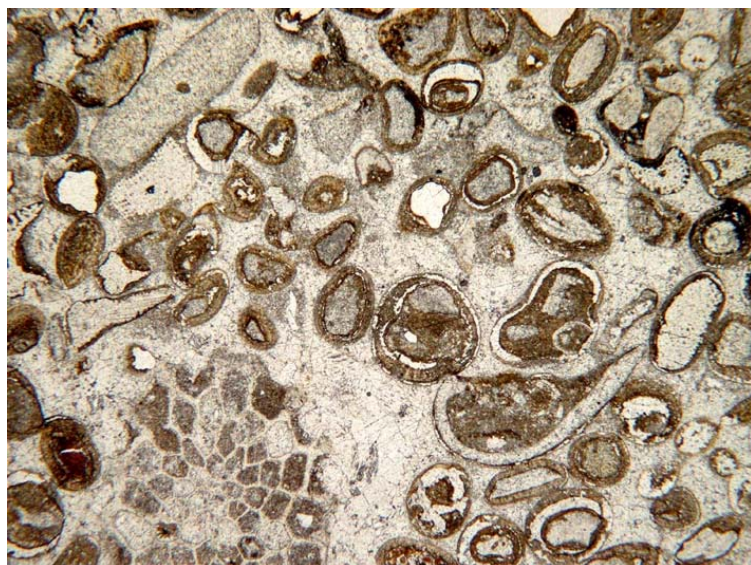


EC/BR/02601-03

**PIERRE JAUNE DE NEUCHÂTEL
RAPPORT FINAL**



Commettant

Service de la Protection des
Monuments et des Sites
Monsieur Jacques Bujard
Rue de Tivoli 1
2003 Neuchâtel

Résumé :

Après quelques considérations sur la nature géologique du matériau, les propriétés physiques et mécaniques de la pierre jaune sont abordées. Les résultats permettent de déterminer l'impact des différents états de surface observés – consécutifs à des altérations "naturelles" ou à des traitements de la pierre – sur la durabilité de la pierre jaune de Neuchâtel mise en œuvre dans les bâtiments.

Toute l'étude a montré d'une part que la pierre jaune est un matériau très hétérogène, à différentes échelles et d'autre part, que ce matériau possède de nombreuses caractéristiques physiques et mécaniques qui la protègent naturellement contre les dégâts potentiels : sa faible capillarité – impliquant entre autres une protection contre l'infiltration des eaux de pluie et contre le gel -, sa grande résistance à la compression, ses faibles dilatations hydrique et thermique. De plus, l'étude d'échantillons prélevés directement sur les constructions neuchâteloises a permis de montrer que les désordres qui l'affectent (patines, croûtes, développement de microorganismes,...) sont exclusivement superficiels et donc visuels, sauf conditions d'expositions à l'eau et/ou aux sels exceptionnellement mauvaises et/ou faciès particulièrement fragiles.

Comme le montrent toutes les observations et analyses faites à différentes échelles, sauf cas exceptionnels très locaux, les propriétés de la pierre jaune les plus intensément modifiées par la mise en œuvre et les expositions aux intempéries, sont des propriétés de surface : la couleur et la rugosité. Si la première n'est qu'un désordre visuel, il n'en reste pas moins celui qui dérange le plus. Et c'est en souhaitant "raviver" les couleurs de la pierre jaune au moyen de divers nettoyages mécaniques que sa rugosité se trouve affectée et par conséquent, sa vitesse d'encrassement. Il serait donc bon de prendre garde aux méthodes de nettoyage employées et de s'assurer qu'un nettoyage est réellement nécessaire avant de le pratiquer.

Responsable scientifique

Dr Bénédicte Rousset

TABLES DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	3
2	SOURCES DES DONNEES	3
2.1	Echantillonnage des constructions neuchâteloises	3
2.2	Echantillonnage des affleurements de Hauterive	4
2.3	Echantillons étudiés par Félix (1997) et Rumley (1993)	6
3	DEFINITION DU MATERIAU GEOLOGIQUE "PIERRE JAUNE"	6
3.1	Epoque et environnement de dépôt	6
3.2	Caractéristiques pétrographiques	7
3.2.1	Éléments figurés	8
3.2.2	Phase de liaison	8
3.2.3	Composition minéralogique	10
4	LA PIERRE DE TAILLE "PIERRE JAUNE"	11
4.1	Généralités	11
4.2	Dégradation de la pierre jaune	11
5	PROPRIETES PETROPHYSIQUES DE LA PIERRE JAUNE	12
5.1	Porosité	12
5.1.1	Porosité et masses volumiques mesurées par injection d'eau sous vide	12
5.1.2	Porosité mesurée par injection de mercure	14
5.1.3	Structures observées au microscope optique	17
5.2	Cinétiques et coefficients de transfert de l'eau à travers la porosité	19
5.2.1	Porosité capillaire et coefficient d'Hirshwald	19
5.2.2	Cinétique de séchage	22
5.2.3	Adsorption et diffusivité de la vapeur d'eau	24
5.3	Propriétés physiques et mécaniques	25
5.3.1	Résistance à la compression uniaxiale	25
5.3.2	Dureté	26
5.3.3	Dilatation hydrique	27
5.3.4	Dilatation thermique	28
5.4	Quelques modifications de surface induites par l'exposition	29
5.4.1	Couleur	29
5.4.2	Rugosité	30
5.4.3	Capillarité de surface	31
6	CONCLUSION	31
7	BIBLIOGRAPHIE	33

1 INTRODUCTION

Ce rapport clôt une longue série de travaux menés en collaboration par le département de géologie de l'Université de Neuchâtel et le Laboratoire de Conservation de la Pierre de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, puis repris par le successeur de ce dernier, l'Expert-Center pour la conservation du patrimoine bâti de Lausanne.

Malgré de nombreuses interruptions dues à l'évolution structurelle des partenaires, cette série de travaux, soutenue dès 1988 par les responsables neuchâtelois des monuments et des sites, a conduit à une meilleure connaissance de ce matériau de construction surprenant qu'est la "pierre jaune", grâce à l'élaboration de divers documents traitant des faciès géologiques de cette pierre (Rumley, 1993 ; Félix, 1997), de ses propriétés physiques et mécaniques (Félix, 1993) et de l'identification des morphologies des altérations qui l'affectent (Félix, 1995 ; Rousset, 2002a).

Dans ce rapport, après quelques considérations sur la nature géologique du matériau, les propriétés physiques et mécaniques de pierres jaunes prélevées sur des constructions neuchâteloises seront à nouveau abordées. Mais cette fois, les résultats permettront de déterminer l'impact des différents états de surface observés – consécutifs à des altérations "naturelles" ou à des traitements de la pierre – sur la durabilité de la pierre jaune de Neuchâtel mise en œuvre dans les bâtiments.

2 SOURCES DES DONNEES

Les données exposées dans ce rapport ont été acquises sur des échantillons provenant d'une part de constructions neuchâteloises et d'autre part d'anciens fronts de taille de carrières abandonnées. Les résultats obtenus sur ces deux types d'échantillons sont comparés à ceux qui avaient été établis par Félix (1997) et Rumley (1993).

2.1 ÉCHANTILLONNAGE DES CONSTRUCTIONS NEUCHATELOISES

Une classification des principaux dégâts affectant la "pierre jaune" de Neuchâtel, basée sur leur fréquence d'observation, a été proposée dans le rapport EC/BR/02601-01 (Rousset, 2002a). Suite à ce classement simple, qui sera repris et détaillé plus loin (cf. chapitre 4), quelques constructions neuchâteloises représentatives des désordres communs ont été sélectionnées. Sur ces objets ont été prélevés des cylindres de roche de 2.5 cm de diamètre et de longueur comprise entre 5 et 8 cm.

Le rapport EC/BR/02601-02 (Rousset, 2002b) mentionnait déjà l'énumération des constructions échantillonnées ainsi qu'un bref descriptif des états de surface des pierres potentiellement intéressantes. Le tableau 1 reprend la liste de ces constructions, la date de leur mise en œuvre lorsqu'elle est connue, et un bref énoncé de l'intérêt de ces objets. En annexe 1 se trouvent les photographies permettant de repérer l'emplacement des prélèvements, ainsi que les photographies des échantillons.

Adresse	Objet	Mise en oeuvre	N° échantillons	Intérêt
Rue de la Maladière, 45	Portail de l'hôpital Pourtalès	1808-1810	ne1, ne2, ne3, ne4	Croûtes gypseuses +/- protégées, cloques, plaques, sels
Faubourg du lac	Encadrement de la porte du mur d'enceinte à gauche du cinéma	?	ne5, ne6, ne7, ne8	Croûtes gypseuses +/- lustrées, +/- protégées, patine brune
Avenue Dupeyrou, 4 et 6	Encadrement de porte	1862-1864	ne9, ne10	Blanchiment de l'une des portes (traitement ? nettoyage ?)
Rue de la collégiale, 5	Portail de la collégiale	XIIe ?	ne11, ne12, ne13	Pierres encroûtées et rubéfiées, sels
Rue Jeanne de Hochberg, 3	Tour des prisons	Base Xe ? XIe, XIIe ?	ne14, ne15, ne16	Pierres non taillées, croûte noire très épaisse et très âgée
Rue des Terreaux, 14	Musée d'Histoire Naturelle	1851-1853	ne17, ne18, ne19, ne20, ne21, ne22, ne23, ne24, ne25, ne26, ne27, ne32, ne33	Zones tests nettoyées/non nettoyées. ♦ Côté Av. de la gare : "patine" moyenne, protégée des pluies, infiltrations et apports poussières ♦ Côté cours : patine faible, peu d'eau directe ♦ Côté Rue des terreaux : légère patine, lessivage des pluies important.
Rue Jeanne de Hochberg (face au n° 11)	Porche d'entrée dans le parc	?	ne28, ne29, ne30, ne31	Croûte gypseuse +/- abritée, divers microorganismes, petite plaque ou délitage, sels

Tableau 1 - Identification des constructions neuchâteloises échantillonnées, numéros des échantillons prélevés, brève description des états de surface de ces échantillons

2.2 ÉCHANTILLONNAGE DES AFFLEUREMENTS DE HAUTERIVE (NE)

Dans le but de comparer les altérations des pierres mises en oeuvre à celles des pierres naturellement à l'affleurement, d'anciens fronts de taille et des tranchées pratiquées dans la "pierre jaune" lors de la construction de routes ont été échantillonnés. Etant hautement probable que la plupart des pierres mises en oeuvre en ville de Neuchâtel proviennent de Hauterive (NE), les affleurements sélectionnés se situaient tous à cet endroit et plus particulièrement à proximité immédiate du terrain de sport.

En annexe 2 se trouvent les repérages photographiques des affleurements échantillonnés à Hauterive. Douze échantillons ont été prélevés et étudiés d'un point de vue pétrophysique. Les échantillons ont été prélevés au marteau et ils avaient par conséquent des formes et des dimensions variables. Avant de réaliser les essais, les échantillons ont été sciés sous forme de cubes de 4 cm d'arête. Dans les échantillons suffisamment grands, deux cubes ont pu être découpés, mais parfois la pierre à l'affleurement était tellement dure qu'il n'a pas été possible de prendre des échantillons de taille suffisante, auquel cas, un seul cube a pu être découpé et testé.

Le tableau 2 énumère les 12 échantillons prélevés et donne une description des faciès

Echantillon	Lieu de prélèvement	Brève description du faciès
H1	Derrière le vestiaire	Fin, très dense, argileux et glauconieux ¹ . Sans oolites apparentes. Débris de coquilles jusqu'à 0.5 cm au maximum. Surface sciée blanchâtre ; surface exposée rouille
H2	Derrière le vestiaire	Banc immédiatement supérieur à H1. Dense, plus grossier et plus glauconieux que H1. Eléments figurés : surtout débris de coquilles, peu d'oolites. Surface sciée rosâtre ; surface exposée rouille
H3	Derrière le terrain	Très dense, éléments figurés très petits, très fines lamines. Peu d'oolites et peu de glauconie. Surface sciée blanchâtre ; surface exposée rouille
H4	Derrière le terrain	Dense, coquiller, plus grossier que les précédents (coquilles → 1 cm qui ne se touchent pas). Par places, boules d'argiles et d'oxydes. Peu d'oolites, un peu de glauconie. Surface sciée blanchâtre ; surface exposée rouille
H5	A gauche du terrain	Aussi grossier que H4, mais plus oolitique, coquiller, plus poreux que les précédents. Un peu de glauconie. Surface sciée blanchâtre ; surface exposée rouille
H6	A gauche du terrain	Oolitique très poreux. Alternance de lamines oolitiques denses blanchâtres et de lamines oolitiques dissoutes très poreuses et rouilles. Surface sciée blanchâtre ; surface exposée rouille
H7	Entre le terrain et le parking	Coquiller grossier (éléments figurés → 2 cm) à lamines entrecroisées. Dense, présence de glauconie. Surface sciée blanchâtre ; surface exposée rouille
H8	Sur le parking	Très dense, très blanc. Eléments figurés nombreux mais non identifiables à l'œil nu (→ 2/3 mm). Surface sciée blanchâtre ; surface exposée rouille
H9	Bordure de route	Fin, oolitique et coquiller à mauvaise cimentation, relativement poreux. Surface sciée et surface exposée rouille
H10	Bordure de route	Même banc que H9 ? faciès oolitique poreux (oolites partiellement dissoutes) fin et glauconieux. Surface sciée blanchâtre ; surface exposée rouille
H11	Bordure de route	Banc supérieur à H9-H10. Fin, hétérogène, très argileux. Surface sciée blanchâtre ; surface exposée rouille
H12	Bordure de route	Même banc que H11

Tableau 2 – Origine des échantillons prélevés à proximité immédiate du terrain de sport de Hauterive (NE) et description des faciès correspondants

¹ **Glauconie** : Association de minéraux argileux à forte teneur en Fe³⁺. La glauconie se forme en milieu marin, le plus souvent entre 50 à 500 m de profondeur. Elle se présente fréquemment sous forme de grains vert foncé à éclat gras

2.3 ÉCHANTILLONS ETUDIÉS PAR FELIX (1997) ET RUMLEY (1993)

Les échantillons auxquels s'est intéressé Monsieur Claude Félix ont été récupérés dans un stock de pierres d'appareil conservées à la carrière de la Cernia (entreprise Facchinetti SA). Ces échantillons ont été choisis avec l'aide de Monsieur Georges Rumley, qui s'est assuré qu'elles constituaient un échantillonnage représentatif de la plupart des faciès de "pierre jaune" de Neuchâtel tels qu'il avait pu les identifier lors de son travail de thèse (Rumley, 1993).

Les échantillons que M. Rumley a étudiés pendant sa thèse provenaient de coupes déjà connues ou de forages effectués en vue des travaux autoroutiers de la traversée de Neuchâtel en tunnel.

Ces échantillons ne seront pas présentés ici en détail. Nous invitons le lecteur à se référer au rapport 2/97/EC-L de Félix (1997) et à la thèse de Rumley (1993) pour plus de détails concernant ces échantillonnages. Seuls les résultats principaux obtenus sur ces échantillons seront repris et comparés aux données récentes.

3 DEFINITION DU MATERIAU GEOLOGIQUE "PIERRE JAUNE"

3.1 ÉPOQUE ET ENVIRONNEMENT DE DEPOT

Au Crétacé inférieur (il y a environ 140 à 65 millions d'années), se trouvait à l'emplacement actuel du Morvan, des Vosges et du Jura, un bras marin qui reliait la Fosse Vocontienne au sud (grossièrement équivalent à la mer Méditerranée actuelle) et la Mer Boréale au nord (plus ou moins équivalent à la mer du nord actuelle). La région de Neuchâtel était donc sous une épaisseur d'eau de mer qui a évoluée tout au long du Crétacé inférieur.

Entre 130 et 125 millions d'années, la plate forme marine s'est progressivement comblée par le dépôt d'un sable calcaire qui s'est induré pour donner la "pierre jaune". Ce dépôt s'est fait en domaine marin encore ouvert, agité et soumis à des courants qui perturbaient la sédimentation. Ceci explique que la formation géologique "pierre jaune" soit si hétérogène, que la corrélation bancs à bancs de profils même très proches est impossible et qu'un même banc puisse présenter des différences d'épaisseurs relativement importantes.

