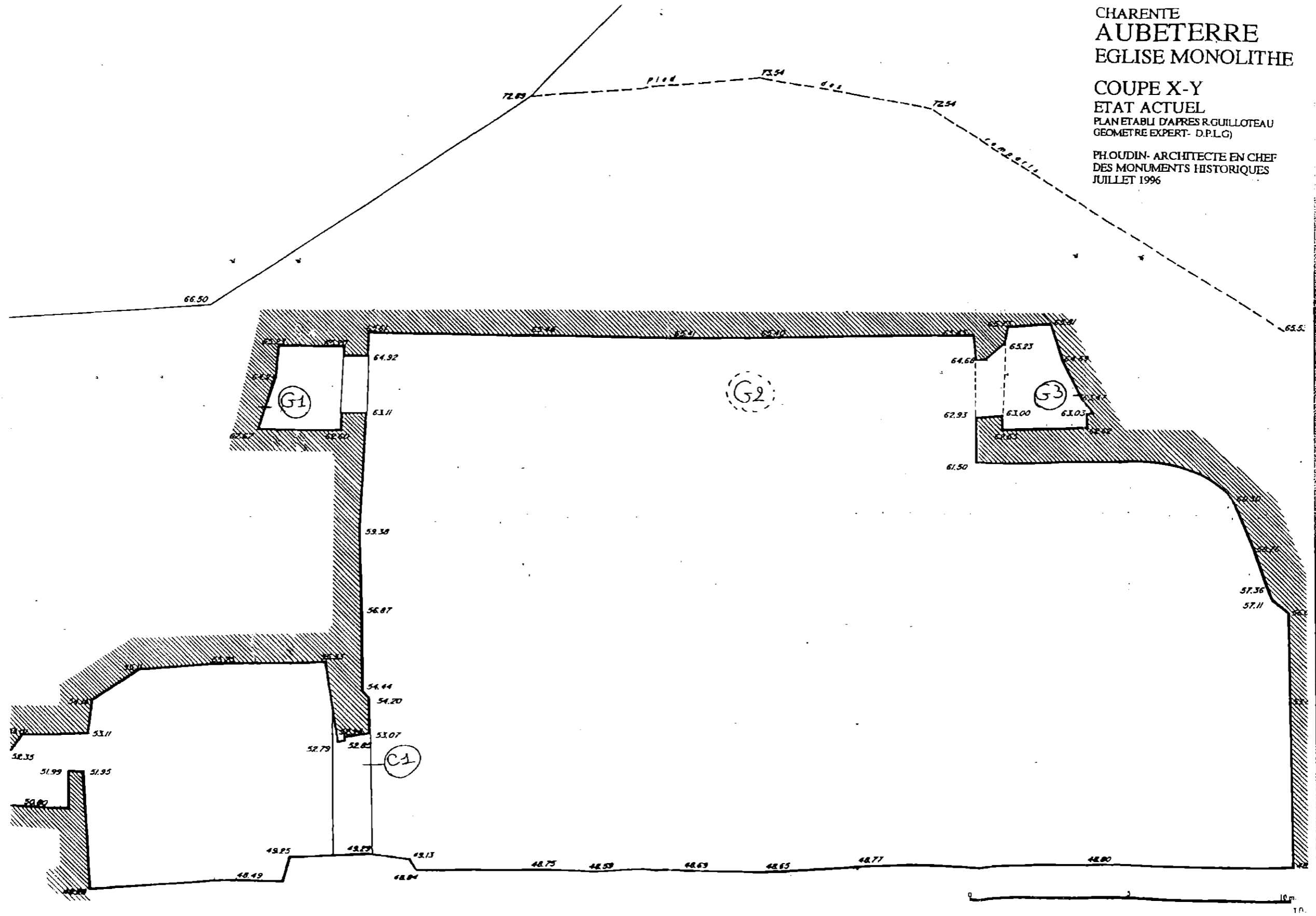
PH.UDIN- ARCHITECTE EN CHEF
 DES MONUMENTS HISTORIQUES
 JUILLET 1996



CHARENTE
 AUBETERRE
 EGLISE MONOLITHE

COUPE X-Y
 ETAT ACTUEL
 PLAN ETABLI D'APRES R.GUILLOTEAU
 GEOMETRE EXPERT- D.P.L.G)

PH. OUDIN- ARCHITECTE EN CHEF
 DES MONUMENTS HISTORIQUES
 JUILLET 1996



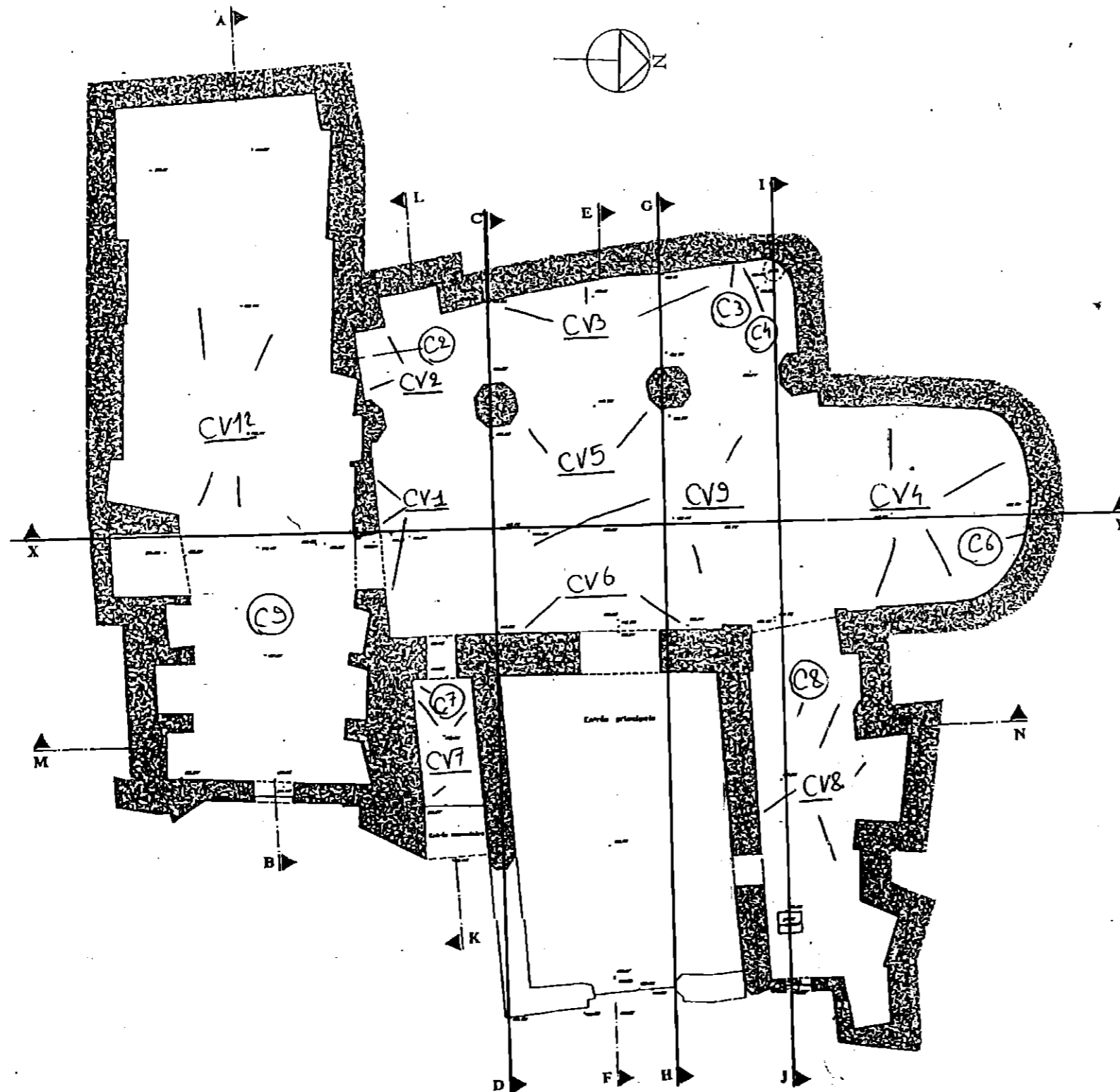
Annexe 4

Plan de localisation des échantillons de croûtes

CHARENTE
AUBETERRE
 EGLISE MONOLITHE

PLAN AU SOL
 ETAT ACTUEL
 TRAVAUX REALISES EN 1995/1996
 ET TRAVAUX PROJETES
 (PLAN ETABLI D'APRES R.GUILLOTEAU
 GEOMETRE EXPERT - D.P.L.G)

PH. LOUDIN - ARCHITECTE EN CHEF
 DES MONUMENTS HISTORIQUES
 JUILLET 1996



Manquent coupes K-L et X-Y

1/200

Annexe 5

Résultats des essais de résistance mécanique

Eglise troglodyte d'AUBETERRE

Tableau de résultats d'essais en laboratoire

N° éch.	RC MPa	σ_t N/mm ²
E5 - 112	11.8	
G3 - 113	10.5	
G6 - 114	8.3	
G7 - 115	13.5	
G8 - 116	11.0	
G9 - 117	18.8	
G10 - 118	22.3	
G12 - 119	13.9	
E8 - 1 perpendiculaire	27.1	
E8 - 2 perpendiculaire	48.8	
E8 - 3 parallèle	22.7	
E8 - 4 parallèle	36.8	
F1 - 111		6.8
G2 - 110		1
G1 - 108		3.8
G11 - 109		4.8

LEGENDE :