La "pierre jaune" dite de Hauterive, ou de Neuchâtel, fait partie de la subdivision du Hauterivien, stratotype² qui a été introduit dans la nomenclature géologique internationale en 1874 (cf figure 1).

² Le **stratotype** correspond à l'affleurement type d'un étage géologique ou division chronostratigraphique

ERE	SYSTEME	SOUS - SYSTEME	Etage	Millions d'années	Autres dénominations		
QUATERNAIRE	HOLOCENE		Flandrien		Versilien		
			Tyrhénien				
	PLÉISTOCENE		Sicilien				
			Calabrien				
	NEOGENE	PLIOCENE		Plaisancien			
				Zancléen		Tabianien	
				Messinien		Pontien	
		MIOCENE		Tortonien		Vindobonien	
				Serravallien			
				Langhien		Hélvétien	
CENOZOÏQUE (Tertiaire)	OLIGOCENE		Burdigalien	1,8			
			Aquitainien				
	PALEOGENE (Nummulitique)	EOCENE		Chattien	5,3		
				Stampien		Rupélien	
		PALEOCENE		Priabonien		Ludien	
				Bartonien		Auversien	
	MESOZOÏQUE (Secondaire)	CRETACE	CRETACE Supérieur		23		
					Yprésien		Sparnacien / Cuisien
			CRETACE Inférieur		34		
					Thanétien		Danien
				Dano-Montien	40		
				Maestrichtien		Rognacien	
JURASSIQUE	MALM		53		Fuvélien / Sénonien		
			Campanien				
			Santonien				
			Coniacien	65			
	DOGGER		Turonien				
			Cénomanién				
			Albien				
			Aptien	96		Urgonien	
JURASSIQUE	MALM		96		Néocomien		
			Barrémien				
			Hauterivien				
			Valanginien				
JURASSIQUE	DOGGER		Bérriasien				
			Tithonien		Tithonique/Portlandien		
			Kimméridgien	135			
			Oxfordien		Argovien / Rauracien / Séquanien		
JURASSIQUE	DOGGER		Callovien				
			Bathonien	154			
			Baocien				

Figure 1 – Le Hauterivien sur l'échelle des temps géologiques

3.2 CARACTERISTIQUES PETROGRAPHIQUES

La "pierre jaune" de Neuchâtel est un calcaire et comme tout calcaire, il est caractérisé par ses éléments figurés³ et ses phases de liaisons⁴ qui permettent de définir des ensembles de roches semblables entre elles, ou faciès. Dans leurs études, Félix (1997) et Rumley (1993) distinguent de nombreux litho- et micro-faciès dont l'énumération ne sera pas reprise ici. Nous invitons le lecteur à se reporter aux documents correspondants pour plus de détails.

Pour simplifier, nous rappelons seulement que les faciès de "pierre jaune" varient entre deux termes dominants : un faciès oolitique (riches en oolites – cf. définition ci-après) et un faciès bioclastique (contenant de nombreux débris d'origine

³ **Éléments figurés** : éléments d'origine chimique ou biochimique, formés dans le bassin de sédimentation et ayant subi un certain transport se présentant sous forme de fragments distincts (Foucault et Raoult, 2001).

⁴ **Phase de liaison** : ciment de la roche ayant précipité dans le bassin de sédimentation (Foucault et Raoult, 2001).

⁵ **Diagenèse** : ensemble des processus biologiques, chimiques et physiques qui transforment un sédiment en roche sédimentaire. Cette transformation débute dès le dépôt des particules et se poursuit au cours de leur enfouissement (Foucault et Raoult, 2001).

animale ou végétale). Ces deux faciès extrêmes se mélangent en proportions variables, sous forme de faciès très variés, plus ou moins grossiers. Comme nous le verrons plus loin, certains de ces faciès renferment des oolites en partie dissoutes suite à des événements post-diagénétiques⁵.

3.2.1 Éléments figurés

Les éléments figurés de la "pierre jaune" sont en majorité carbonatés. Les plus fréquents, comme on peut le constater sur les micrographies reportées en figure 2 sont :

- *les oolites* : petites sphères de diamètre de 0.5 à 2 mm en moyenne, dont le nucléus est un débris (grain de quartz, fragment de coquille...) et dont le cortex est formé de minces couches radiaires et/ou concentriques (Foucault et Raoult, 2001) ;
- *les bioclastes* : éléments fossiles entiers ou en fragments d'origine végétale ou animale. Les bioclastes les plus abondants dans la pierre jaune sont :
 - les Foraminifères
 - les débris d'Echinodermes (fragments de bras et de tiges de Crinoïdes, de carapaces d'Oursins et de leurs piquants)
 - les débris de Bryozoaires
 - les débris de Lamellibranches et de Brachiopodes
 - les Annélides
- *les lithoclastes* : débris de roches ou de sédiments re-sédimentés

Ces éléments figurés sont liés entre eux par une phase de liaison elle aussi carbonatée.

3.2.2 Phase de liaison

Le ciment calcaire qui assure la cohérence de la pierre est toujours formé de calcite généralement sparitique (formé de cristaux dont la taille est supérieure à 10 µm), mais qui peut aussi être microsparitique (cristaux entre 10 et 80 µm) ou micritique (cristaux inférieurs à 10 µm).

La micrite est une boue calcitique contemporaine de la sédimentation, tandis que les sparites sont des ciments liés à des transformations plus ou moins tardives des dépôts et résultent soit d'une précipitation intergranulaire soit d'une recristallisation à l'état solide.

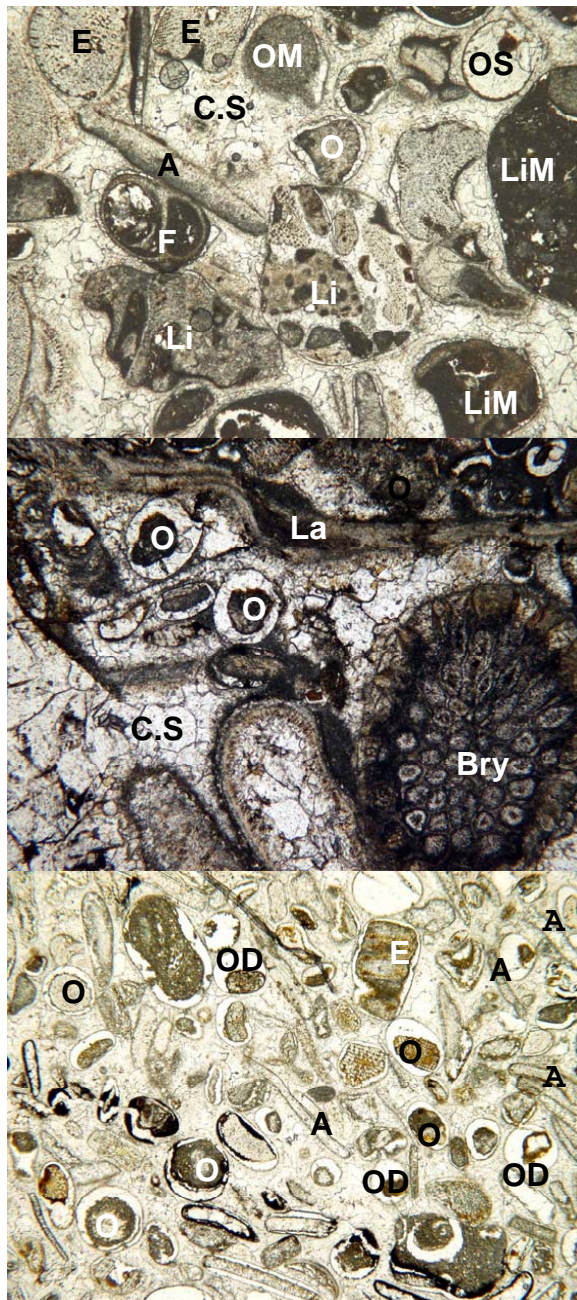


Figure 2. Micrographies de lames minces de "pierre jaune" acquises au microscope optique. Les éléments figurés et la phase de liaison de la "pierre jaune" de Neuchâtel sont repérés comme suit :

- A = Annélides
- Bry = débris de Bryozoaire
- CS = ciment sparitique
- E = débris d'Echinodermes
- F = Foraminifère
- La = débris de Lamellibranche
- Li = lithoclaste
- LiM = lithoclaste micritique
- O = oolite
- OD = oolite partiellement dissoute
- OM = oolite micritique
- OS = oolite sparitique

Echelle pour les trois images :
longueur ≈ 4 mm

3.2.3 Composition minéralogique

Rumley (1993) ayant fourni des données chimiques et minéralogiques abondantes sur la "pierre jaune", aucune analyse de ce type n'a été répétée. L'analyse minéralogique moyenne⁶ donnée par Rumley, obtenue par diffraction des rayons X est la suivante :

- calcite	CaCO ₃	84 %
- quartz	SiO ₂	8 %
- phyllosilicates (argiles)	SiO ₄ , Al, K, Na, Fe, Mg	3 %
- goethite	FeO OH	0.7 %
- dolomite	(Ca, Mg)(CO ₃) ₂	0.1 %
- indosés ⁷		4 %

Cette pierre est donc essentiellement carbonatée, mais aussi caractérisée par de faibles teneurs en quartz et en minéraux argileux.

Il est remarquable que malgré la faible teneur en oxyde de fer (goethite), c'est pourtant bien ce minéral qui est responsable de la couleur jaune-ocre de la roche. Lorsque la "pierre jaune" n'a pas été soumise aux conditions oxydantes de l'air ou des eaux d'infiltration superficielles, elle est bleue ! Ceci est attesté par les observations faites sur divers niveaux de pierre jaune échantillonnés en profondeur lors des travaux préliminaires à la construction de l'autoroute, ou même par l'observation de certains bancs de "pierre jaune" restés suffisamment protégés et mis au jour dans la carrière d'Eclépens, VD (cf figure 3).



Figure 3 – Carrière d'Eclépens, Canton de Vaud

⁶ Comme expliqué précédemment, la pierre jaune est un matériau représenté par de nombreux faciès caractérisé chacun par une composition minéralogique particulière. Les pourcentages de chaque phase minérale fournis ici peuvent varier de quelques pourcents suivant le faciès considéré.

⁷ Les **indosés** correspondent aux espèces minérales présentes en quantité trop faible pour être identifiables par la méthode d'analyse employée.

4 LA PIERRE DE TAILLE "PIERRE JAUNE"

4.1 GENERALITES

Comme il a déjà été mentionné, à l'intérieur du niveau géologique "pierre jaune", les différentes strates présentent un contenu qui peut énormément varier entre un faciès oolitique et un faciès bioclastique.

De nombreux faciès se retrouvent dans le matériau de construction "pierre jaune". Toutefois, comme l'avait déjà observé Schardt (1906), pour être exploité, un faciès devait avoir un contenu en quartz toujours faible, permettant ainsi une taille très facile. Comme nous le verrons plus loin, cette remarque est confirmée par les observations que nous avons pu faire au cours de cette dernière étude, tant sur les pierres mises en œuvre que sur les anciens fronts d'exploitation de "pierre jaune".

Comme tout matériau de construction, et particulièrement les pierres naturelles, la pierre de taille "pierre jaune" se caractérise par les formes de dégradation qui l'affectent au cours du temps. Ces dégradations - ou désordres - sont traités ci-dessous.

4.2 DEGRADATIONS DE LA PIERRE JAUNE

L'énumération des désordres affectant la "pierre jaune" a été faite en partie par Félix en 1995 dans le rapport 22/95/LCP et par Rousset en 2002 dans le rapport EC/BR/02601-01. Le contenu de ce dernier rapport est repris en annexe 3 où se trouve la liste des désordres rencontrés sur la pierre jaune en ville de Neuchâtel et dans les villages alentour selon une nomenclature conseillée par le groupe ICOMOS (Vergès-Belmin, 2004). Des explications de formations de ces désordres sont plus détaillées que dans le rapport EC/BR/02601-01.

Cette énumération n'a pas la prétention d'être complète, les observations des bâtiments en pierre jaune n'ayant été faite que sur la salle du grand conseil (Félix, 1995) ou depuis le sol (Rousset, 2002a), certains désordres peuvent avoir échappés à l'observation. Il s'agit néanmoins des désordres les plus courants et affectant les plus grandes surfaces de pierre jaune.

La liste suivante résume les catégories de désordres développées en annexe 3.

1. Altérations chromatiques

- décoloration
- patine
- tache
- rubéfaction

2. Érosion chimique et/ou mécanique

- dissolution karstique - alvéolisation
- érosion différentielle
- érosion chimique et/ou mécanique d'origine anthropique

3. Modifications de la surface par des apports endogènes

- patine
- croûte, incrustation, encroûtement

4. Modifications de la surface par des apports exogènes

- patine
- salissure
- croûte, incrustation, encroûtement
- pellicule, film
- graffitis

5. Modifications par décohésion de la pierre

- désagrégation (sableuse)
- délitage
- exfoliation

6. Modifications liées a la présence d'eau

- taches d'humidité, zones humides
- remontées capillaires

7. Modifications liées a la présence de sels

- cryptoflorescence, subflorescence
- efflorescence
- taches d'humidité, zones humides

8. Modifications d'origine biologique

- algues
- lichens
- mousses
- végétaux supérieurs
- araignées
- urine de canidés

9. Modifications physiques et/ou mécaniques

- éclats, épaufrures, esquilles
- éclatement
- fissure, fracture

5 PROPRIETES PETROPHYSIQUES DE LA PIERRE JAUNE

Dans ce chapitre, sont exposées certaines propriétés physiques et mécaniques de la pierre jaune ; propriétés concernant pour la plupart le matériau dans sa masse. Ces caractéristiques permettent d'expliquer la durabilité de la pierre jaune lorsqu'elle est mise en œuvre. De plus, sur les échantillons prélevés sur les édifices neuchâtelois, nous avons caractérisé certaines modifications de surface induites par les conditions d'expositions ceci afin d'estimer l'influence de ces modifications sur les caractéristiques physiques et mécaniques propres au matériau "sain".

5.1 POROSITE

5.1.1 Porosité et masses volumiques mesurées par injection d'eau sous vide

Le principe de la méthode et les résultats détaillés se trouvent en annexe 4.

En 1997, Félix n'a pas fourni de résultats de mesures de porosité totale par la méthode de la triple pesée, mais seulement des mesures obtenues par porosimétrie au mercure, méthode que nous verrons plus loin. Mais il a donné en 1993 des valeurs obtenues par triple pesés sur 12 éprouvettes issues d'un même bloc. Ces données sont reprises en annexe 4 et sont résumées dans le tableau suivant.

	Données Félix (93)	Bâtiments	Front de taille
Effectif	12	29	28
Nb de faciès	1 (PJNE18)	21	10
Forme éch.	Cubes 7x7x7 cm	¼ ou ⅓ cylindres de Ø 2.6 cm et L 4.5 cm	Cubes 4x4x4 cm ou forme quelconque
	POROSITE TOTALE (%)		
Moyenne	17.5	14.4	7.5
Ecart type	1.4	2.4	5.8
Minimum	15.1	10.8	2.0
Maximum	19.3	21.0	21.1
	MASSE VOLUMIQUE APPARENTE (kg/m³)		
Moyenne	2244	2323	2516
Ecart type	34	64	145
Minimum	2200	2142	2141
Maximum	2310	2423	2643
	MASSE VOLUMIQUE REELLE (kg/m³)		
Moyenne	2720	2715	2720
Ecart type	16	7	35
Minimum	2683	2697	2697
Maximum	2756	2728	2896

Tableau 3. Résumé des mesures de porosité à l'eau effectuées sur les fronts de taille et les constructions neuchâteloises. Comparaison avec les données acquises par Félix en 1993

On constate que la variabilité des faciès, en terme de porosité, est beaucoup plus restreinte sur les bâtiments (écart type de 2.4) que sur les affleurements (écart type de 5.8) : sur les affleurements, les caractéristiques des faciès retrouvés sont très diversifiées et représentent parfaitement l'hétérogénéité de la pierre jaune en tant que matériau géologique. Toutefois la moyenne obtenue de 7.5% ne peut pas être représentative de l'ensemble de la pierre jaune. En effet, nous avons constaté que très souvent les faciès trouvés à l'affleurement ne sont pas représentatifs des faciès mis en oeuvre. Il s'agit en fait des bancs inexploitable qui ont été abandonnés après que toute la pierre utilisable comme pierre de taille ait été extraite. Les résultats obtenus pour les pierres mises en oeuvre montrent que les faciès choisis pour la taille, bien qu'eux aussi diversifiés, représentent néanmoins une palette de porosités très restreinte.