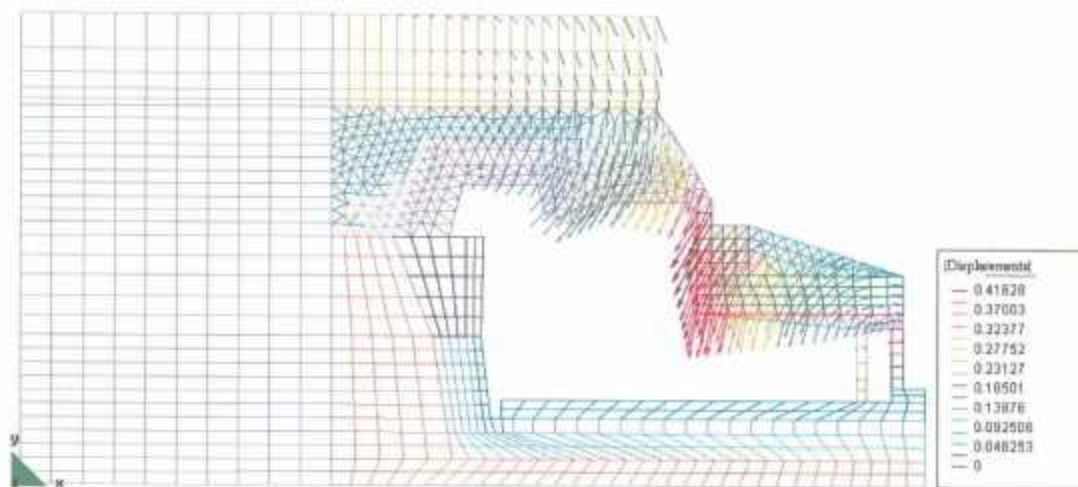
RC : résistance à la compression uniaxiale

σ_t : module de rupture en flexion

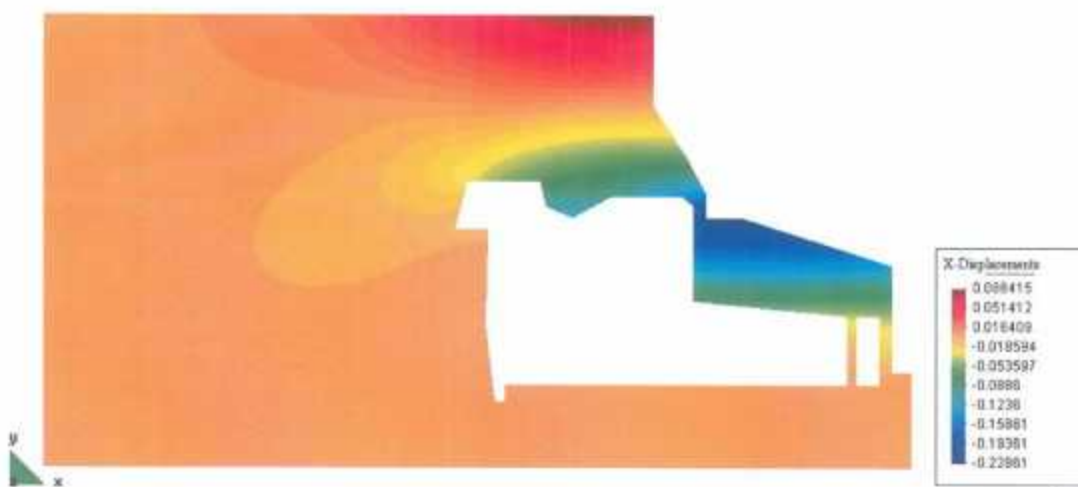
Remarque : les essais de flexion ont été réalisés sur des éprouvettes dont les dimensions sont hors normes (prismes de 32*32*110 mm au lieu de 70*70*280 mm)

Annexe 6

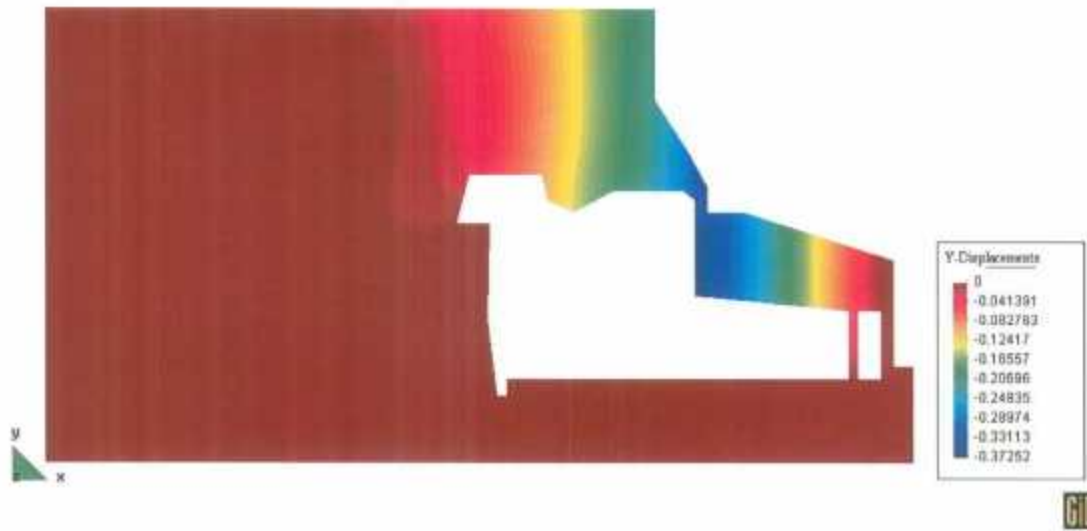
Résultats des simulations 2D



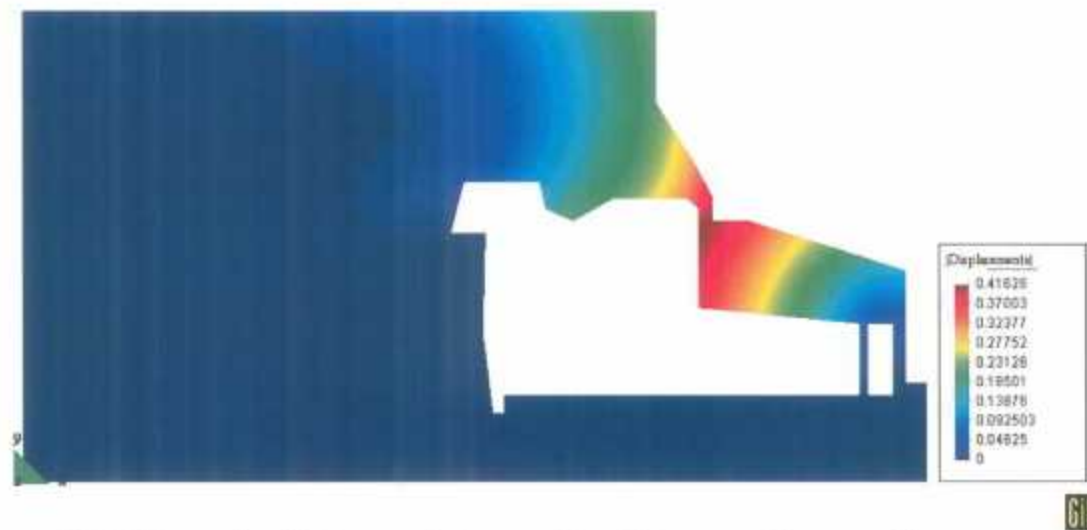
Annexe 6.1 – Vecteurs déplacements (excavation 2D sans renforcement)



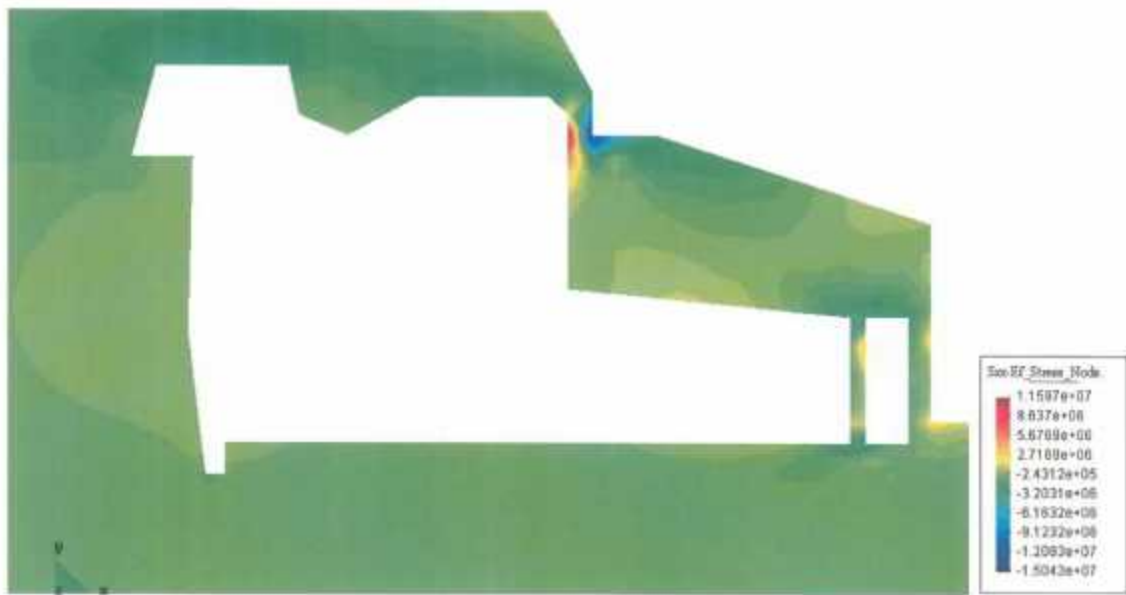
Annexe 6.2 – Déplacements horizontaux (excavation 2D sans renforcement)