De ces mesures de porosité à l'eau peuvent être déduites les valeurs de masses volumiques réelle et apparente (cf. annexe 4) qui montrent la bonne corrélation entre la valeur de porosité totale et la valeur de densité apparente d'une part et d'autre part que la densité réelle est très proche de la densité de la calcite (2710 kg/m³, CRC Handbook of Ch. and Ph., 1983) ce qui permet de confirmer que la pierre jaune de Neuchâtel est essentiellement formée de calcite.

Si l'on compare les nouvelles données (fronts de taille et constructions neuchâteloises) avec les données de Félix, on constate que ces dernières sont beaucoup plus homogènes que les premières. Il n'existe pas de notes précises quant à l'échantillonnage de Félix, mais cette remarque peut être expliquée par les

deux hypothèses suivantes : soit ses échantillons ont été prélevés les uns à côté des autres dans une même strate, soit les dimensions des éprouvettes qu'il a choisit (cubes de 7 cm d'arête) sont parfaitement représentatives du bloc qu'il a étudié.

5.1.2 Porosité mesurée par injection de mercure

Le principe de la méthode et les résultats détaillés se trouvent en annexe 5.

	Données Félix	Bâtiments
Effectif	84	67
Nb de faciès	24	20
Forme éch.	Cubes de 9 à 10 g	Fragments qcq
	POROSITE PHg (%)	
Moyenne	14.2	14.4
Ecart type	3.0	3.8
Minimum	8.1	4.4
Maximum	23.0	25.5
	POURCENTAGE DE LA POROSITE RESTANT PIEGEE (% de PHg)	
Moyenne	74.1	76.3
Ecart type	4.7	19.5
Minimum	67.2	41.7
Maximum	83.8	99.9
	POURCENTAGE DE LA POROSITE >1µm = MACROPOROSITE (% de PHg)	
Moyenne	41.6	27.2
Ecart type	16.5	20.3
Minimum	6.5	0.0
Maximum	62.7	74.7
	SURFACE SPECIFIQUE (m²/g)	
Moyenne	2.28	3.01
Ecart type	0.47	1.15
Minimum	1.40	0.05
Maximum	3.80	6.26
	R seuil (µm)	
Moyenne	0.47	0.48
Ecart type	0.22	0.28
Minimum	0.17	0.01
Maximum	0.99	1.40
	R₁₀ (µm)	
Moyenne	3.14	2.63
Ecart type	1.79	3.03
Minimum	0.60	0.10
Maximum	8.20	12.00
Tableau 4. Résumé des mesures de porosimétrie au mercure effectuées sur les échantillons prélevés sur les monuments. Comparaison avec les données acquises par Félix en 1997		

Les courbes d'injection ne sont pas exposées dans ce rapport, seules les valeurs utiles en ont été extraites. La totalité des valeurs intéressantes, obtenues par Félix (1997) ou plus récemment sur les bâtiments, est reportée en annexe 5.

Il n'existe pas de valeurs disponibles pour les échantillons prélevés sur les fronts de taille : étant donné les faibles valeurs de porosité mesurées à l'eau, il est apparu évident que ce genre de faciès n'avait pas pu être exploité comme pierre de taille, et nous avons alors préféré ne pas compléter les analyses par un trop grand nombre de techniques.

Comme les résultats de la porosité à l'eau, les résultats de la porosimétrie au mercure montrent bien que la pierre jaune de Neuchâtel est un matériau extrêmement hétérogène : l'écart type obtenu pour la mesure de porosité par porosimétrie au mercure est systématiquement plus élevée que l'écart type obtenu pour la porosité mesurée à l'eau, que ce soit pour les échantillons prélevés sur les monuments ou pour les échantillons étudiés par Félix. Il en est de même pour les écarts types des masses volumiques. Ceci s'explique très simplement : les échantillons utilisés lors des mesures porosimétriques sont très petits comparativement à ceux sur lesquels la porosité à l'eau est mesurée. La pierre étant hétérogène à plusieurs échelles, mais surtout à l'échelle centimétrique à millimétrique, les mesures effectuées sur deux fragments d'une même carotte peuvent être extrêmement différentes comme en témoignent par exemple, les valeurs obtenues pour les carottes 13 (PJ13 = 17.9%, NE13P = 8.37) ou 27 (PJ27 = 25.5, NE27P = 14.8) (cf. annexe 5). Si les valeurs moyennes obtenues pour les échantillons des bâtiments sont identiques par mesure à l'eau et au mercure (porosité moyenne de 14.4%), c'est parce que le nombre d'échantillons mesurés par le mercure était suffisamment grand pour que toute la palette des porosités soit statistiquement représentée.

MAIS, parmi toutes les valeurs mesurées, sur les monuments ou par Félix, il n'est pas possible de préférer une valeur plutôt qu'une autre et de déclarer que cette valeur est représentative de la pierre jaune dans sa globalité. Par contre il est possible d'affirmer que la porosité de cette pierre est généralement comprise entre 4.5 et 25.5 avec une plus grande probabilité pour que la valeur soit comprise entre 8 et 19%. Il faut rappeler ici que nous ne considérons que des faciès facilement travaillés puisque les échantillons pris sur les affleurements n'ont pas subi d'injection de mercure.

Ces observations montrent à quel point les dimensions des échantillons peuvent être importantes lors des mesures physiques effectuées sur les pierres naturelles, d'autant plus importantes que l'homogénéité de la structure minéralogique et poreuse est faible.

Par contre, les valeurs de porosimétrie au mercure obtenues par Félix (PoHg moyenne = 14.2%) ne peuvent pas être directement comparées aux valeurs qu'il a obtenu par mesure à l'eau (Po moyenne = 17.5%) parce qu'il n'a pas travaillé sur un même lot d'échantillons dans les deux cas.

Que ce soit pour les échantillons étudiés par Félix ou pour les échantillons prélevés sur bâtiments, on constate que les valeurs de **porosité piégée** sont très élevées et proches de 75% (Pour l'un des échantillons des bâtiments, la valeur atteint même 99.9%). Ceci signifie qu'après diminution de la pression qui a été appliquée sur le mercure pour le faire pénétrer dans les échantillons, lorsque la pression atmosphérique est à nouveau atteinte, 75% du volume poreux reste

encore occupé par du mercure. Le piégeage du mercure étant d'autant plus important que le réseau poreux est hétérogène, on montre ainsi que le réseau poreux de la pierre jaune de Neuchâtel est TRES hétérogène. Dans cette pierre, à l'échelle des pores, des vides de grandes dimensions voisinent couramment des vides de très petites dimensions et ce de façon aléatoire. Il en résulte un piégeage important du mercure lors de son retrait par suite de trop grandes variations de tension capillaire d'un pore à un autre.

Concernant le pourcentage de **macro-porosité** (volume poreux dont l'accès est contrôlé par des pores de diamètre supérieur à 1 μm), on constate que les valeurs dépassent rarement les 50%. On peut toutefois noter que la valeur moyenne obtenue par Félix (MacroPo = 41.6%) est très nettement supérieure à celle obtenue sur les échantillons des bâtiments (MacroPo = 27.2 %). Nous n'avons pas d'explication triviale à fournir à cette observation. Mais, dans les deux cas, l'écart type est très élevé, ce qui souligne une fois de plus l'hétérogénéité de la pierre jaune.

Les **surfaces spécifiques** (Ss) mesurées sont relativement faibles et parfaitement représentatives d'une roche sédimentaire, poreuse mais peu argileuse (Félix : 2.28 m^2/g ; Bâtiments : 3.01 m^2/g). En effet dans une pierre naturelle, ce sont les minéraux argileux qui développent les Ss les plus importantes : la Ss d'une montmorillonite par exemple est de l'ordre de 80 m^2/g . Pour comparaison, la Ss d'une poudre de verre, matériau poreux qui développe le moins de Ss, n'est que de 0.3 m^2/g (Fripiat et al., 1971).

Les valeurs moyennes des **rayons seuil** (Rseuil) sont identiques pour les échantillons étudiés par Félix (0.47 μm) et pour les échantillons prélevés sur les bâtiments (0.48 μm). Mais, on constate que les écarts types, dans tous les cas, sont très élevés. Il est donc plus correct d'affirmer que les rayons d'accès aux pores sont compris entre 0.01 et 1.4 μm plutôt que de mentionner la moyenne de l'ordre de 0.5 μm qui ne représente pas le matériau en général.

Si on s'intéresse à présent à la **dispersion des valeurs des rayons d'accès** aux pores (cf. annexe 5), on constate que cette caractéristique corrobore elle aussi (comme les valeurs du Rseuil) le fait que la pierre jaune possède un réseau poreux extrêmement hétérogène à l'échelle du pore. En effet, si la plupart des échantillons présentent un réseau unimodal, c'est à dire représenté par une seule et unique famille de pores plus ou moins bien différenciée (avec une distribution plus ou moins étalée), de nombreux échantillons ont plutôt des réseaux poreux bimodaux voire même trimodaux plus ou moins étalés.

Enfin, si on considère les **valeurs des rayons critiques de gélivité** (R10), on constate qu'ils sont en moyenne nettement supérieurs à 1.5 μm (Félix : 3.14 μm ; Bâtiments : 2.63 μm). La structure poreuse de la pierre jaune est donc **favorable à la résistance au gel**, même si dans le détail, on constate que certains faciès peuvent être plus sensibles (cf. annexe 5, certains faciès présentent un R10 < 1 μm).

En résumé, les essais porosimétriques montrent donc que la pierre jaune de Neuchâtel :

- possède un réseau poreux hétérogène à très hétérogène (à l'échelle des échantillons pris pour réaliser les essais du moins) ;
- présente une structure poreuse susceptible de bien résister au gel.

5.1.3 Structures observées au microscope optique

Les observations au microscope optique (cf. annexe 6), mettent en évidence la prépondérance de la calcite ainsi que la nature des éléments figurés et de la phase de liaison comme nous l'avons déjà mentionné au chapitre 3.2.1.

Elles montrent une fois de plus l'hétérogénéité que peut présenter cette pierre : le tableau A6-1 de l'annexe 6 et les images correspondantes indiquent bien que dans un même bloc déjà, les faciès rencontrés à l'échelle centimétrique – voire millimétrique - peuvent fortement varier (cf. annexe 6, échantillons ne19, ne20 et ne21).

Sur les micrographies, on observe encore que la majorité de la porosité de la pierre jaune de Neuchâtel est une microporosité intergranulaire se situant généralement dans les éléments figurés micritiques.

La seconde catégorie de porosité est elle aussi micro-, voire méso- poreuse, et elle se situe entre les grains de sparite formant le ciment ou entre le ciment et les éléments figurés.

Enfin, le troisième type de porosité, plus rare et caractéristique de faciès très particuliers (cf. échantillons ne17 ou ne28 par exemple), est une macroporosité qui se situe généralement dans des oolites : ces éléments figurés sont classiquement formés d'un nucléus et d'un cortex. Mais il arrive que, soit uniquement le cortex, soit le cortex et le nucléus aient subi une dissolution à un moment particulier de l'histoire géologique de la pierre. Dans ce cas, on retrouve aujourd'hui des fantômes d'oolites lorsqu'elles sont entièrement dissoutes ou des oolites dans lesquelles le cortex est partiellement absent, et les lacunes constituent la macroporosité. On constate que des dissolutions partielles d'oolites ont été fréquentes dans les échantillons analysés, mais les vides consécutifs à ces dissolutions ont été ultérieurement comblés par des cristallisations de calcite secondaire (cf. annexe 6, images de l'échantillon ne21 par exemple).

Enfin, les modifications de surfaces induites par les conditions d'exposition sur les bâtiments sont aussi repérables au microscope optique. Malheureusement, les surfaces étant parfois très fragiles ou solubles à l'eau (comme c'est le cas pour les croûtes gypseuses), elles sont facilement détruites au cours de la confection des lames minces et il est ainsi impossible d'observer les modifications de surface de plusieurs échantillons. Toutefois sur les échantillons non endommagés, il est possible de faire des constats intéressants :

- la seule croûte encore observable (échantillon ne1) ne modifie pas la structure de la pierre sur plus de 1.5 mm. Sur cette faible épaisseur de matériau il y a eu des dissolutions évidentes du ciment sparitique et des éléments figurés qui ont été partiellement remplacés par un composé

soluble tendant à disparaître lors de la fabrication de la lame (probablement du gypse d'après l'aspect des croûtes à la loupe binoculaire et les analyses minéralogiques effectuées sur des "grattages" de ces croûtes) ;

- les patines (cf. annexe 6, ne8, ne12, ne21, ne22 et ne26), qui sont de toute évidence des dépôts superficiels de quelques microns d'épaisseur, qui épousent parfaitement le substrat et qui tendent à s'épaissir lentement en fonction des conditions d'exposition, n'impliquent aucun changement de structure du matériau sous-jacent ;
- la seule plaque échantillonnée (échantillon ne28) n'est pas une plaque mais un délitage d'après la structure fine et fortement orientée du bloc de pierre sur lequel ce désordre est apparu ;
- les microorganismes qui se développent à la surface de la pierre jaune peuvent se nourrir des minéraux trouvés dans cette dernière, mais – du moins pour les algues et les lichens – les "destructions" et les dépôts et/ou cristallisations qui s'en suivent restent là encore très superficiels et ne dépassent pas quelques microns à quelques dizaines de microns de profondeur/d'épaisseur (cf. annexe 6, ne30 et ne31) ;
- les surfaces récemment nettoyées - le plus souvent par hydrogommage - présentent une surface plus rugueuse que les surfaces non nettoyées. Ainsi les échantillons ne9 (av. DuPeyrou 6), ne17 (Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade NO) et ne32 (Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade SO) présentent des rugosités de surface plus importantes que les autres échantillons. Toutefois, si la rugosité de surface semble augmenter après un nettoyage, cette remarque est à tempérer par les constats suivants : cette rugosité "secondaire" semble dépendre de la rugosité "primaire", c'est-à-dire de l'outil employé pour tailler la pierre⁸. Mais la rugosité secondaire dépend aussi du faciès⁹ ou bien encore de l'exposition¹⁰.

En résumé, les observations microscopiques confirment les observations qui avaient déjà pu être faites à l'œil nu (cf. annexe 1) : les modifications de surface provoquées par les conditions d'exposition sur la pierre jaune mise en œuvre ne sont que très superficielles et ne semblent en rien affecter la pierre sous-jacente. Ceci est confirmé par les mesures de transferts d'eau liquide et gazeuse ci-après.

Nous pouvons encore remarquer que le sens du litage n'a que peu d'importance sur la bonne tenue de la pierre jaune : les blocs placés en délit ne montrent que

⁸ Une surface bouchardée à l'origine développe une surface encore plus rugueuse après nettoyage qu'une surface plus lisse à l'origine comme nous avons pu l'observer sur le musée d'histoire naturelle.

⁹ Certains faciès tendent à se laisser éroder de façon uniforme alors que d'autres, plus hétérogènes, verront leurs hétérogénéités révélées par un nettoyage, les parties tendrent se laissant creuser et les parties dures restant en relief.

¹⁰ Une pierre exposée aux pluies battantes présente déjà une rugosité secondaire due au dissolutions partielles provoquées par les pluies qui mettent elles aussi en évidence les hétérogénéités de la pierre ; cf. l'aspect de la surface de l'échantillon ne33 (Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade SO) non nettoyée mais fortement exposée aux pluies.

rarement des problèmes de délitage. Seuls les faciès avec une structure véritablement bien marquée et soulignée par l'orientation d'éléments figurés plus fragiles (cf. échantillon ne28) sont susceptibles de s'altérer plus rapidement s'ils sont posés en délit. A part ces cas particuliers, les faciès, même orientés, sont généralement suffisamment bien cimentés pour ne pas développer ce type d'altération.

5.2 Cinétiques et coefficient de transfert de l'eau à travers la porosité

5.2.1 Porosité capillaire et coefficient d'Hirschwald

Le principe de la méthode et les résultats détaillés se trouvent en annexe 7.

Litage perpendiculaire au sens d'imbibition			
	Données Félix	Bâtiments	Front de taille
Effectif	De 4 à 12	11	4
Nb de faciès	1 (PJNE18)	10	4
Forme éch.	Prismes 4 x 4 x 16 cm	Cylindres Ø 2.5, L 4.5	Cubes 4x4x4
COEFFICIENT MASSIQUE, A (mg/cm².min^{1/2})			
Moyenne	16.2	3.8	10.4
Ecart type	4.4	1.2	4.8
Minimum	12.8	1.2	4.7
Maximum	22.4	5.7	19.2
COEFFICIENT LINEIQUE, B (cm/min^{1/2})			
Moyenne	Non renseigné	0.2	0.2
Ecart type	Non renseigné	0.1	0.1
Minimum	Non renseigné	0.1	0.1
Maximum	Non renseigné	0.4	0.3
POROSITE LIBRE OU CAPILLAIRE, PI (%)			
Moyenne	9.7	3.0	8.4
Ecart type	0.5	0.9	2.0
Minimum	9.0	0.8	5.7
Maximum	10.8	4.0	10.6
COEFFICIENT DE SATURATION OU D'HIRSCHWALD, S (%)			
Moyenne	55	19.6	66.3
Ecart type	Non renseigné	5.0	10.7
Minimum	Non renseigné	5.9	50.2
Maximum	Non renseigné	24.7	72.2
ESTIMATION DE LA GELIVITE GRACE A S (%)			
D'après le coefficient de saturation, la pierre jaune est non gélive			

Tableau 5. Résumé des mesures d'imbibition capillaire effectuées sur les échantillons prélevés sur les monuments et sur les fronts de taille. Comparaison avec les données acquises par Félix en 1997. Les échantillons de ce tableau ont un litage perpendiculaire au sens d'imbibition.

Félix a réalisé peu d'essais d'imbibition capillaire. Ses seuls résultats concernent plusieurs échantillons tous issus d'un même bloc de pierre : PJNE18 (rapport 32/93/LCP). Il n'a pas paru intéressant de faire figurer les valeurs obtenues pour chaque éprouvette de ce bloc en annexe. Seul les tableaux résumés 5 et 6 reprennent des valeurs de Félix.

Litage parallèle au sens d'imbibition			
	Données Félix	Bâtiments	Front de taille
Effectif	4	10	3
Nb de faciès	1 (PJNE18)	7	3
Forme éch.	Prismes 4 x 4 x 16 cm	Cylindres Ø 2.5, L 4.5	Cubes 4x4x4
COEFFICIENT MASSIQUE, A (mg/cm².min^{1/2})			
Moyenne	20.1	5.4	12.8
Ecart type	3.2	2.0	6.2
Minimum	17.96	4.2	6.7
Maximum	24.8	10.8	18.8
COEFFICIENT LINEIQUE, B (cm/min^{1/2})			
Moyenne	Non renseigné	0.2	0.2
Ecart type	Non renseigné	0.1	0.04
Minimum	Non renseigné	0.2	0.1
Maximum	Non renseigné	0.3	0.2
POROSITE LIBRE OU CAPILLAIRE, PI (%)			
Moyenne	Non renseigné	3.1	8.4
Ecart type	Non renseigné	0.4	2.3
Minimum	Non renseigné	2.7	6.0
Maximum	Non renseigné	4.0	10.6
COEFFICIENT DE SATURATION OU D'HIRSCHWALD, S (%)			
Moyenne	Non renseigné	22.2	62.9
Ecart type	Non renseigné	1.5	10.6
Minimum	Non renseigné	19.5	50.6
Maximum	Non renseigné	24.1	69.7
ESTIMATION DE LA GELIVITE GRACE A S (%)			
	Non renseigné	Non gélive	

Tableau 6. Résumé des mesures d'imbibition capillaire effectuées sur les échantillons prélevés sur les monuments et sur les fronts de taille. Comparaison avec les données acquises par Félix en 1997. Les échantillons de ce tableau ont un litage parallèle au sens d'imbibition.

Les valeurs extraites des cinétiques d'imbibition capillaire de la pierre jaune de Neuchâtel montrent son hétérogénéité et de bonnes qualités de pierre de taille :

En premier lieu, les **coefficients massiques et linéiques** témoignent que la pierre jaune, lorsqu'elle se trouve en contact avec de l'eau liquide, absorbe cette dernière très lentement. Les valeurs les plus élevées, qui restent toutefois modestes, sont celles obtenues sur un faciès très particulier (PJNE18) dont les pores sont très ouverts (A moyen = 16.2 mg/cm².min^{1/2}), et sur quelques

échantillons prélevés sur les fronts de taille, présentant eux aussi des faciès très poreux et dont la porosité est très ouverte (A moyen = $10.4 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$). Par contre, les cinétiques capillaires des échantillons prélevés sur les monuments sont en général très lentes : A moyen = $3.8 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$, A max = 5.7 et B moyen = $0.2 \text{ cm/min}^{1/2}$. Cette faible capillarité protège naturellement la pierre : une forte pluie, ou des remontées d'eau capillaire ne sont pas des problèmes graves pour la pierre jaune qui aura tendance à se saturer très lentement. Si le processus d'apport d'eau est ponctuel dans le temps, la cinétique de capillarité est si faible que lorsque l'apport cesse, l'eau n'a que faiblement progressé à l'intérieur de la pierre. Si des sources de sels solubles se trouvent à proximité de la pierre, les sels ne pourront pas progresser très loin dans le matériau.

La pierre jaune présente une autre caractéristique très favorable à la bonne durabilité d'une pierre de taille : sa **porosité librement accessible en présence d'air** est extrêmement faible. Ceci est très net en particulier pour les échantillons prélevés sur les bâtiments (S = 19.6 – 22.2 %). Ceci signifie que pour que le volume poreux d'une pierre de Neuchâtel qui se trouve en présence d'eau soit fortement saturé, il faut que le contact entre la pierre et l'eau dure un temps extrêmement long. Autrement dit, même si une forte pluie fouette un bâtiment en pierre de Neuchâtel, ou si la base d'un bâtiment en pierre jaune se trouve soumise à des remontées capillaires pendant plusieurs jours consécutifs, la saturation en eau qui sera atteinte restera très faible. Cette saturation étant très réduite (moins du quart du volume poreux total n'est occupé par de l'eau capillaire) le risque de gélivité est extrêmement faible voire inexistant (si on considère que seule la saturation en eau intervient lors de la gélivité, ce qui n'est pas le cas).

Les résultats de ces essais montrent aussi que, pour les échantillons issus des bâtiments et des fronts de taille, lorsque le litage est perpendiculaire au sens d'imbibition, c'est-à-dire parallèle à la surface d'imbibition, il peut exister **plusieurs coefficients de capillarité A et B** pour un même échantillon et une même expérience d'imbibition capillaire. Autrement dit, les cinétiques d'imbibition évoluent au fur et à mesure que le front de capillarité progresse à l'intérieur de la pierre. Ceci est lié à la stratification de la pierre qui est formée par consolidation de lamines entrecroisées, d'épaisseur millimétrique à pluri-centimétrique. Sur les 4.5 cm de long des carottes, plusieurs lamines de structure poreuses différentes peuvent être traversées. Chacune de ces lamines est caractérisée par une cinétique d'imbibition capillaire propre.

Quelque soit l'origine des échantillons (Félix, fronts de taille ou bâtiments), les coefficients A et B sont plus grands lorsque le litage des échantillons est parallèle au sens de l'imbibition capillaire. Il existe donc une **anisotropie des propriétés capillaires de la pierre**, fonction de la stratigraphie : dans le sens parallèle au litage, la frange capillaire (B) progresse plus vite (bâtiments : $\perp 0.2 < // 0.24$; front de taille : $\perp 0.2 \approx // 0.2$) et la prise de poids en eau (A) est plus rapide (Félix : $\perp 16.2 < // 20.1$; bâtiments : $\perp 3.8 < // 5.4$; fronts de taille : $\perp 10.4 < // 12.8$). Cette anisotropie cinétique, relativement peut marquée, n'influence pas de manière significative la saturation atteinte (bâtiments : $\perp 19.6 < // 22.2$; fronts de taille : $\perp 66.3 > // 62.9$).

Pour résumer, il est évident que la pierre jaune de Neuchâtel est naturellement très bien protégée contre l'eau : elle s'imbibe très lentement et si elle est mise en contact avec de l'eau liquide pendant un temps important, la saturation en eau du volume poreux atteinte reste basse. Ces caractéristiques impliquent des risques liés à l'eau liquide très faibles pour la pierre jaune : sa gélivité est très faible voire inexistante et si des problèmes de sels apparaissent ils ont de forte chance de rester très localisés à la surface de la pierre.

5.2.2 Cinétique de séchage

Le principe de la méthode et les résultats détaillés se trouvent en annexe 8.

Félix n'ayant pas réalisé d'essais de séchage, et aucun essai de ce type n'ayant été mené sur les échantillons prélevés sur les fronts de taille, seules les valeurs du flux d'évaporation correspondant aux échantillons prélevés sur les bâtiments sont exposées dans cette annexe.

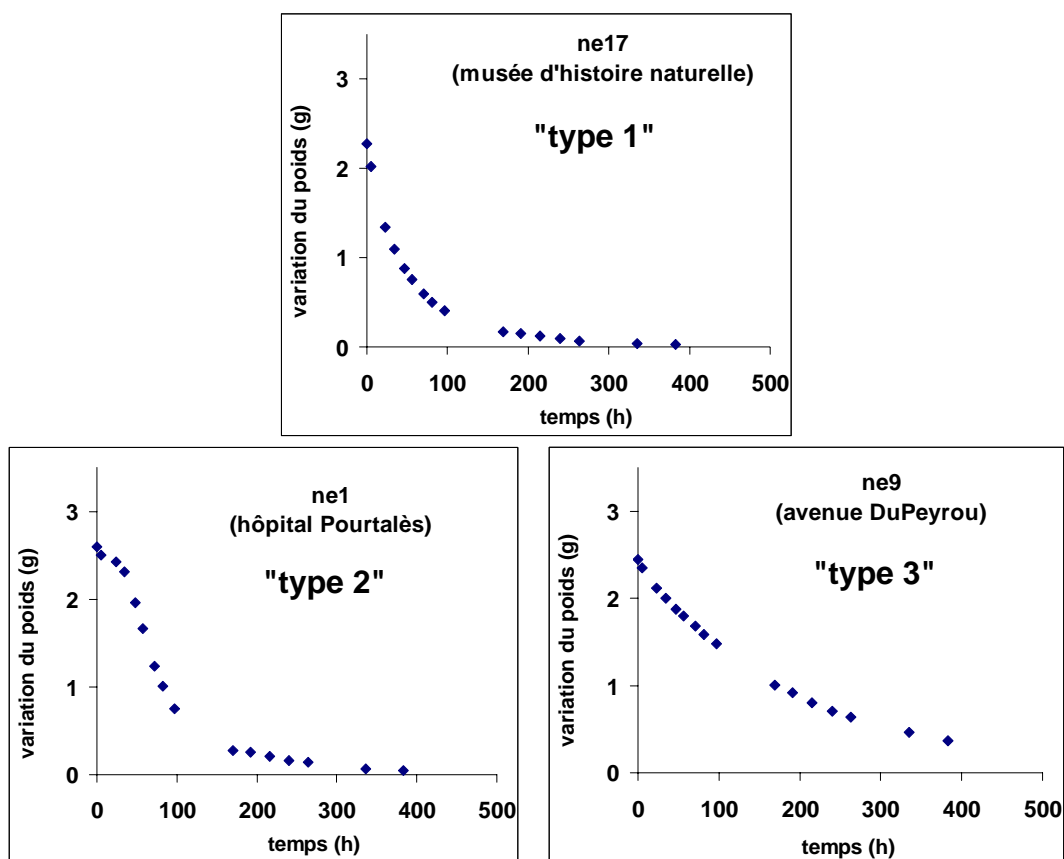


Figure 4. Courbes de séchage types des échantillons de pierre jaune prélevés sur les bâtiments. "Type 1" = type de l'échantillon ne17 avec un point d'inflexion bien marqué ; "type 2" = type de l'échantillon ne1, avec 2 inflexions ; "type 3" = type de l'échantillon ne9 avec un point d'inflexion très peu marqué, voire inexistant.

Les résultats de ces expériences montrent que le séchage de la pierre jaune après une saturation capillaire est relativement lent : pour une température de l'ordre de 21°C et une humidité relative de 33%, les échantillons cylindriques de 4.5 cm de long pour 2.5 cm de diamètre atteignent une saturation en eau proche de zéro après 400 heures pour la majorité, mais après un temps encore plus long pour certains. Néanmoins, elle a tendance à sécher complètement.

Ce séchage lent – caractéristique a priori négative - ne peut pas être néfaste à la pierre jaune mise en œuvre, étant donné que la quantité d'eau absorbée par capillarité est très faible.

D'autre part, nous constatons que les courbes de séchage des échantillons étudiés définissent trois grands groupes d'échantillons (cf. figure 4) :

- les échantillons que nous nommerons arbitrairement de "type 1", majoritaires, dont la courbe de séchage se caractérise par un point d'inflexion nettement marqué (échantillons ne12, ne13, ne15, ne17, ne18, ne23, ne24, ne27, ne28, ne29, ne30, ne31 et ne32). Ces cinétiques – qui correspondent aux cinétiques classiquement observables sur les milieux poreux homogènes - semblent être les plus efficaces en terme de rapidité de séchage ;
- les échantillons de "type 2", caractérisés par une courbe de séchage présentant deux points d'inflexion nettement marqués (échantillons ne1, ne2, ne3, ne4, ne5, ne6, ne7 et ne8) ;
- les échantillons de "type 3", caractérisés par une courbe de séchage présentant un seul point d'inflexion très peu marqué, voire totalement absent (échantillons ne9, ne19, ne20, ne21, ne22, ne25 et ne26). Ces cinétiques semblent être les moins efficaces.

Ces différences sont difficilement interprétables en détail. Toutefois, ces essais de séchage réalisés à partir de la surface externe originelle, prouvent que certains états de surface peuvent influencer le type de cinétique :

- les échantillons possédant une croûte - ou du moins une partie superficielle de structure nettement différente de la structure générale de la pierre – sèchent préférentiellement suivant le type de cinétique "2" ;
- les cinétiques de type "3" sont plus ou moins systématiquement observées pour les échantillons dont la surface est relativement lisse et recouverte d'une patine d'aspect "glacé" qui épouse parfaitement la surface ou - comme pour l'échantillon ne9 prélevé avenue DuPeyrou 4 – les échantillons recouverts d'un produit de traitement à caractère hydrophobe (les gouttes d'eau déposées à la surface de cette façade "blanchie" perlent à la surface sans pénétrer dans la pierre) ;
- les échantillons dont la surface est très rugueuse - comme les échantillons provenant des surfaces hydrogommées - ont tendance à sécher légèrement plus rapidement.

Les recouvrements de microorganismes – du moins pour ceux que nous avons pu échantillonner - ne semblent pas modifier de manière notable les cinétiques de séchage, de même que le sens du litage de la pierre.

Les résultats de ces essais de séchage montrent donc que certains états de surface peuvent influencer les cinétiques de séchage des pierres jaunes, mais ces modifications n'ont que peu de conséquences sur la durabilité de la pierre.