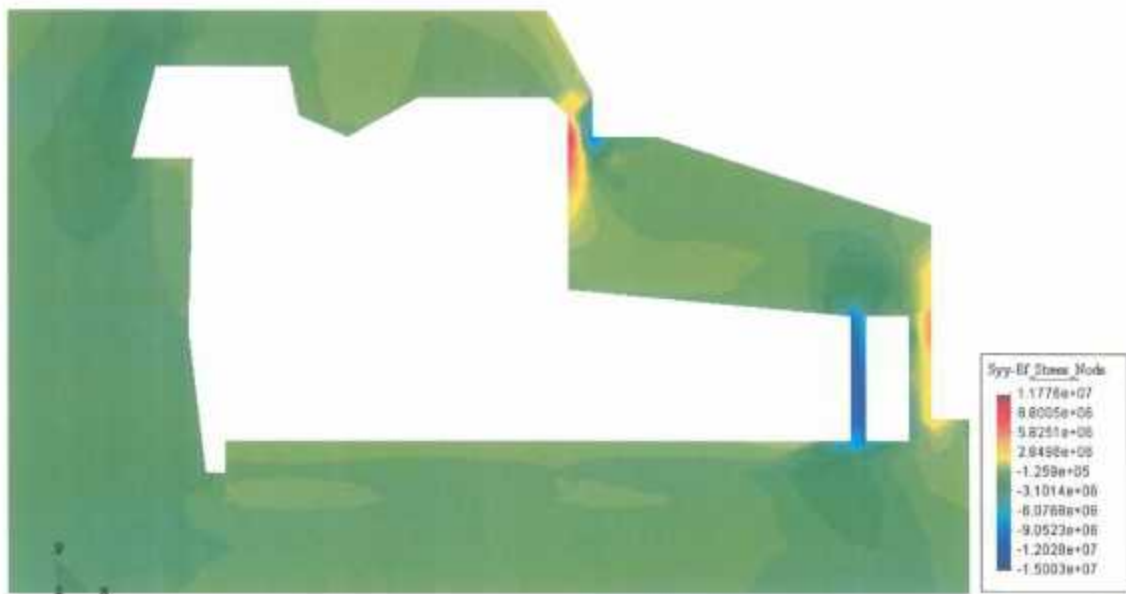
Annexe 6.3 – Déplacements verticaux (excavation 2D sans renforcement)



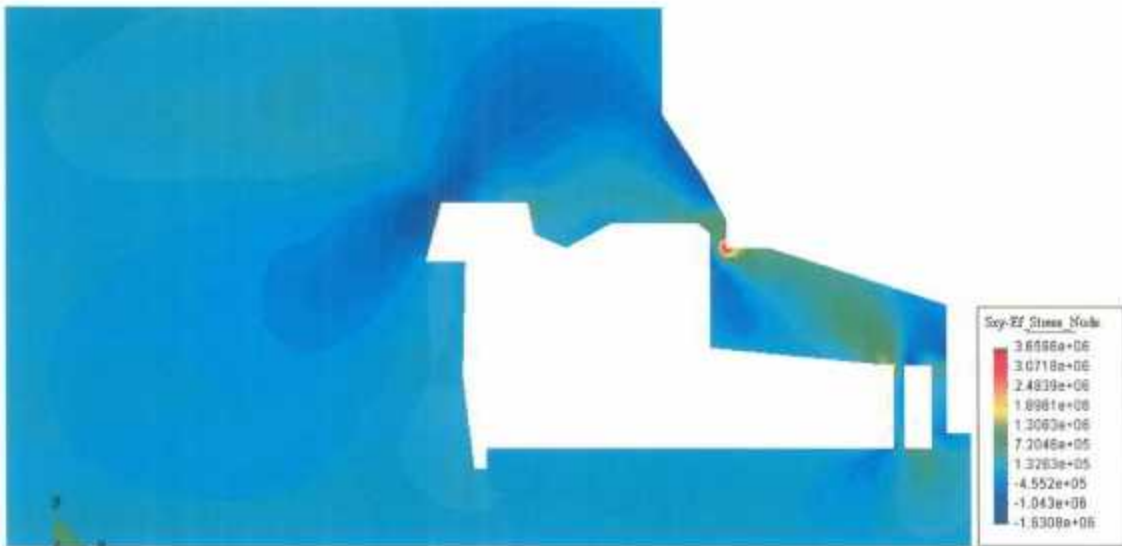
Annexe 6.4– Norme des déplacements (excavation 2D sans renforcement)



Annexe 6.5 – Contraintes horizontales (excavation 2D sans renforcement)



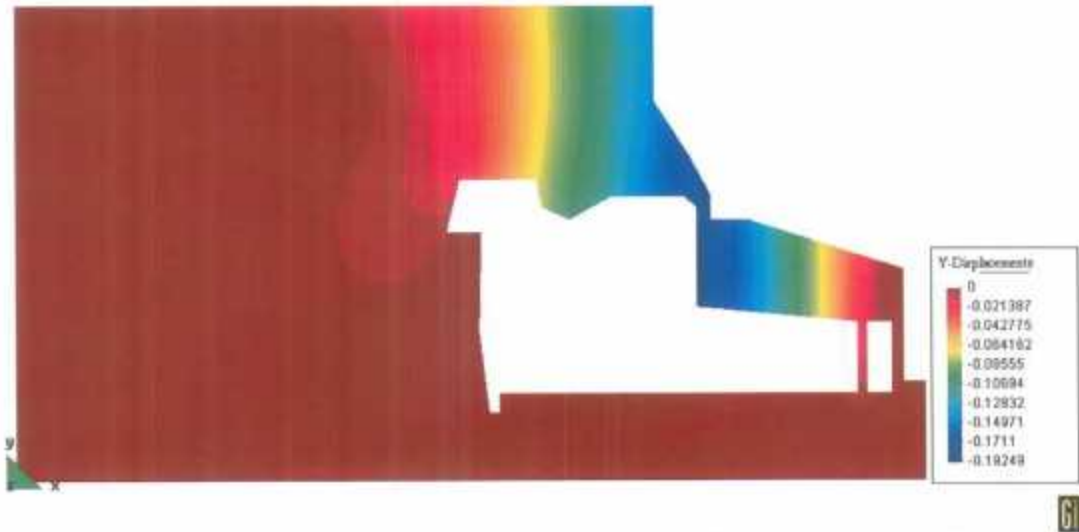
Annexe 6.6 – Contraintes verticales (excavation 2D sans renforcement)



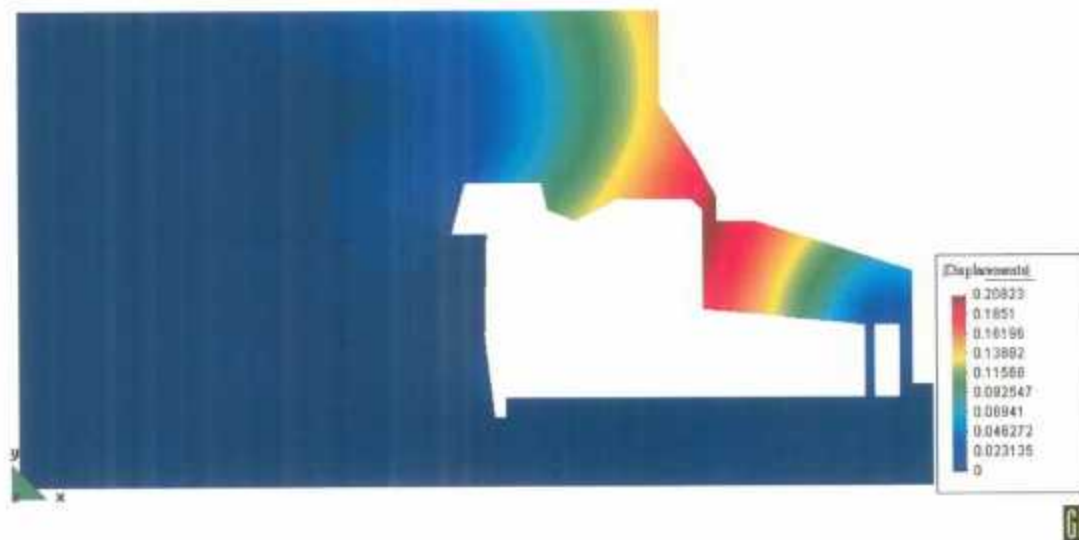
Annexe 6.7 – Contraintes de cisaillement (excavation 2D sans renforcement)



Annexe 6.8 – Déplacements horizontaux (excavation 2D, renforcement secteur 1)



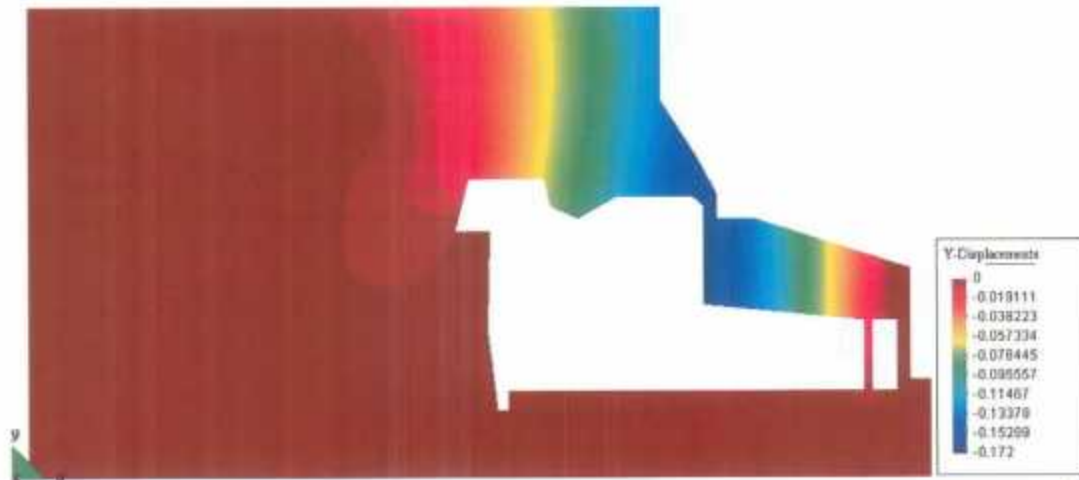
Annexe 6.9 – Déplacements verticaux (excavation 2D, renforcement secteur 1)