5.2.3 Adsorption et diffusivité de la vapeur d'eau

Le principe des méthodes et les résultats détaillés se trouvent en annexes 9 et 10.

Seuls les échantillons prélevés sur les constructions neuchâteloises ont subi ces expériences d'adsorption et de diffusivité (ou perméabilité à la vapeur d'eau). Et parmi ces échantillons, certains échantillons prélevés sur le musée d'histoire naturelle n'ont pas pu être mis en adsorption parce qu'au moment où l'expérience a eu lieu, une partie de ces échantillons étaient en France pour subir des mesures de rugosité de surface.

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant.

	DIFFUSIVITE Flux (g/h.cm ²) ΔHR = 64%	ADSORPTION DE VAPEUR D'EAU (Prise de poids en eau / poids de l'échantillon sec) x 100			
		HR 33%	HR 75%	HR 93%	HR 97%
Forme éch.		1/4 de cylindres, h=4,5 cm, Ø=2,6 cm			
Effectif	29	21	21	21	17
Nb de faciès	21	18	18	18	14
Moyenne	3.2x10⁻⁴	0.10	0.30	> 0.58	>0.45
Ecart type	0.7x10 ⁻⁴	0.08	0.29	> 0.62	> 0.13
Minimum	1.4x10 ⁻⁴	0.05	0.13	0.24	0.29
Maximum	4.3x10 ⁻⁴	0.42	1.43	> 3.01	> 0.64

Tableau 7. Résumé des mesures de diffusivité et d'adsorption de la vapeur d'eau sur les échantillons prélevés sur les monuments. Le gradient d'humidité relative : était de 64 unités (97% d'un côté des échantillons, 33% de l'autre côté). Pour les expériences d'adsorption menées pendant seulement 100 jours, tous les échantillons n'avaient pas atteint leur poids d'équilibre (à 93%) lors de l'interruption des mesures. Les expériences ont toutes été réalisées à une température de l'ordre de 21°C.

Les résultats obtenus montrent que la pierre jaune de Neuchâtel est un matériau très peu hygroscopique : même aux humidités relatives les plus élevées, la pierre jaune adsorbe très rarement plus de 1% de son poids sec. Les échantillons qui adsorbent le plus sont soit plus argileux ou microporeux, soit ils sont recouverts d'une croûte gypseuse qui à elle seule rend compte du fort degré d'hygroscopicité. C'est le cas par exemple pour l'échantillon ne15 – dont la partie supérieure est constituée d'un mortier - qui après 100 jours d'adsorption n'avait pas atteint le poids d'équilibre à 93% d'humidité relative, mais qui avait toutefois déjà adsorbé un peu plus de 3% de son poids (ce qui reste encore très peu).

Ceci signifie que les faciès de pierre jaune habituellement employés dans les constructions sont très peu réactifs à la vapeur d'eau quand ils sont sains, mais

restent encore très peu hygroscopique lorsqu'ils ont subi des modifications de surface quelles que soient ces modifications.

Les mesures de diffusivité quant à elles montrent que :

- d'une part la perméabilité à la vapeur de la pierre jaune est moyenne (de l'ordre de 3.2×10^{-4} g/h.cm²), ce qui explique les cinétiques de séchage relativement lentes ;
- d'autre part tous les faciès de la pierre jaune laissent traverser la vapeur d'eau de manière plus ou moins identique, de manière plus ou moins corrélée à la porosité totale et que les variations de faciès imposent plus de différences que les modifications de surface quelles qu'elles soient.

Pour résumer, les interactions entre la pierre jaune et la vapeur d'eau ambiante sont une fois de plus principalement conditionnées par les variations d'un faciès à l'autre. Si les modifications de surface interviennent, c'est en général de manière si discrète que leur influence ne peut pas être mise en évidence, du moins pas par les moyens employés lors de cette étude.

5.3 Propriétés physiques et mécaniques

5.3.1 Résistance à la compression uniaxiale

Le principe de la méthode et les résultats complets des mesures sont exposés en annexe 11.

Le tableau suivant résume les résultats des mesures effectuées sur les échantillons prélevés sur les bâtiments neuchâtelois et sur les fronts de taille, ainsi que les résultats obtenus par Félix (1993).

	RESISTANCE A LA COMPRESSION UNIAXIALE SUR ECHANTILLON SEC - RSEC (N/mm ²)			
	Données Félix (1993)	Bâtiments		Front de taille
Litage	⊥	⊥	//	⊥
Forme éch.	Cubes 7 x 7 x 7	1/4 de cylindres, h=4,5 cm, Ø=2,6 cm		Cubes 4 x 4 x 4
Effectif	6	9	6	9
Nb de faciès	1	8	6	5
Moyenne	25.9	17.8	19.9	39.6
Ecart type	2.7	3.8	6.7	14.5
Minimum	22.9	9.6	12.6	16.5
Maximum	30.7	23.4	32.6	58.5

Tableau 8. Résumé des mesures de résistance à la compression uniaxiale effectuées sur les échantillons prélevés sur les monuments et les fronts de taille. Comparaison avec les valeurs obtenues par Félix (1993). ⊥ : litage parallèle à la pression appliquée ; // : litage perpendiculaire à la pression appliquée.

Les résultats montrent en tout premier lieu que la résistance de la pierre jaune à la compression uniaxiale est bonne et largement satisfaisante pour une pierre de taille (aux alentours de 20 N/mm² pour les pierres jaunes utilisées en construction). Si des problèmes de statiques apparaissent ils ne seront certainement pas imputables à une résistance à la compression trop faible.

En comparant les résultats des différents d'échantillons analysés, nous pouvons encore en tirer les conclusions suivantes :

- les faciès employés sur les constructions sont les pierres qui possèdent les "plus faibles" résistances à la compression uniaxiale (entre 9.6 et 32.6 N/mm²). Les pierres échantillonnées sur les fronts de taille sont beaucoup plus résistantes (entre 16.5 et 58.6 N/mm²) parce que beaucoup plus dures ;
- d'après nos résultats, la pierre jaune ne présente pas d'anisotropie de résistance à la compression. En effet la différence entre la résistance des échantillons présentant un litage parallèle ou perpendiculaire à la pression appliquée lors de l'essai de compression n'est pas flagrante. Nous pouvons donc en conclure que pour la plupart des faciès employés pour les constructions, une pierre jaune posée avec son litage perpendiculaire à sa base inférieure (résistance à la compression de l'ordre de 19.9N/mm²) pourra tout aussi bien supporter le poids des pierres sus-jacentes qu'une pierre posée dans le sens normal (litage parallèle à la base ; résistance à la compression de l'ordre de 17.8 N/mm²).

Pour résumer, l'excellente cimentation de la pierre jaune de Neuchâtel et la grande variabilité des structures de porosité liée à l'existence de litages entrecroisés, lui confèrent une excellente résistance à la compression uniaxiale, quelque soit le sens de pose de la pierre.

5.3.2 Dureté

L'essai de dureté superficielle recommandé par les normes RILEM ou autres ne nous a pas paru très adapté à la détermination de la dureté d'une pierre hétérogène comme la pierre jaune de Neuchâtel. Nous avons donc décidé de ne pas faire ces mesures. Outre le fait que les pierres échantillonnées sur les anciens fronts de taille de Hauterive étaient beaucoup plus dures que les pierres échantillonnées sur les constructions, une observation qualitative supplémentaire a pu être faite lors du carottage des bâtiments. Elle nous a paru suffisamment intéressante pour être soulignée :

Lors du carottage des constructions sélectionnées, il a été systématiquement remarqué une différence de dureté, donc de cohésion de la pierre, entre la surface et la profondeur : pour tous les échantillons prélevés, les trois ou quatre premiers centimètres de pierre se sont avérés plus durs que la pierre rencontrée au delà. Etant donné que cette observation a pu être faite pour tous les types de constructions échantillonnées et quelque soit l'exposition, il est difficile d'attribuer cette différence de dureté à un éventuel traitement ou à des conditions environnementales particulières.

Les humidifications sont plus ou moins importantes suivant que la pierre est abritée ou non, mais les observations faites en période de pluie ont montré que toutes les pierres échantillonnées sur les bâtiments peuvent être atteintes par de l'eau liquide à un moment ou un autre. Même les blocs de pierres échantillonnés sous le portail de la collégiale sont nettement mouillés – du moins en surface - lors des périodes humides, en raison de la présence en grande quantité de sels hygroscopiques. La différence de dureté entre les trois ou quatre centimètres externes et la profondeur de la pierre peut probablement être attribuée au processus de dissolution /recristallisation de calcite lors des cycles humidification séchage successifs.

Ceci n'est malheureusement pas étayé par les observations en lame mince - qui concerne une épaisseur de pierre sans doute trop restreinte pour montrer une différence de cimentation évidente - ni par une éventuelle modification de cinétique d'imbibition capillaire nette et/ou systématique entre la profondeur et la surface de la pierre. Néanmoins, comme il a été montré au chapitre 5.2.1, les coefficients massiques d'imbibition capillaire ainsi que les saturations capillaires atteintes sont systématiquement plus faibles pour les échantillons prélevés sur les bâtiments que pour les échantillons provenant des fronts de taille. Ceci pourrait s'expliquer par des recristallisations - de dimensions inférieures à 1 μm , puisque non détectables au microscope optique - qui consolident la pierre en surface, modifiant ainsi la cohésion de la pierre en modifiant aussi légèrement les propriétés de transferts de l'eau. Il serait intéressant de vérifier ces hypothèses, mais un tel travail nécessite l'étude de beaucoup plus d'échantillons et la mise en pratique de méthodes d'analyses autres que celles employées ici.

5.3.3 Dilatation hydrique

Le principe de la méthode et les résultats complets des mesures se trouvent en annexe 12.

Le tableau 9 résume les résultats des mesures effectuées par Félix en 1993 ainsi que les mesures faites sur les échantillons des bâtiments neuchâtelois.

Il est couramment admis que la valeur de coefficient hydrique à partir de laquelle des problèmes peuvent apparaître dans la pierre est de 1 mm/m. On constate que les valeurs obtenues pour la pierre jaune sont bien en deçà de cette valeur. Ceci implique que lorsque cette pierre est soumise à des cycles imbibition /séchage, elle réagit physiquement tellement peu que les tensions qui pourraient se créer à l'intérieur de son réseau poreux restent toujours très faibles. Ainsi des dégâts consécutifs à une trop forte dilatation hydrique sont exclus pour la pierre jaune, ou du moins pour tous les faciès de pierre jaune que nous avons pu étudier.

Litage	COEFFICIENT DE DILATATION A 72 HEURES - ϵ_{72} (mm/m)		
	Données Félix (1993)	Bâtiments	
	perpendiculaire	perpendiculaire	parallèle
Forme éch.	Prismes 10 x 4 x 4 cm	1/4 de cylindres, h=4,5 cm, $\varnothing=2,6$ cm	
Effectif	6	9	7
Nb de faciès	1	8	7
Moyenne	0.11	0.42	0.49
Ecart type	0.01	0.06	0.17
Minimum	0.09	0.34	0.22
Maximum	0.12	0.54	0.70

Tableau 9. Résumé des mesures de dilatation hydrique effectuées sur les échantillons de Félix (1997) et sur les éprouvettes prélevées sur les monuments. Litage perpendiculaire et parallèle au sens de la mesure.

5.3.4 Dilatation thermique

Le principe de la méthode et les résultats complets des mesures se trouvent en annexe 13. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Litage	Coeff. de dilatation thermique à 70°C (mm/mm.°C) $\times 10^{-6}$ – Bâtiments	
	Litage perpendiculaire	Litage parallèle
Forme éch.	1/4 de cylindres de h = 4,5 cm et $\varnothing = 2.6$ cm	
Effectif	9	6
Nb de faciès	8	6
Moyenne	9.2	8.6
Ecart type	2.4	0.7
Minimum	3.4	7.5
Maximum	11.3	9.6

Tableau 10. Résumé des mesures de dilatation thermiques effectuées sur les échantillons prélevés sur les monuments. Litage perpendiculaire et parallèle au sens de la mesure.

Seuls les échantillons prélevés sur les bâtiments de Neuchâtel ont été testés vis-à-vis de la dilatation thermique.

Ces résultats montrent que la pierre jaune réagit très peu aux variations de température. En effet une moyenne de l'ordre de 9 mm/mm.°C signifie qu'un bloc de 50 cm de long par exemple s'allongera de 0.3 mm lors d'une variation de température de -20 à +40°C. Nous pouvons considérer la dilatation thermique de la pierre jaune comme totalement négligeable et donc totalement inoffensive pour la durabilité de la pierre mise en œuvre.

5.4 QUELQUES MODIFICATIONS DE SURFACE INDUITES PAR L'EXPOSITION

Nous souhaitons caractériser les différents états de surface que peut présenter la pierre jaune en ville de Neuchâtel. Aussi, nous avons sélectionné différents cas de figure typiques permettant de mettre en avant les problèmes que rencontre l'entretien de la pierre jaune. Ces cas typiques correspondent à d'autres objets que ceux échantillonnés.

5.4.1 Couleur

Le principe de la méthode de mesure colorimétrique et les résultats complets des mesures se trouvent en annexe 14. Les données colorimétriques sont en partie confirmées par les macro-photographies reportées en annexe 15.

Il aurait été commode de caractériser d'une part la pierre jaune elle-même et d'autre part, chaque type de désordre observé au chapitre 4.2. Mais la détermination d'une valeur de couleur représentative de TOUTE la pierre jaune serait irrationnelle étant donné le nombre différent de couleurs que peut présenter cette roche : toutes les variations de saturation du jaune agrémenté de plus ou moins de vert, de violet, de rose... Et le problème est encore plus complexe lorsqu'aux variations de teintes naturelles se superposent les variations de teintes liées aux divers désordres.

Bien que la pierre jaune utilisée pour la construction présente, dans la région de Neuchâtel, une relative uniformité de teintes, la détermination de "constantes" pour cette pierre mise en œuvre reste encore aberrant.

Toutefois, nous avons constaté des variations de couleurs nettes provoquées par tel ou tel traitement de surface. Aussi avons nous choisis ces quelques cas particuliers afin de mettre en évidence ces variations non aléatoires (cf. annexe 14). Ces cas particuliers sont en majorité des bâtiments différents des bâtiments qui ont été échantillonnés.

Il suffit de regarder les photographies de l'annexe 14 (ou de l'annexe 15) pour être convaincu de la modification de couleur de la pierre jaune en fonction de son exposition ou de ses différents traitements de surface. Bien que les paramètres de couleur Lab soient nettement moins "parlants" que les photographies elles-mêmes, nous avons néanmoins relevé quelques valeurs afin de quantifier un minimum ces variations de couleur.

Dans le tableau suivant, sont reportées les valeurs extrêmes des paramètres L, a et b mesurées sur ces quelques objets sélectionnés en ville de Neuchâtel.

Il n'est pas étonnant de constater que les pierres propres sont beaucoup plus lumineuses (L tend vers 100) que les pierres sales, et que leur paramètre de teinte, a, tend vers des valeurs plus jaunes.

Par contre, les mesures reportées en annexe 14 mettent en évidence que plus le nettoyage des pierres jaunes a été agressif, plus la luminosité est intense (L tend vers 100) : les valeurs de L les plus grandes sont en effet obtenus pour les bâtiments faubourg de l'Hôpital, 18 (L = 68.3, a = 4.5, b = 24) et Place Numa Droz, 3 (L = 65, a = 3.1, b = 21.3), deux bâtiments nettoyés par hydrogommage de façon agressive.

Toutefois, cette constatation peut être tempérée par le fait qu'un lessivage naturel de la pierre jaune, par des écoulements réguliers d'eau de pluie, permet d'atteindre un résultat peu différent du résultat obtenu par un hydrogommage agressif : sur le bâtiment Rue des Terreaux, 10-12, les zones lessivées par les eaux de pluies donnent les valeurs suivantes : $L = 64$, $a = 4.1$ et $b = 27.1$.

	Pierre jaune "propre"	Pierre jaune "sale"
< L >	57 – 68.3	29.6 – 55
< a >	3.1 – 6.4	1.6 – 5.4
< b >	18 – 28.9	5.9 – 27.4

Tableau 11. Valeurs minimales et maximales mesurées pour les paramètres de couleur L (0 = noir, 100 = blanc), a (-60 = vert, +60 = rouge) et b (-60 = bleu, +60 = jaune)

5.4.2 Rugosité

Le principe de la méthode de mesure de la rugosité et les résultats sont exposés en annexe 16.

Ces mesures étant très coûteuses, elles n'ont été réalisées que sur un objet très particulier : le musée d'histoire naturelle. Ce bâtiment a été choisi parce qu'il a été le terrain d'essais de nettoyage. Lorsqu'il a été nettoyé par hydrogommage en 2000, certaines zones ont été conservées dans leur état, et sur l'une de ces zones témoin, un essai de nettoyage par compresse a été effectué.

Nous avons ainsi, sur la façade nord, sous l'une des fenêtres à hauteur d'homme, sur un même bloc de pierre, un état de surface non nettoyé, un état de surface après nettoyage par hydrogommage et un état de surface après nettoyage par compresse. Les prélèvements autorisés ont permis d'échantillonner chacune de ces trois zones, et les mesures de rugosité ont pu être faites sur ces échantillons.

Les résultats montrent que la rugosité de surface sur la zone nettoyée par hydrogommage a été fortement augmentée par le nettoyage : la complexité (rapport entre la différence surface développée moins surface projetée et la surface développée, cf. annexe 16) est de l'ordre de 60%, alors que la complexité de la surface non nettoyée est de l'ordre de 15%. Par contre le nettoyage par compresse n'augmente que faiblement la rugosité de surface puisqu'elle est, après nettoyage de l'ordre de 25%. Il est évident que cette augmentation de rugosité résulte d'une érosion de la pierre et donc d'une certaine perte de matière qui se confirme par l'observation des détails sculptés et des angles qui perdent leur netteté au cours des nettoyages.

Les différences d'aspect des surfaces sont aussi visibles sur les macro-photographies en annexe 15.

Ces quelques chiffres sont confirmés par de nombreuses observations sur des bâtiments nettoyés par des hydrogommages de différentes intensités, comme par exemple sur le collège latin, place Numa Droz 3 ou les villas jumelles faubourg de l'hôpital 18 et faubourg du lac 13 (cf. annexe 15).

Ces constats témoignant des problèmes liés aux nettoyages doivent toutefois être relativisés, étant donné que dans le cas où les pierres jaunes sont fortement exposées aux pluies battantes et/ou d'importants ruissellements et/ou aux vents, leur surface semblent subir des modifications de surface tout à fait comparables à celles observées après nettoyage (cf. collège des Terreaux, rue des Terreaux 10-12 en annexe 15).

5.4.3 Capillarité de surface

Il est théoriquement possible, au moyen de "pipes capillaires" de mesurer la capillarité de surface et surtout de comparer la capillarité d'une même pierre traitée de diverses façons. Nous avons tenté de mettre en pratique ce type de mesures sur les constructions neuchâteloises à l'aide pipes capillaires dites "de Karsten". Malheureusement, la pierre jaune présente une si faible capillarité (cf. chapitre 5.2.1) que les résultats se sont avérés inexploitablement quand ils n'étaient pas tout bonnement négatifs. Nous ne prendrons donc pas la peine de détailler ni la méthode, ni les quelques résultats obtenus.

Nous noterons seulement que ces échecs prouvent à quel point la pierre jaune est un matériau naturellement protégé contre les infiltrations d'eau de pluie.

6 CONCLUSION

Toute cette étude a montré à quel point la pierre jaune, calcaire oolitique et bioclastique, est un matériau très hétérogène, que ce soit à l'échelle de l'affleurement, des blocs d'appareil, des échantillons de quelques centimètres ou encore à l'échelle des pores. Ce fait étant lié directement à son mode de formation par accumulation et cimentation de lamines plus ou moins épaisses et entrecroisées de sables carbonatés. Cette pierre est de ce fait caractérisée, non pas par un faciès simple, mais par la juxtaposition de faciès nombreux et très divers montrant chacun des porosités s'étalant de 2 à 20%.

Ce matériau s'avère posséder de nombreuses caractéristiques physiques et mécaniques excellentes qui la protègent naturellement contre les dégâts potentiels : sa faible capillarité – impliquant entre autres une protection naturelle contre l'infiltration des eaux de pluie et contre le gel -, sa grande résistance à la compression, ses faibles dilatations hydrique et thermique sont autant d'atouts qui en font un excellent matériau de construction. Elle ne montre donc que rarement des problèmes graves sur les constructions et dans ces cas, ce sont toujours des problèmes très localisés. De plus, l'étude d'échantillons prélevés directement sur les constructions neuchâteloises a permis de montrer que les désordres qui l'affectent (patines, croûtes, développement de microorganismes,...) sont exclusivement superficiels et donc visuels, sauf conditions d'expositions à l'eau et/ou aux sels exceptionnellement mauvaises et/ou faciès particulièrement

fragiles.

La comparaison des échantillons de construction et d'échantillons de front de taille a confirmé que de manière générale, les artisans qui ont exploité cette pierre savaient choisir les faciès les plus durables, laissant les pierres plus sensibles ou difficilement exploitables sur les fronts de taille. Les fronts de taille étant essentiellement constitués de matériau non utilisable et bien différent du matériau mis en œuvre dans les bâtiments, notre tentative de comparer les altérations des pierres jaunes à l'affleurement et des pierres jaunes de construction s'est avérée impossible.

Comme le montrent toutes les observations et analyses faites à différentes échelles, sauf cas exceptionnels très locaux, les propriétés de la pierre jaune les plus intensément modifiées par la mise en œuvre et les expositions aux intempéries, sont des propriétés de surface dont nous pouvons distinguer deux grandes catégories : la couleur et la rugosité. Si la première n'est qu'un désordre visuel, il n'en reste pas moins celui qui dérange le plus. Et c'est essentiellement en souhaitant "raviver" les couleurs de la pierre jaune au moyen de divers nettoyages mécaniques que sa rugosité se trouve affectée. La modification de cette dernière n'est pas dangereuse en soi. Toutefois, il est évident qu'en augmentant la rugosité de surface par les nettoyages, les aspérités pouvant piéger les poussières et autres polluants sont multipliées et par conséquent, augmenter la rugosité revient à augmenter la vitesse d'assombrissement des surfaces de pierre jaune. Qui dit augmentation de la vitesse d'encrassement, dit nettoyages plus fréquents... Nous entrons donc dans un cercle vicieux qui – en raison de la perte de matière implicite - à court terme risque d'effacer toute traces d'outil, d'arrondir les angles, d'émousser les moulures et autres décors sculptés, et à moyen terme risque de fragiliser la pierre jaune en raison d'impacts mécaniques répétés et d'injection d'eau en quantité inhabituelle qui accompagne en général ces nettoyages. Il serait donc bon de prendre garde aux méthodes de nettoyage employées et de s'assurer qu'un nettoyage est réellement nécessaire avant de le pratiquer.

Enfin cette étude a soulevé quelques questions plus fondamentales qu'il serait intéressant d'approfondir dans un autre cadre comme le fait que toutes les pierres échantillonnées sur les bâtiments présentaient une dureté sensiblement plus importante sur les 3 à 4 cm externes, ou comme la mise en relation des modifications des cinétiques de séchage avec les désordres superficiels qui affectent les pierres.

Nous concluons donc en répétant que la pierre jaune est un matériau de construction exceptionnel de durabilité excellente lorsque les interventions qui lui sont imposées sont réfléchies.

Toutefois, nous rappelons encore que si dans la plupart des cas les altérations "graves" qui affectent la pierre jaune de Neuchâtel sont peu fréquentes, chaque édifice – qu'il soit fait de pierre jaune ou d'un autre matériau - constitue un cas particulier qui doit impérativement être étudié en détail avant une intervention de grande ampleur.

7 BIBLIOGRAPHIE

CRC Handbook of Chemistry and Physics, 1983 – Weast R.C. editor - 64th Ed., C.R.C. Press

Félix C., 1993 – Rapport 32/93/LCP – Etude de la pierre jaune de Neuchâtel – Essais physiques et mécaniques sur les calcaire de jaumont (suite) et de Neuchâtel. Laboratoire de conservation de la pierre, Lausanne, 130p.

Felix C., 1995 - Rapport 22/95/LCP – Etude de la pierre jaune de Neuchâtel – Ebauche d'une nomenclature des altérations de la Pierre jaune – remarques à propos des dégradations de la façade sud de la salle du grand conseil neuchâtelois. Laboratoire de Conservation de la Pierre, Lausanne, 35 p.

Felix C., 1997 - Rapport 2/97/EC-L – Etude de la pierre jaune – Caractérisation pétrographique et pétrophysique des microfaciès de la pierre jaune. Expert-Center Lausanne, 250 p.

Foucault A. et Raoult J.-F., 2001 - Dictionnaire de Géologie - 5e éd., Ed. Dunod, 380 p.

Fripiat J., Chaussidon J. et Jelli A., 1971. Chimie physique des phénomènes de surface. Masson & Cie ed., Paris, 387p.

Gérard R., 1969 – Détermination de la résistance au gel des matériaux de construction par la porosimétrie au mercure – C.S.T.C., n°1, p. 6-15.

RILEM – UNESCO – 1978. Altération et protection des monuments en pierre, Colloque international, Paris 5-9 juin 1978.

Rousset B., 2002a – Rapport EC/BR/02601-01 – Pierre jaune de Neuchâtel – rapport intermédiaire n°1 – Expert-Center Lausanne, 32 p.

Rousset B., 2002b – Rapport EC/BR/02601-02 – Pierre jaune de Neuchâtel – rapport intermédiaire n°2 – Liste des objets sélectionnés lors de la visite du mardi 27 août 2002 pour échantillonnages et mesures - Expert-Center Lausanne, 10 p.

Rumley G., 1993 – Sédimentologie, minéralogie et stratigraphie de l'hauteurivien dans le Jura neuchâtelois et vaudois (Suisse) – thèse de doctorat de l'Université de Neuchâtel. 205 p.

Schardt H., 1906. Sur l'avenir de l'exploitation de la pierre jaune entre Neuchâtel et Saint-Blaise

Vergès-Belmin V., Anson Cartwright T., Cassar J. et al., 2004 - An internet-accessible multilingual illustrated glossary on stone deterioration - In : Proceedings of the 10th international congress on deterioration and conservation of stone, Stockholm, June 27-July 2, 2004 / organised by ICOMOS Sweden ; ed. by Daniel Kwiatkowski et Runo Löfvendahl, vol. II, p. 699-706.

Lausanne, le 29 décembre 2006 /BR

Expert-Center pour la Conservation du patrimoine bâti,
Laboratoire de Lausanne – EPFL

Bénédicte Rousset
Dr en pétrophysique
Directrice

ANNEXE 1

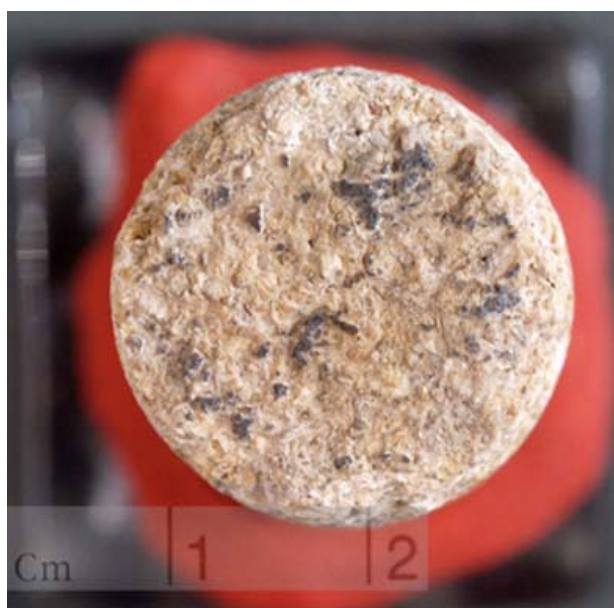
ORIGINE DES ECHANTILLONS PRELEVES SUR LES CONSTRUCTIONS NEUCHATELOISES

ECHANTILLON NE-1 Rue de la maladière, 45 - Hôpital Pourtalès – portail d'entrée

Désordres : Patine – encroûtement – efflorescences / **Litage** // à la surface

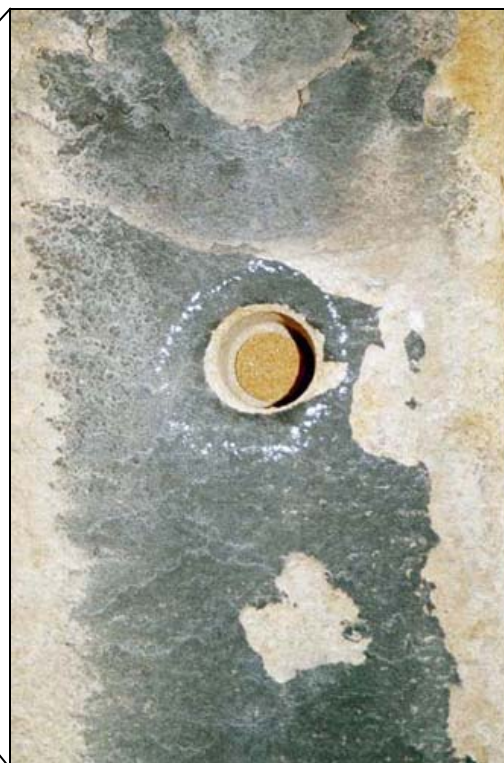


ECHANTILLON NE-1
Rue de la maladière, 45 - Hôpital Pourtalès – portail d'entrée



ECHANTILLON NE-2 Rue de la maladière, 45 - Hôpital Pourtalès – portail d'entrée –