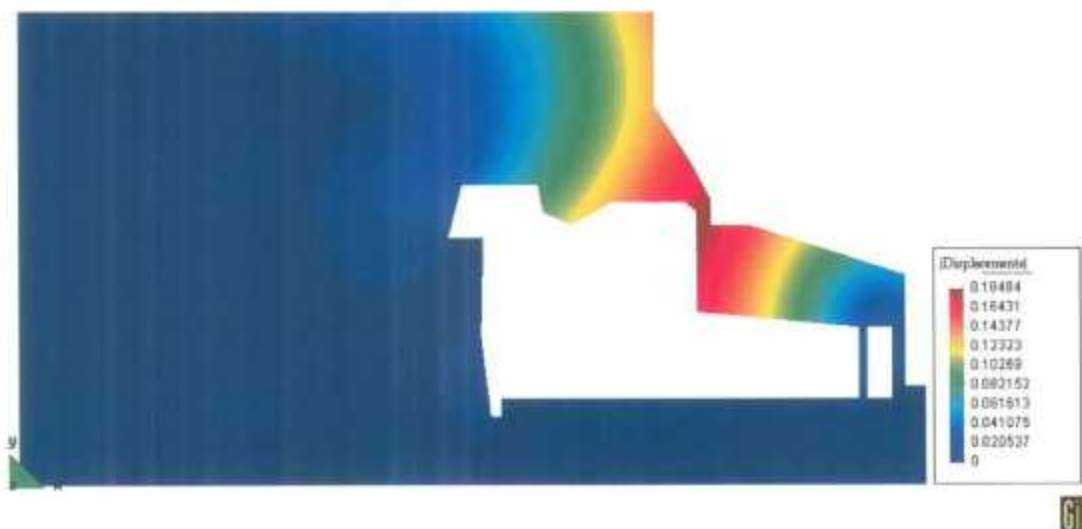
Annexe 6.10 – Norme des déplacements (excavation 2D, renforcement secteur 1)



Annexe 6.11 – Déplacements horizontaux (excavation 2D, renforcement secteurs 1+2)



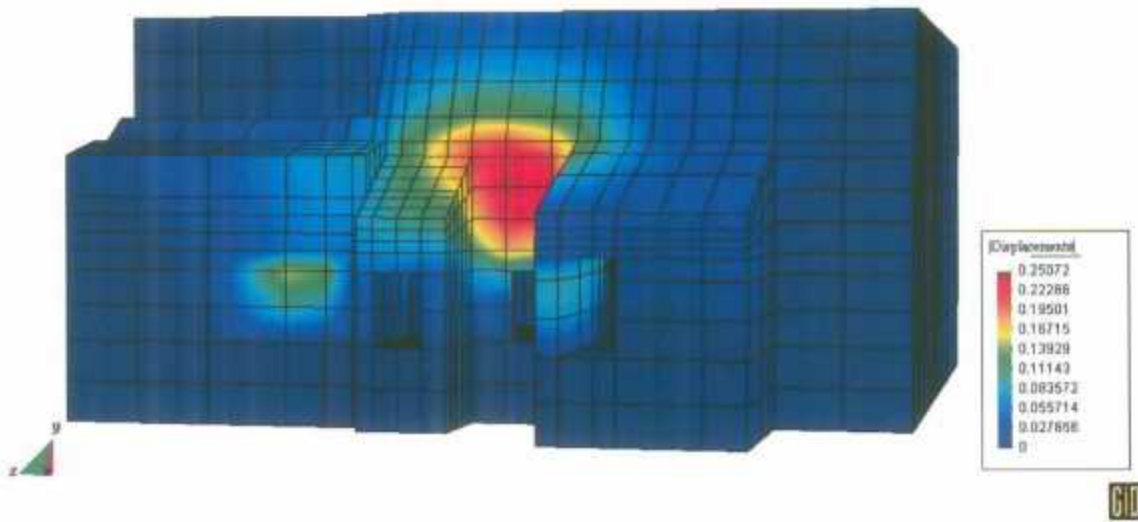
Annexe 6.12 – Déplacements verticaux (excavation 2D, renforcement secteurs 1+2)



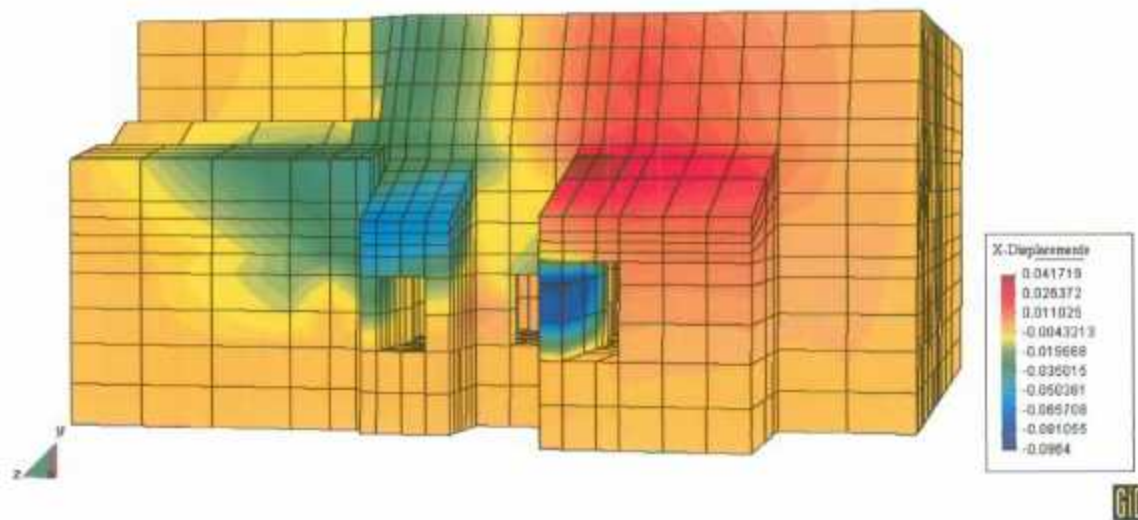
Annexe 6.13 – Norme des déplacements (excavation 2D, renforcement secteurs 1+2)

Annexe 7

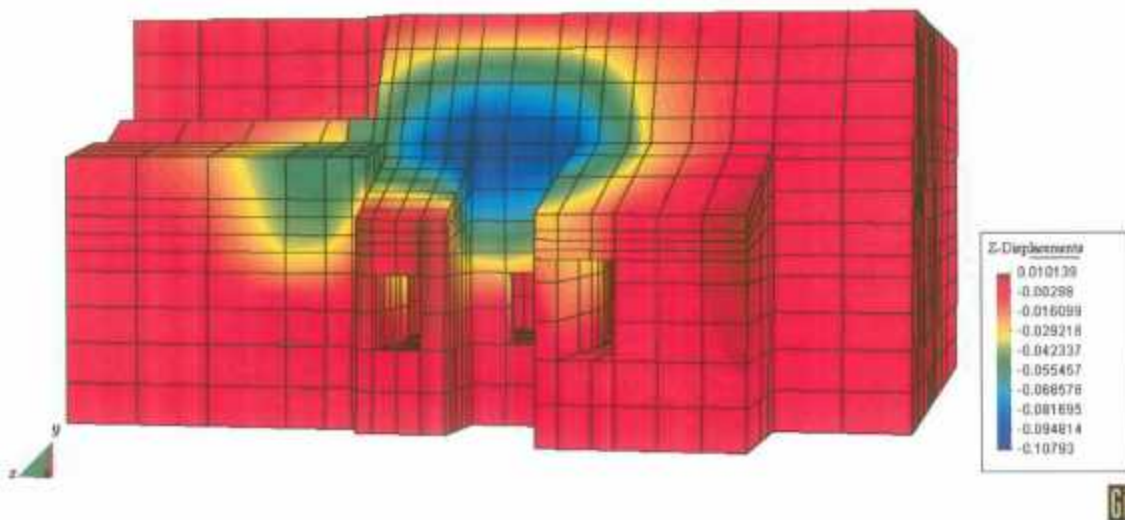
Résultats de la simulation 3D



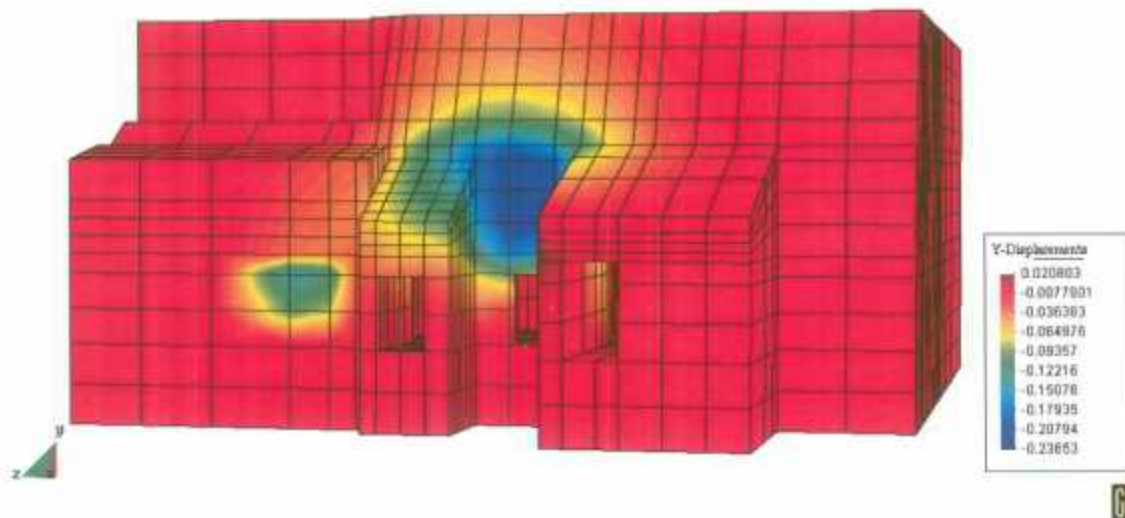
Annexe 7.1 – Norme des déplacements calculés : vue en perspective (façade)