Désordres : encroûtement – efflorescences / **Litage** non net



ECHANTILLON NE-2
Rue de la maladière, 45 - Hôpital Pourtalès – portail d'entrée



ECHANTILLON NE-3 Rue de la maladière, 45 - Hôpital Pourtalès – portail d'entrée

Désordres : encroûtement / Litage \perp à la surface



Face à l'hôpital

ECHANTILLON NE-3
Rue de la maladière, 45 - Hôpital Pourtalès – portail d'entrée

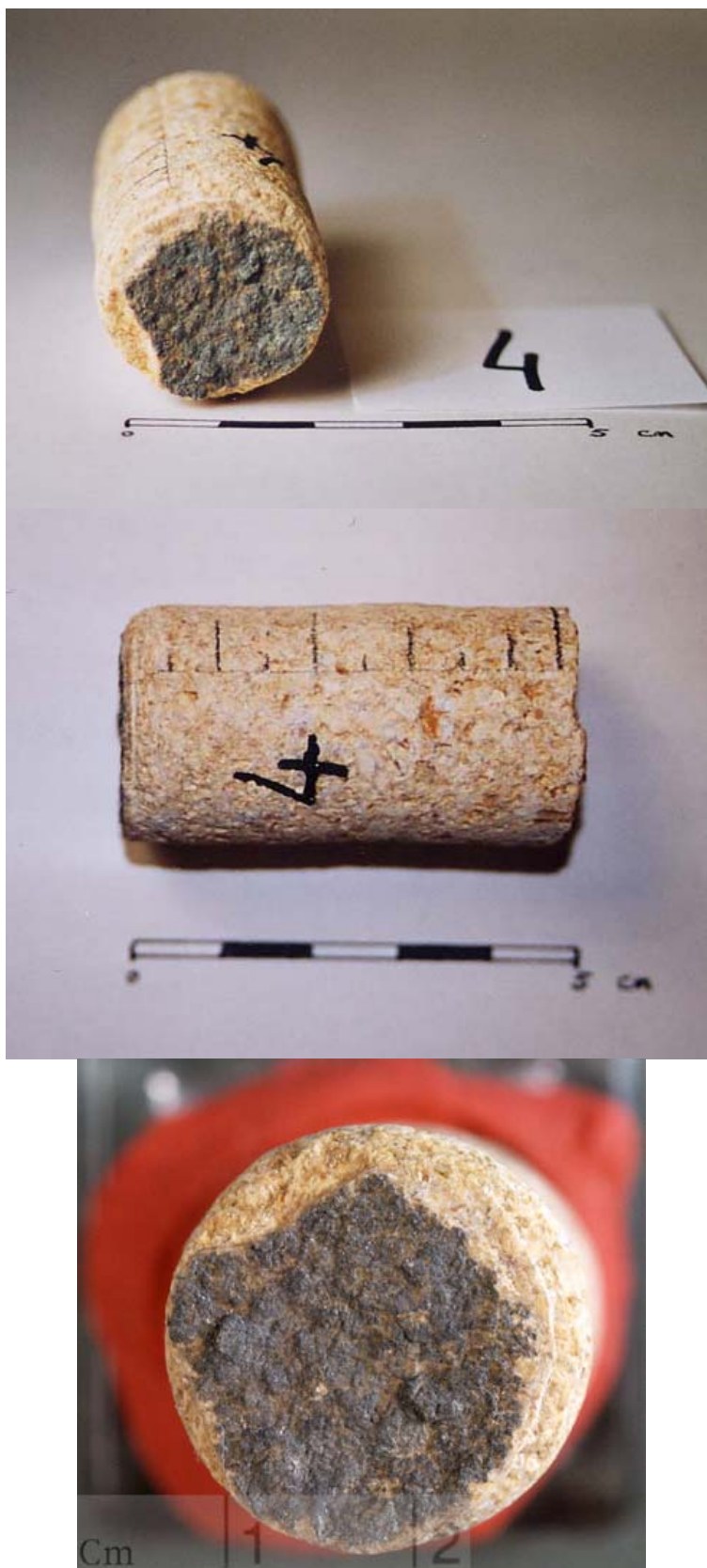


ECHANTILLON NE-4 Rue de la maladière, 45 - Hôpital Pourtalès – portail d'entrée

Désordres : encroûtement - subflorescences / **Litage** \perp à la surface



ECHANTILLON NE-4
Rue de la maladière, 45 - Hôpital Pourtalès – portail d'entrée



ECHANTILLON NE-5 Faubourg du lac – (Wavre) – encadrement porte, mur d'enceinte

Désordres : encroûtement / Litage // à la surface



ECHANTILLON NE-5 Faubourg du lac – (Wavre) – encadrement porte, mur d'enceinte

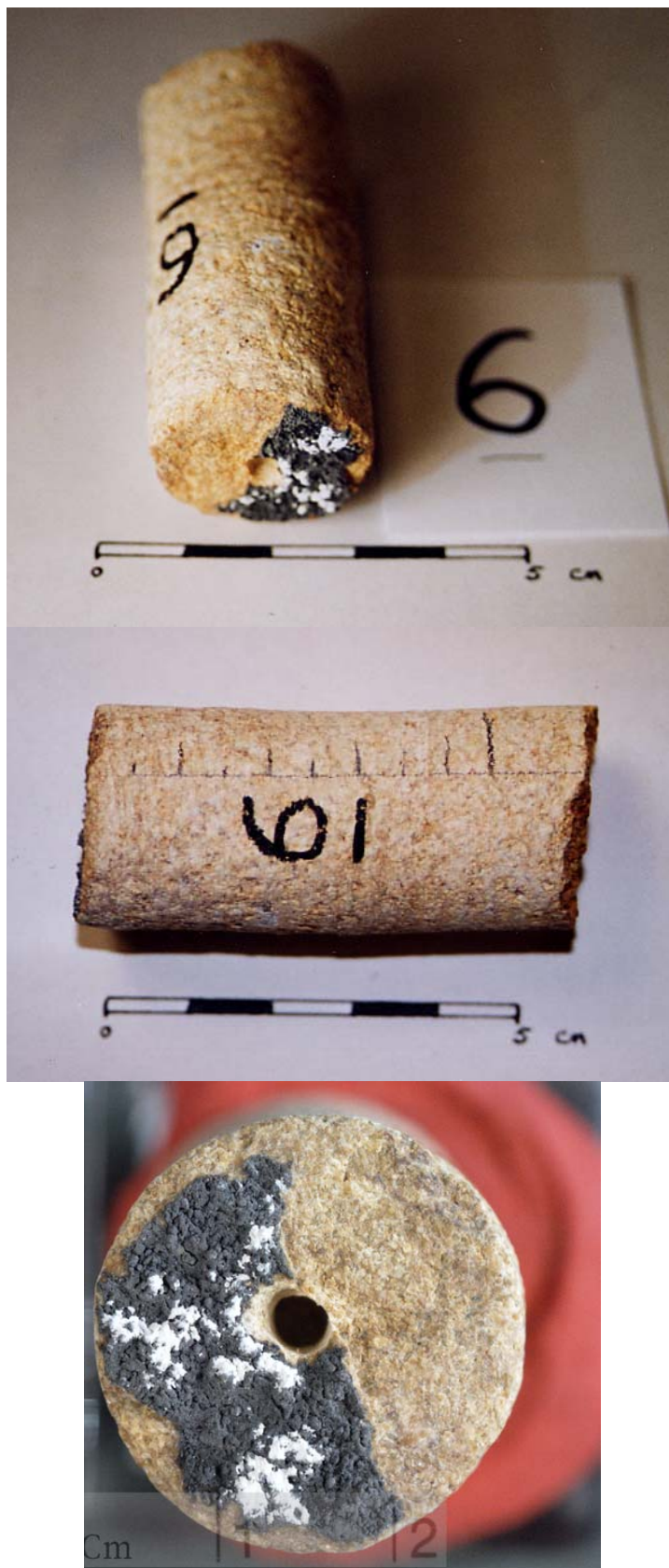


ECHANTILLON NE-6 Faubourg du lac – (Wavre) – encadrement porte, mur d'enceinte

Désordres : encroûtement / **Litage** // à la surface

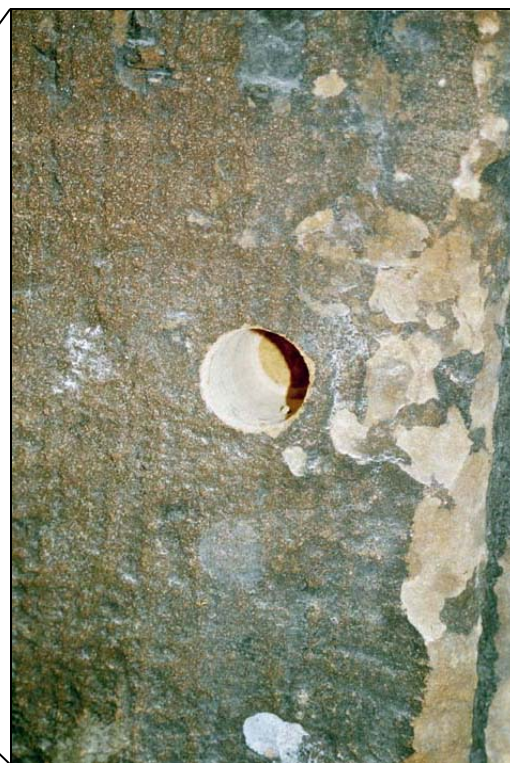


ECHANTILLON NE-6 Faubourg du lac – (Wavre) – encadrement porte, mur d'enceinte



ECHANTILLON NE-7 Faubourg du lac – (Wavre) – encadrement porte, mur d'enceinte

Désordres : patine ? – encroûtement ? / Litage non net



ECHANTILLON NE-7 Faubourg du lac – (Wavre) – encadrement porte, mur d'enceinte

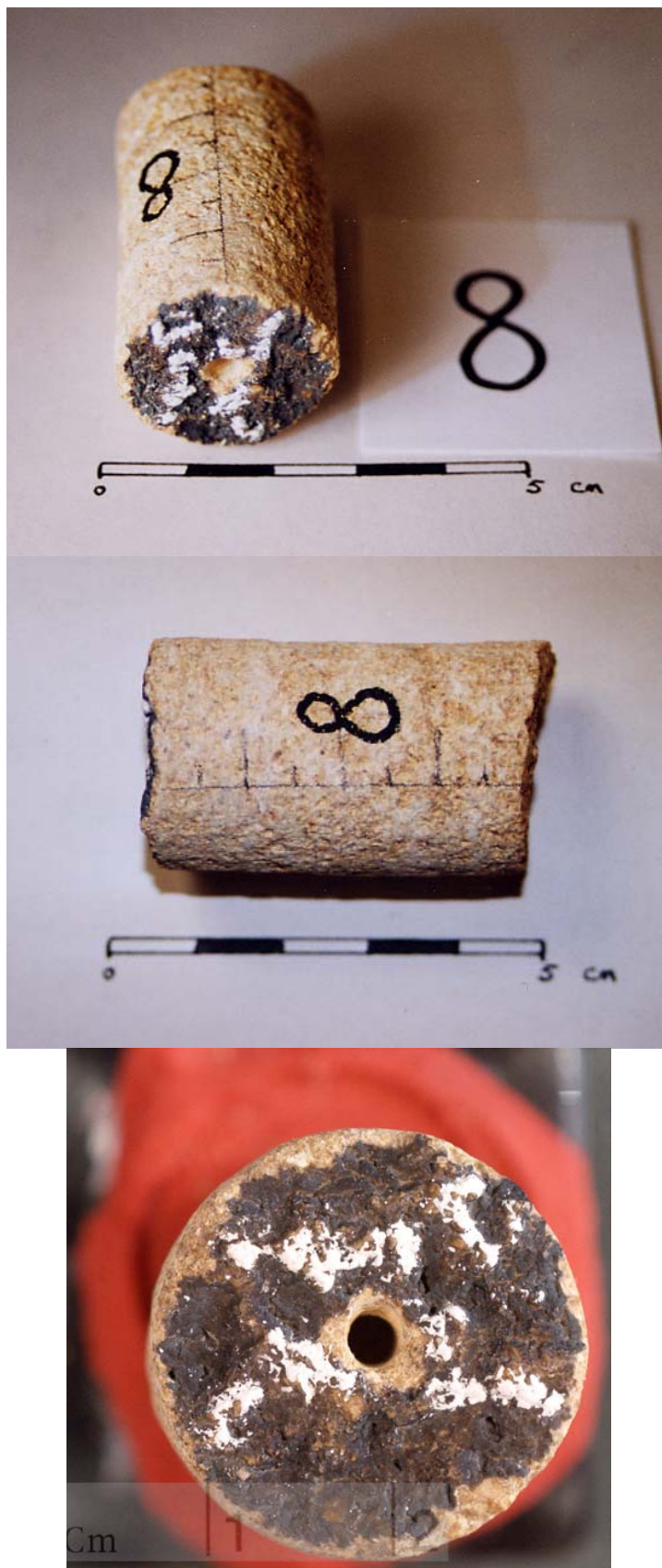


ECHANTILLON NE-8 Faubourg du lac – (Wavre) – encadrement porte, mur d'enceinte

Désordres : patine ? – encroûtement ? / Litage // à la surface

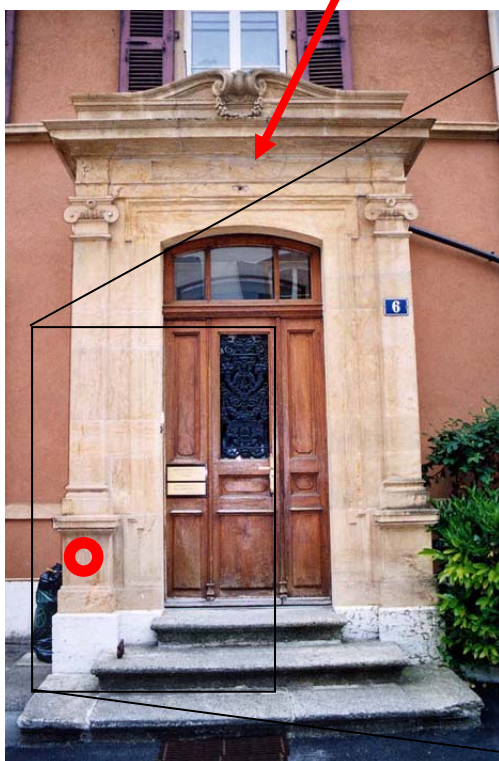


ECHANTILLON NE-8 Faubourg du lac – (Wavre) – encadrement porte, mur d'enceinte