Annexe 7.2 – Déplacements horizontaux calculés (direction x) : vue en perspective (façade)



Annexe 7.3 – Déplacements horizontaux calculés (direction z) : vue en perspective (façade)



Annexe 7.4 – Déplacements verticaux calculés (direction y) : vue en perspective (façade)



Annexe 7.5 – Déplacements horizontaux calculés (direction x) : coupe pilier nord



Annexe 7.6 – Déplacements horizontaux calculés (direction z) : coupe pilier nord



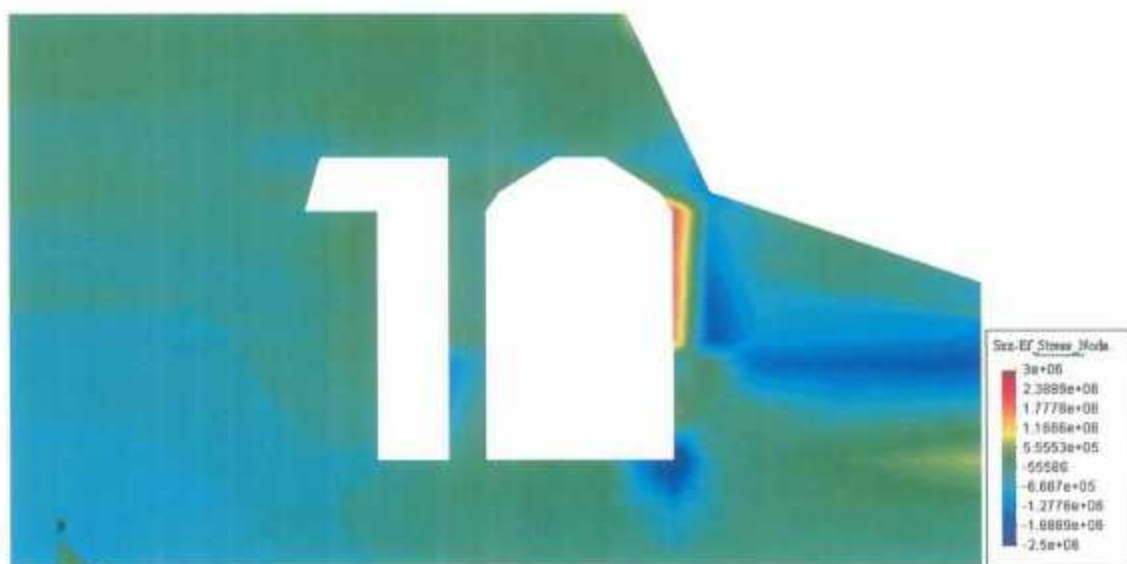
Annexe 7.7 – Déplacements verticaux calculés (direction y) : coupe pilier nord



Annexe 7.8 – Norme des déplacements calculés : coupe pilier nord



Annexe 7.9 – Contraintes horizontales calculées (direction x) : coupe pilier nord

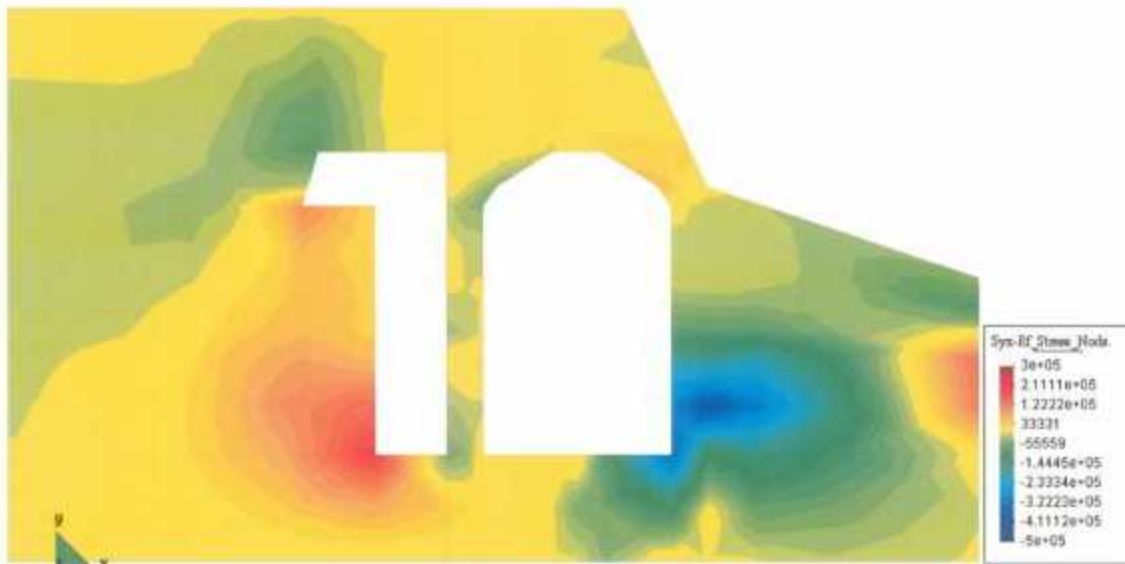


Annexe 7.10 – Contraintes horizontales calculées (direction z) : coupe pilier nord



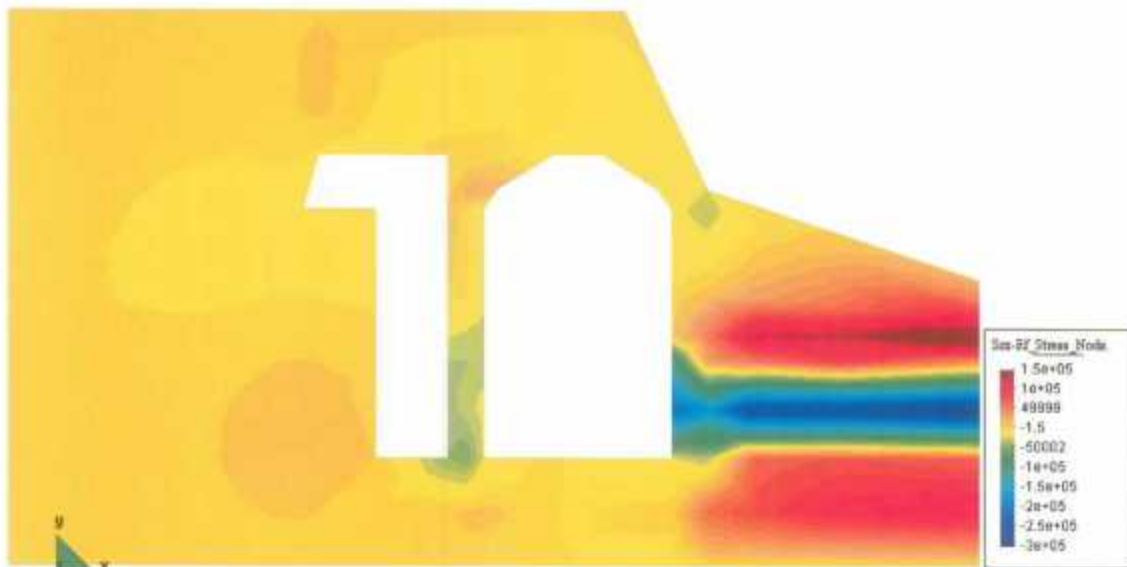
610

Annexe 7.11 – Contraintes verticales calculées (direction y) : coupe pilier nord

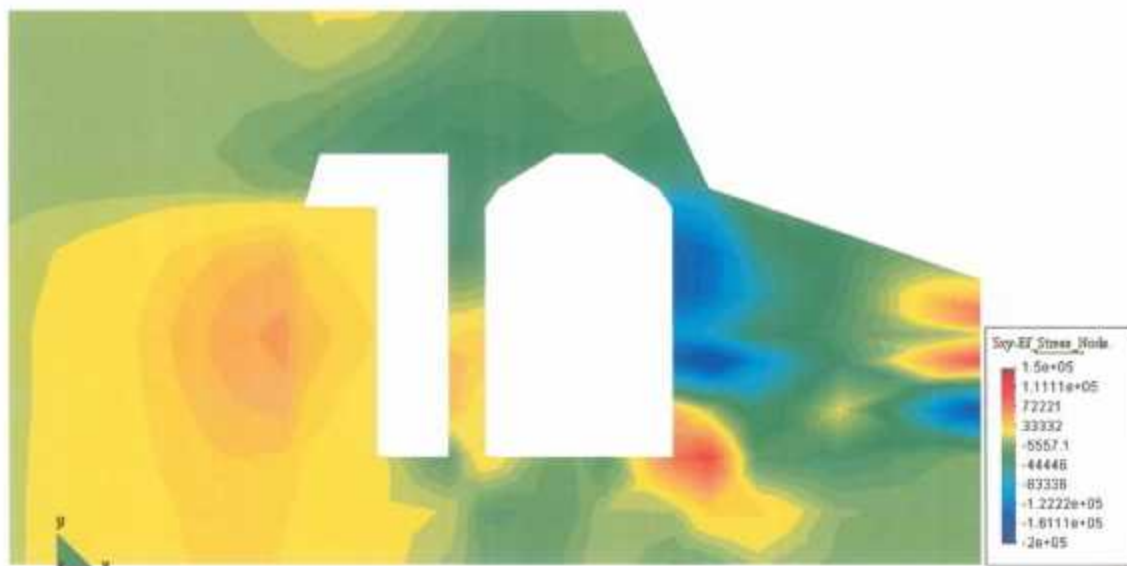


610

Annexe 7.12 – Contraintes de cisaillement calculées (plan yz) : coupe pilier nord



Annexe 7.13 – Contraintes de cisaillement calculées (plan xz) : coupe pilier nord



Annexe 7.14 – Contraintes de cisaillement calculées (plan xy) : coupe pilier nord





Annexe 7.15 – Déplacements horizontaux calculés (direction x) : coupe pilier sud



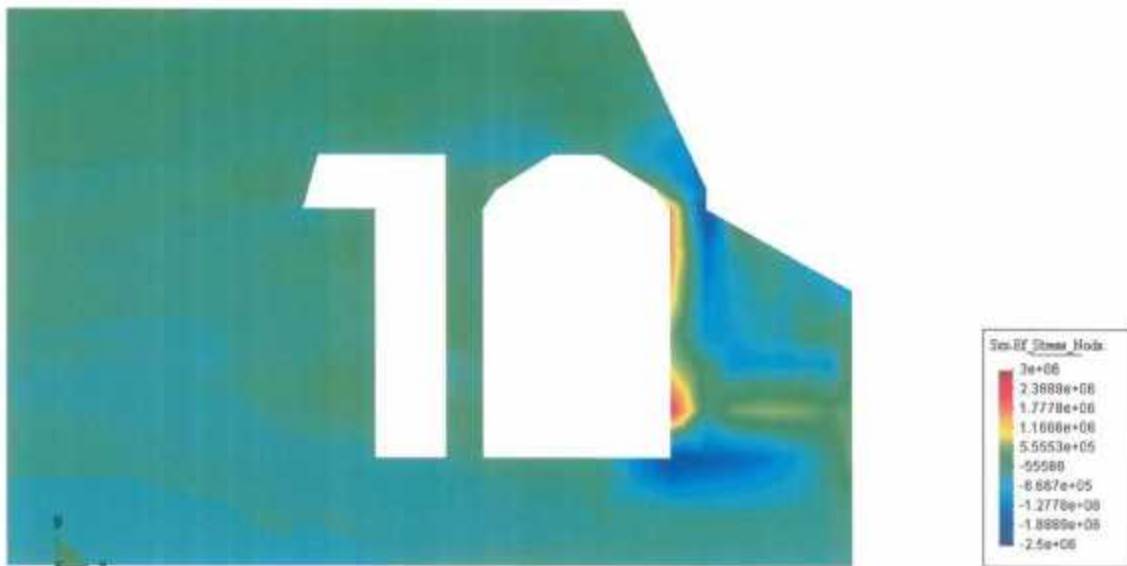
Annexe 7.16 – Déplacements horizontaux calculés (direction z) : coupe pilier sud



Annexe 7.17 – Déplacements verticaux calculés (direction y) : coupe pilier sud



Annexe 7.18 – Norme des déplacements calculés : coupe pilier sud



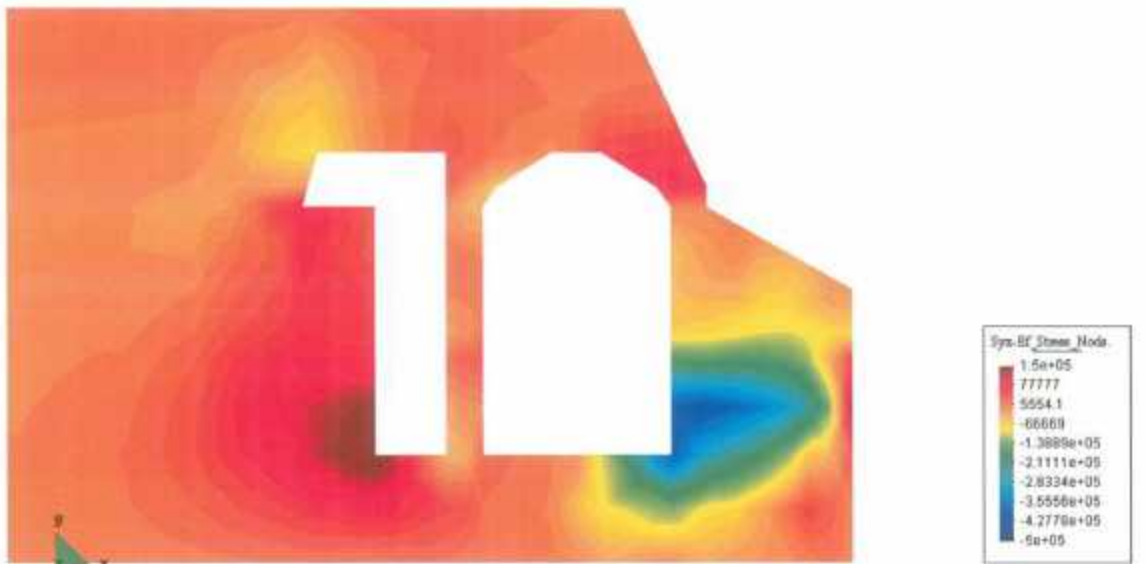
Annexe 7.19 – Contraintes horizontales calculées (direction x) : coupe pilier sud



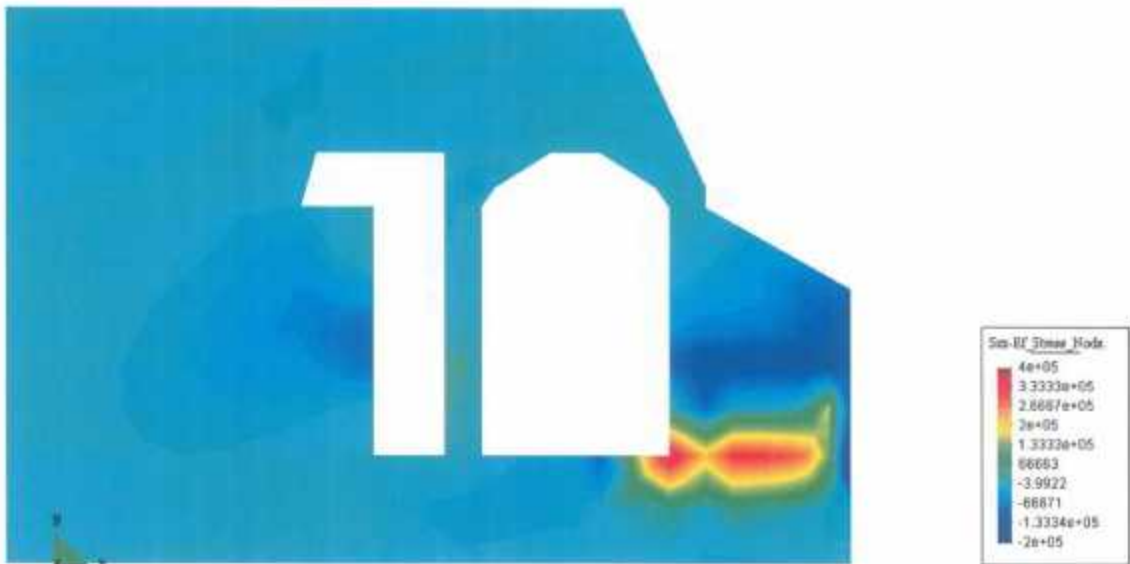
Annexe 7.20 – Contraintes horizontales calculées (direction z) : coupe pilier sud



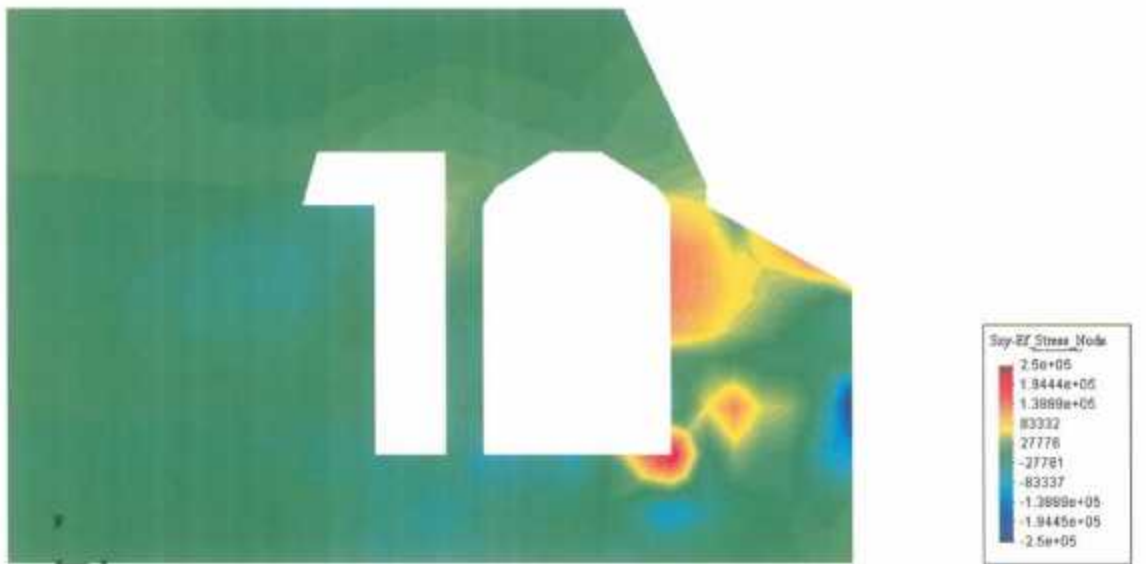
Annexe 7.21 – Contraintes verticales calculées (direction y) : coupe pilier sud



Annexe 7.22 – Contraintes de cisaillement calculées (plan yz) : coupe pilier sud



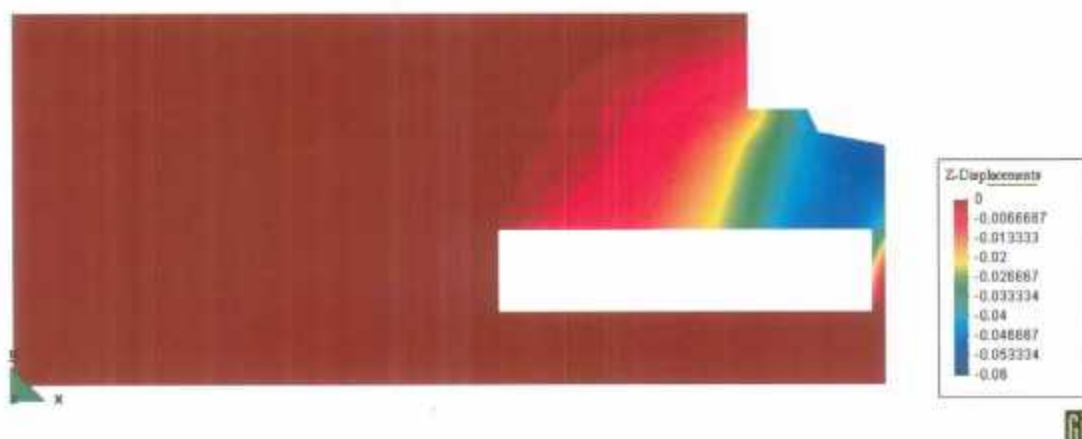
Annexe 7.23 – Contraintes de cisaillement calculées (plan xz) : coupe pilier sud



Annexe 7.24 – Contraintes de cisaillement calculées (plan xy) : coupe pilier sud



Annexe 7.25 – Déplacements horizontaux calculés (direction x) : coupe salle des sarcophages



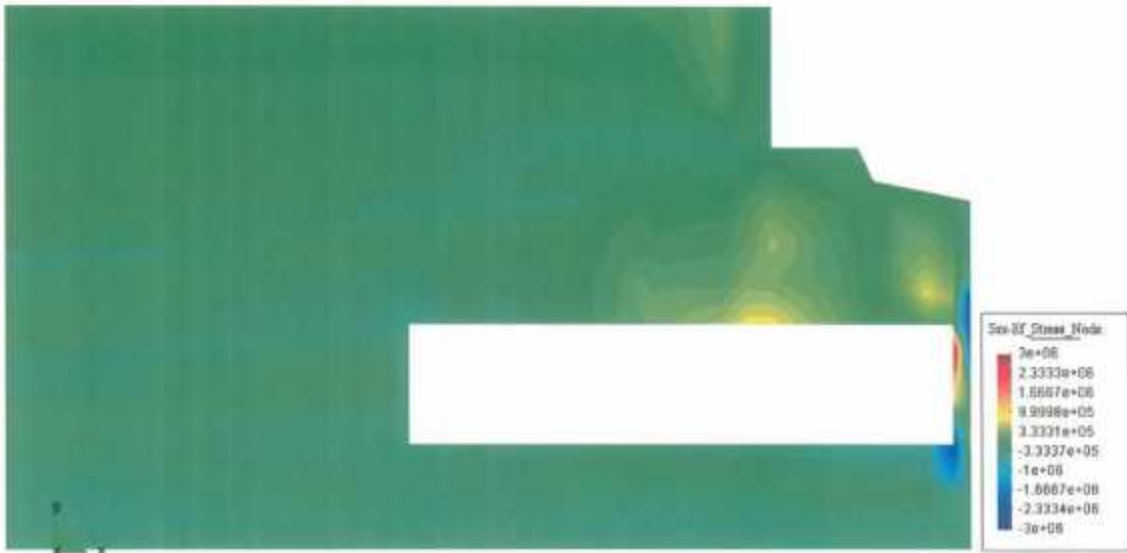
Annexe 7.26 – Déplacements horizontaux calculés (direction z) : coupe salle des sarcophages



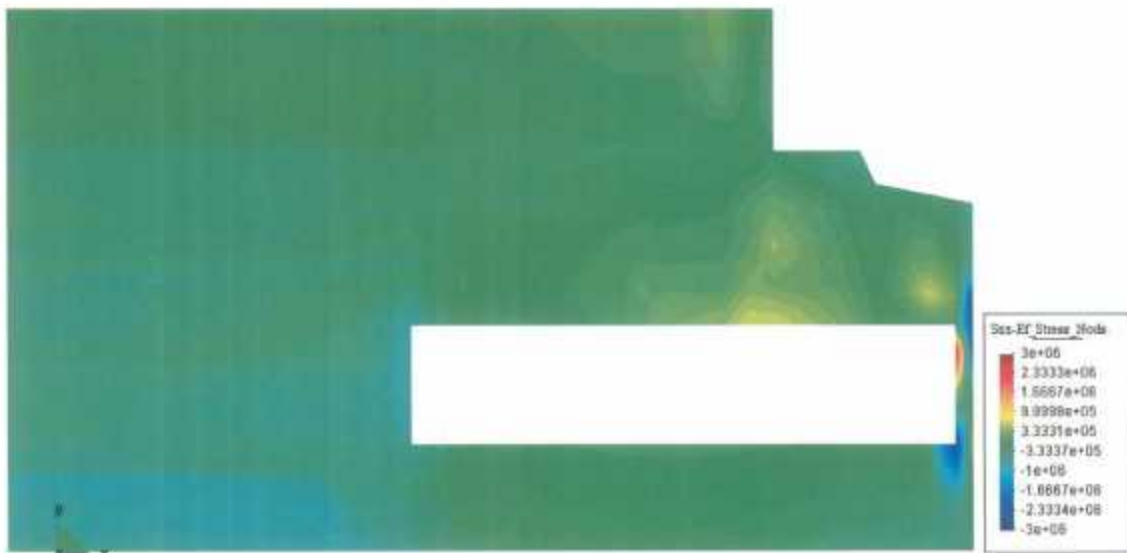
Annexe 7.27 – Déplacements verticaux calculés (direction y) : coupe salle des sarcophages



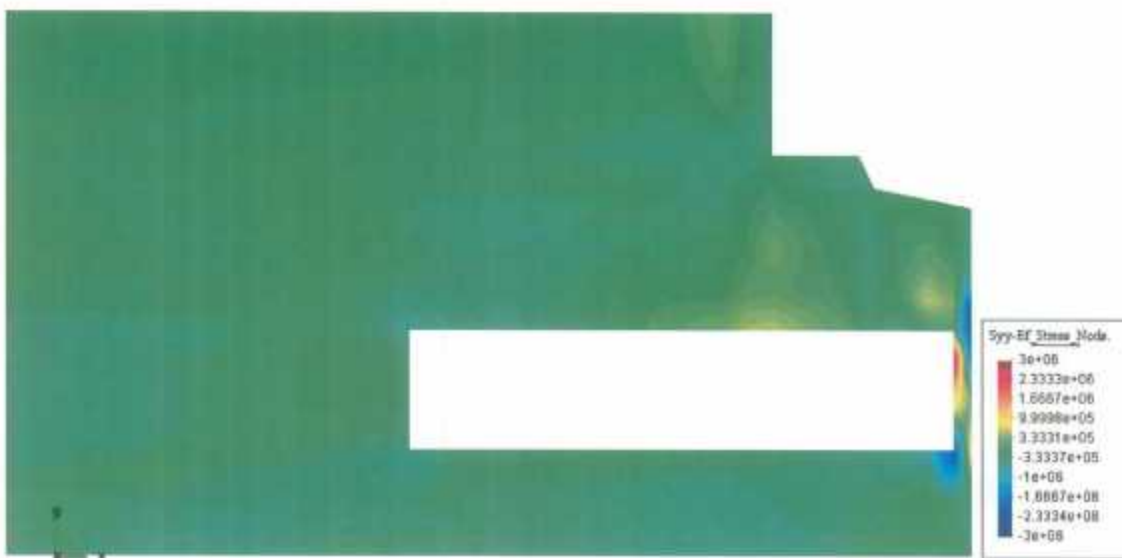
Annexe 7.28 – Norme des déplacements calculés : coupe salle des sarcophages



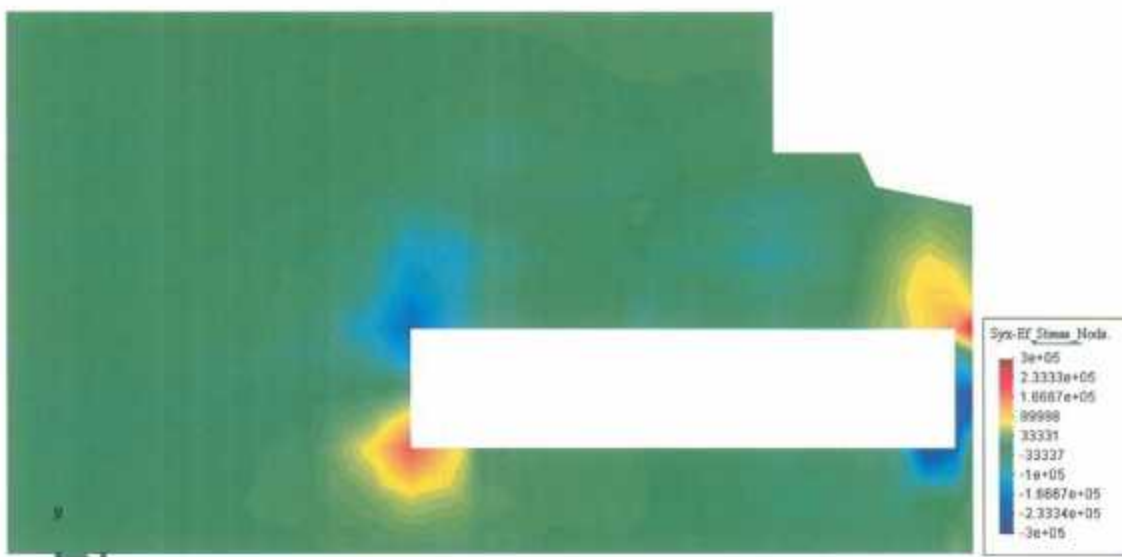
Annexe 7.29 – Contraintes horizontales calculées (direction x) : coupe salle des sarcophages



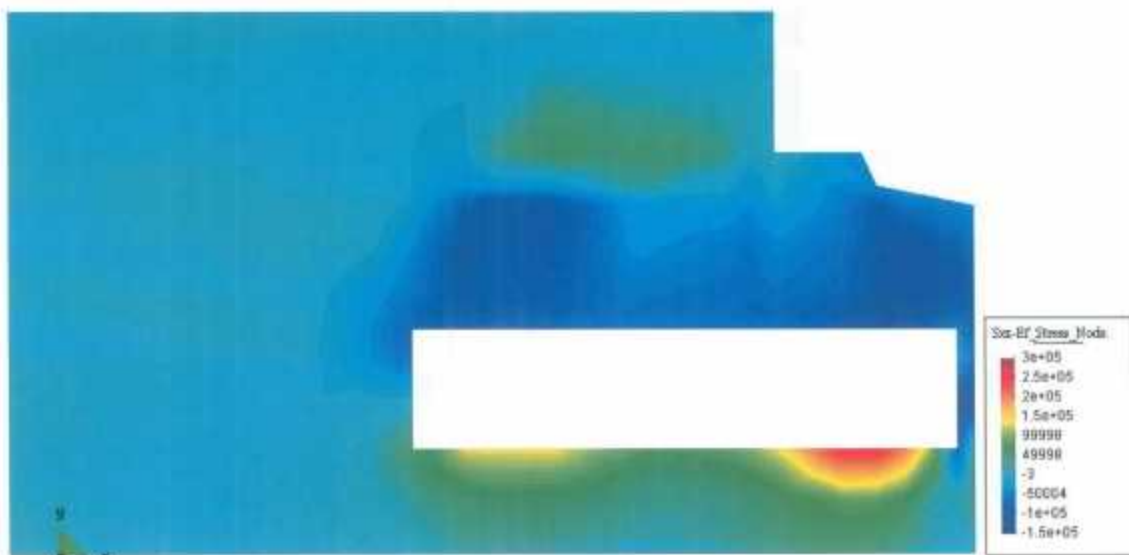
Annexe 7.30 – Contraintes horizontales calculées (direction z) : coupe salle des sarcophages



Annexe 7.31 – Contraintes verticales calculées (direction y) : coupe salle des sarcophages



Annexe 7.32 – Contraintes de cisaillement calculées (plan yz) : coupe salle des sarcophages



610

Annexe 7.33 – Contraintes de cisaillement calculées (plan xz) : coupe salle des sarcophages



610

Annexe 7.34 – Contraintes de cisaillement calculées (plan xy) : coupe salle des sarcophages



Annexe 7.35 – Déplacements horizontaux calculés (direction x) : coupe entrée de l'église



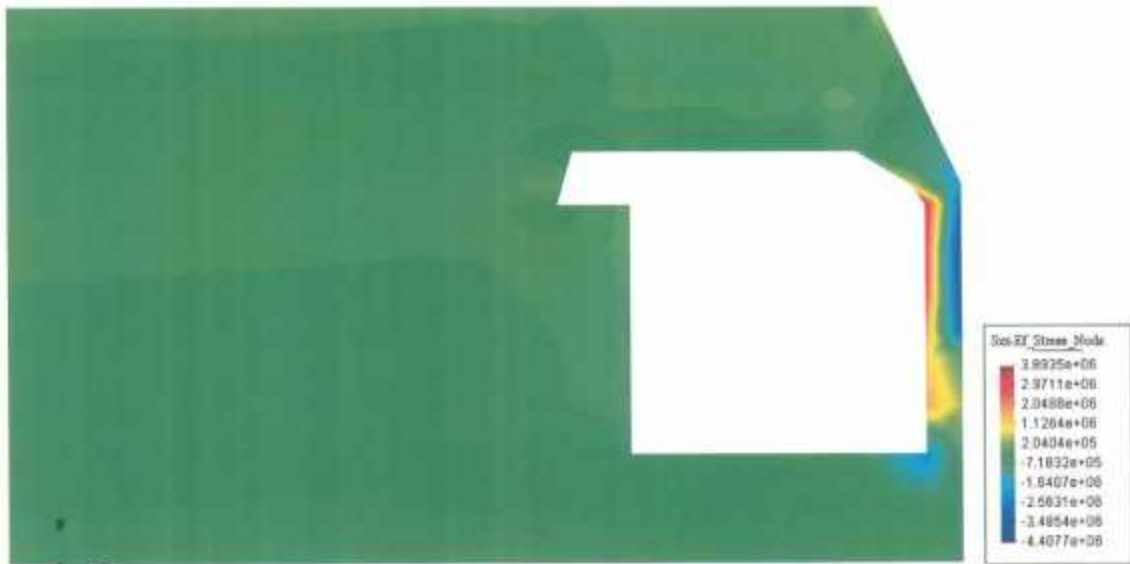
Annexe 7.36 – Déplacements horizontaux calculés (direction z) : coupe entrée de l'église



Annexe 7.37 – Déplacements verticaux calculés (direction y) : coupe entrée de l'église



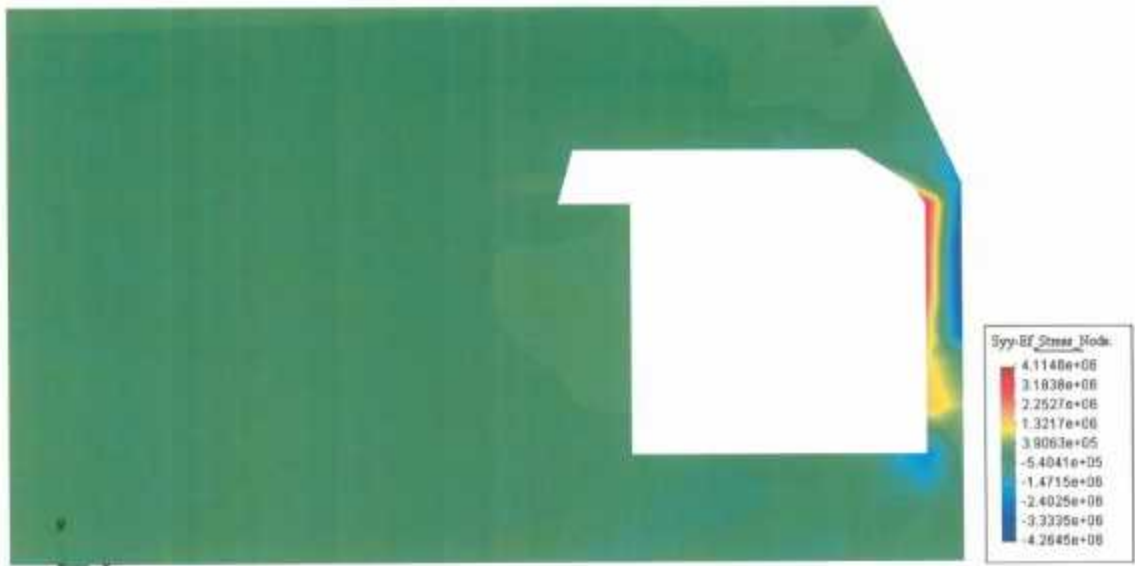
Annexe 7.38 – Norme des déplacements calculés : coupe entrée de l'église



Annexe 7.39 – Contraintes horizontales calculées (direction x) : coupe entrée de l'église



Annexe 7.40 – Contraintes horizontales calculées (direction z) : coupe entrée de l'église



Annexe 7.41 – Contraintes verticales calculées (direction y) : coupe entrée de l'église



Annexe 7.42 – Contraintes de cisaillement calculées (plan yz) : coupe entrée de l'église



Annexe 7.43 – Contraintes de cisaillement calculées (plan xz) : coupe entrée de l'église



Annexe 7.44 – Contraintes de cisaillement calculées (plan xy) : coupe entrée de l'église