ECHANTILLON NE-9 Avenue DuPeyrou, 6 – Portes jumelles

Désordres : décoloration ? traitement ? / **Litage** // à la surface



ECHANTILLON NE-9
Avenue DuPeyrou, 6 – Portes jumelles



ECHANTILLON NE-10 Avenue DuPeyrou, 4 – Portes jumelles

Désordres : décoloration ? traitement ? / **Litage** non observé

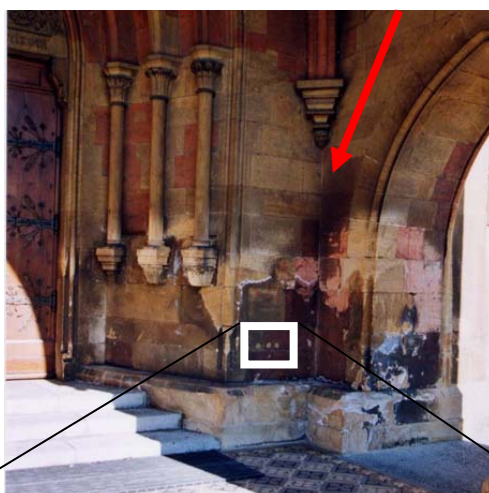


ECHANTILLON NE-10
Avenue DuPeyrou, 4 – Portes jumelles



ECHANTILLON NE-11 Rue de la collégiale, 5 – porche de la collégiale

Désordres : patine - rubéfaction / Litage \perp à la surface

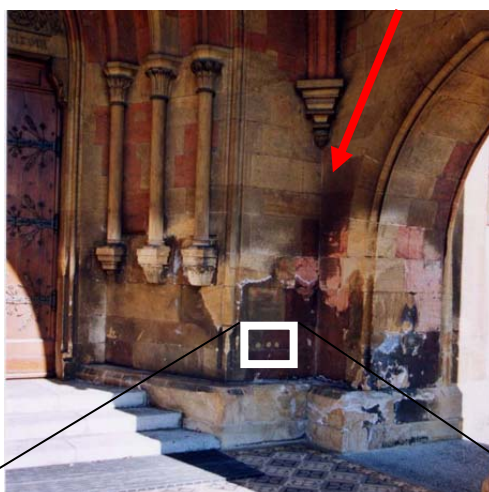


ECHANTILLON NE-11
Rue de la collégiale, 5 – porche de la collégiale

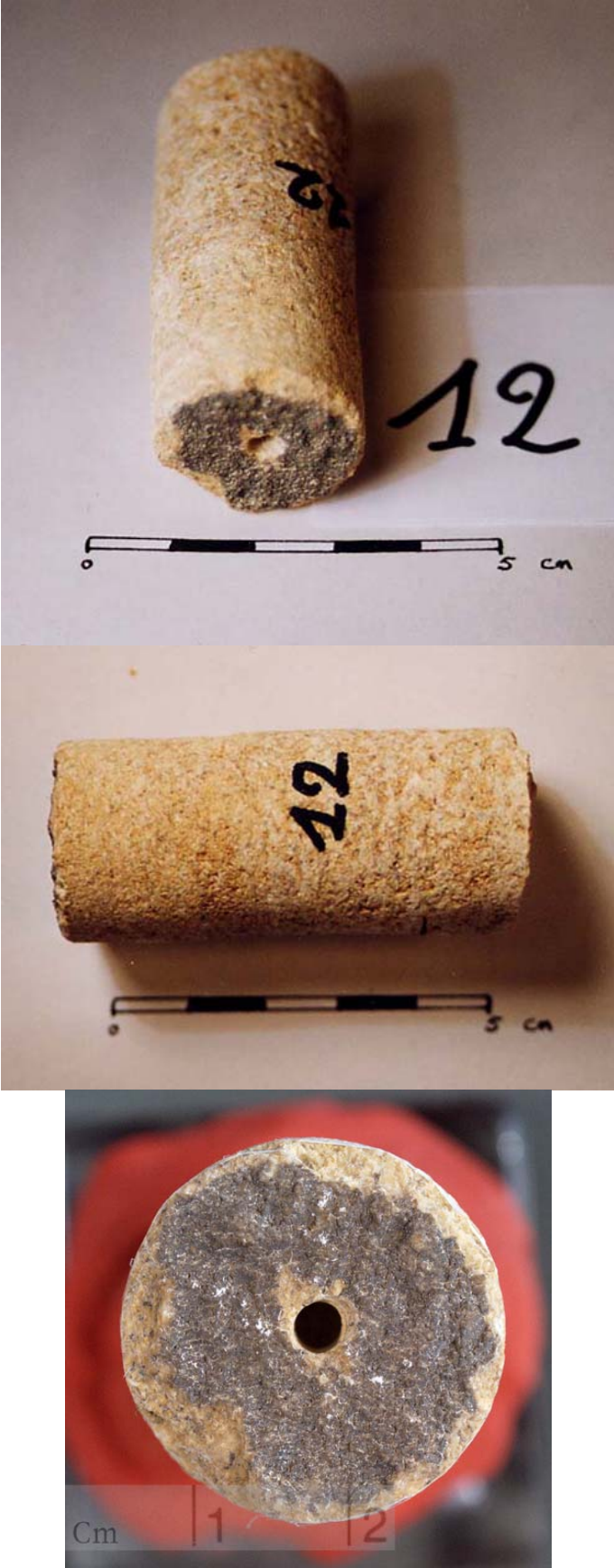


ECHANTILLON NE-12 Rue de la collégiale, 5 – porche de la collégiale

Désordres : patine / Litage // à la surface

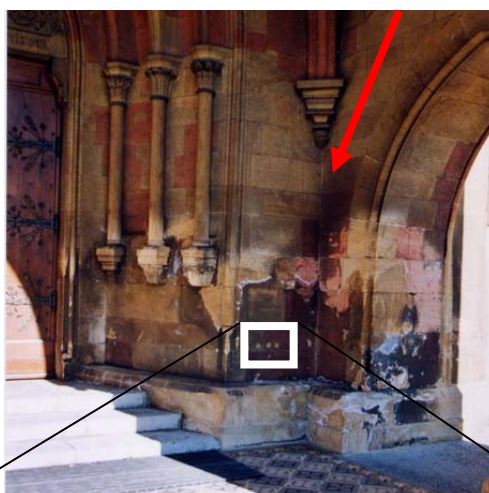


ECHANTILLON NE-12
Rue de la collégiale, 5 – porche de la collégiale



ECHANTILLON NE-13 Rue de la collégiale, 5 – porche de la collégiale

Désordres : patine – rubéfaction / Litage \perp à la surface

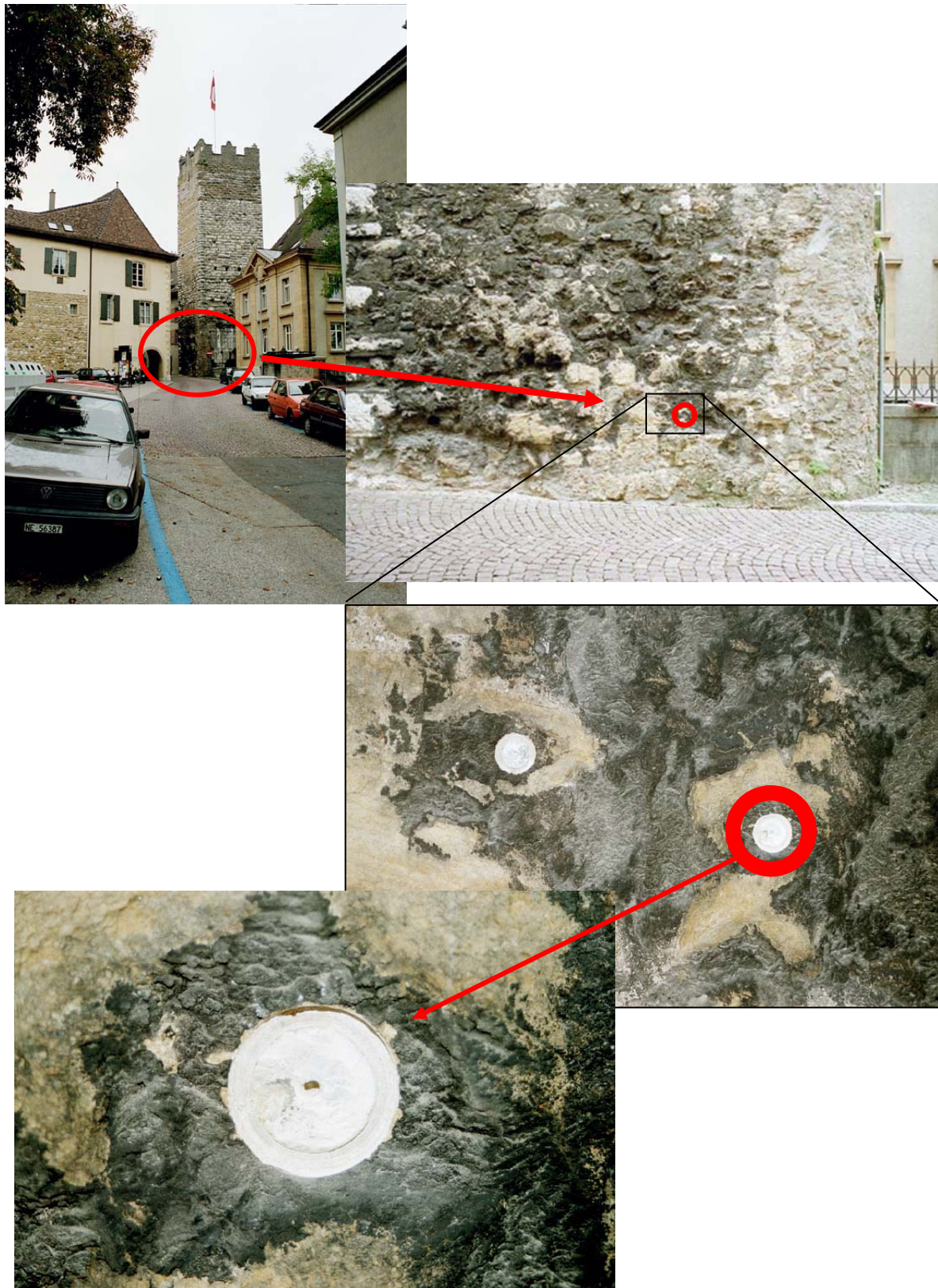


ECHANTILLON NE-13
Rue de la collégiale, 5 – porche de la collégiale



ECHANTILLON NE-14 Rue Jeanne de Hochberg, 3 – Tour des prisons

Désordres : encroûtement / Litage non observé

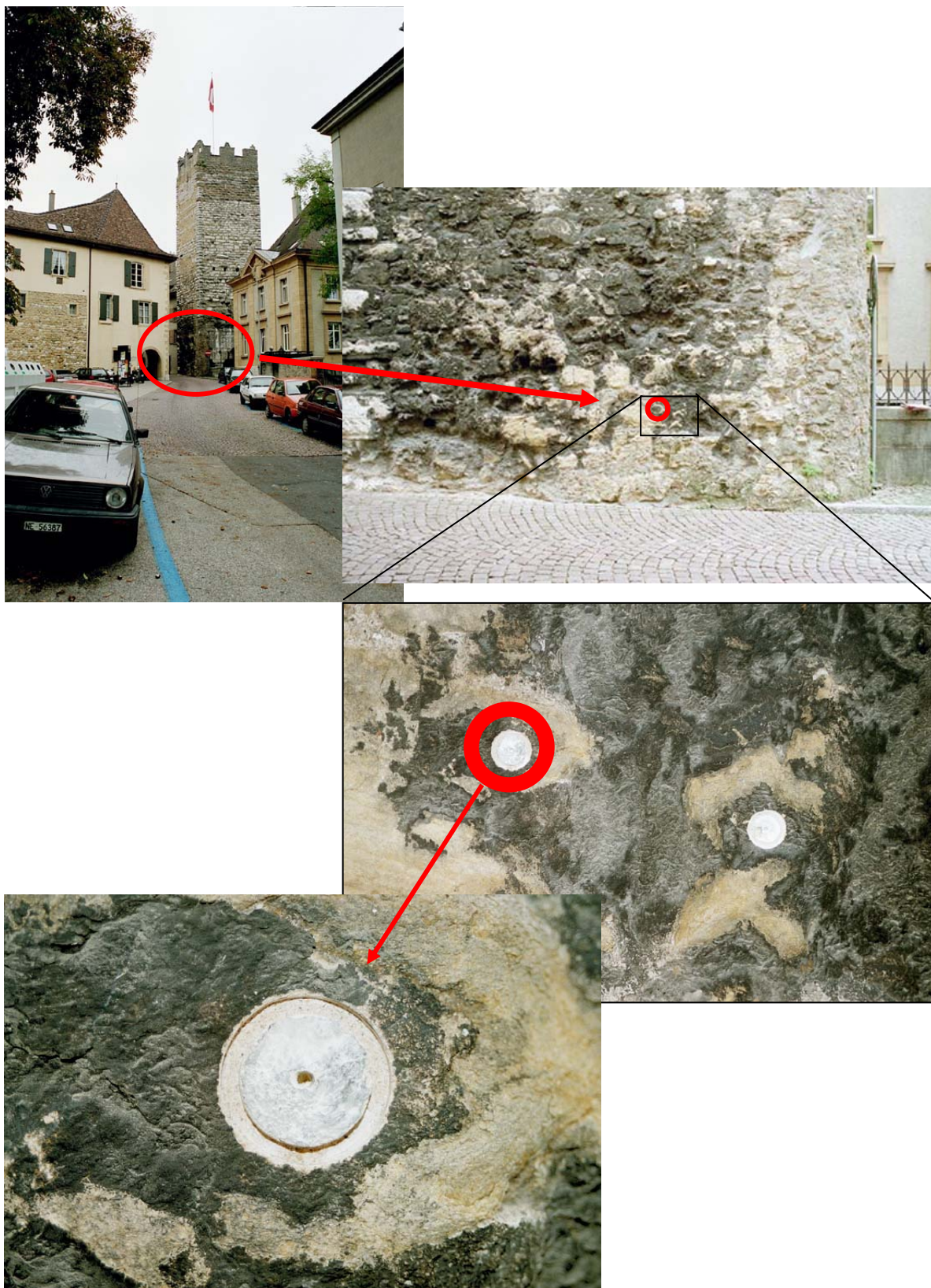


ECHANTILLON NE-14
Rue Jeanne de Hochberg, 3 – Tour des prisons



ECHANTILLON NE-15 Rue Jeanne de Hochberg, 3 – Tour des prisons

Désordres : encroûtement / Litage non net

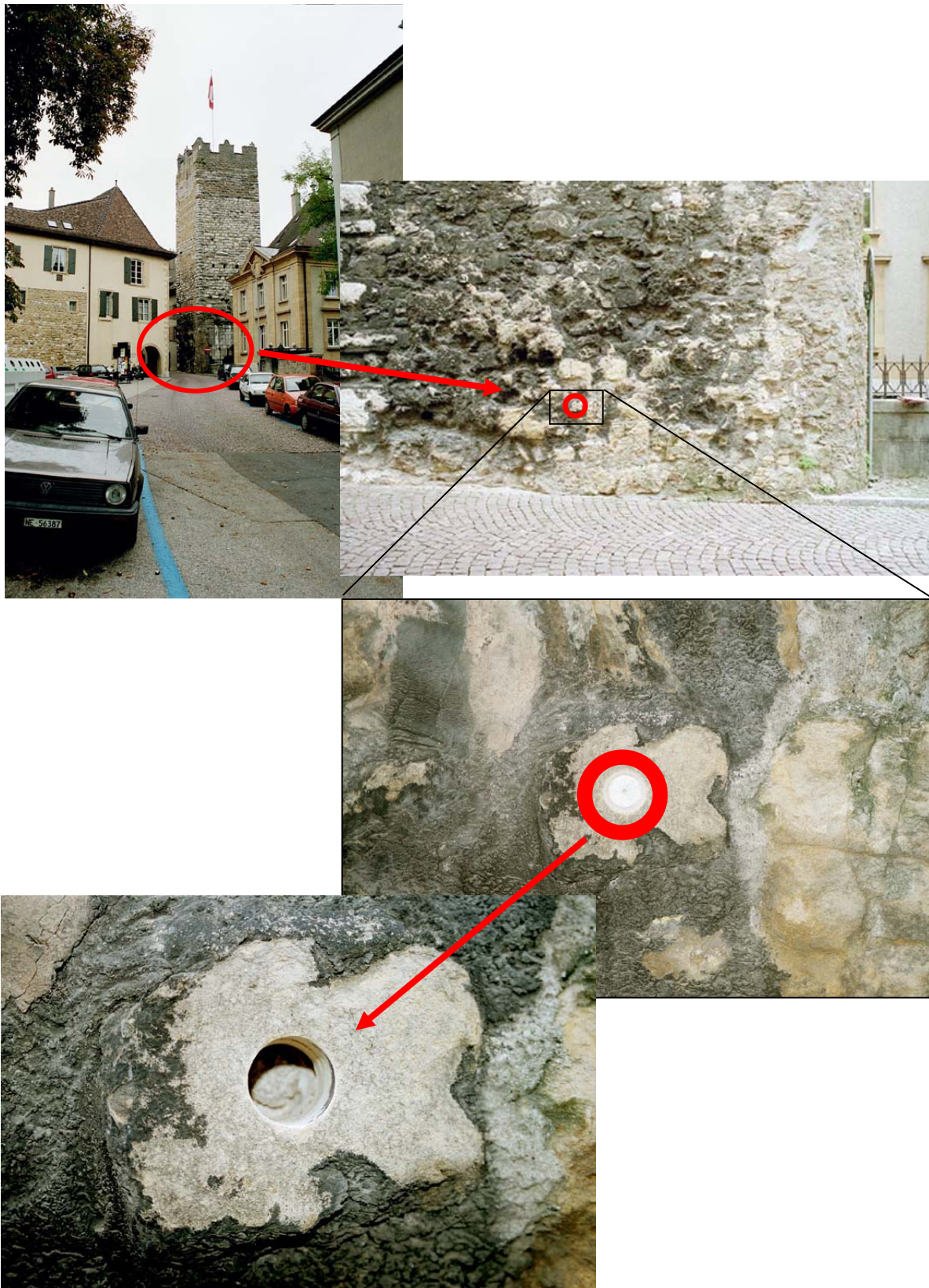


ECHANTILLON NE-15
Rue Jeanne de Hochberg, 3 – Tour des prisons



ECHANTILLON NE-16 Rue Jeanne de Hochberg, 3 – Tour des prisons

Désordres : patine ? encroûtement ? / **Litage** non observé



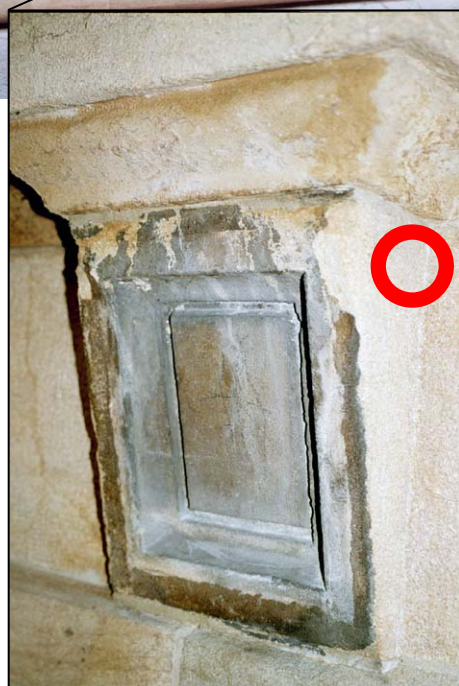
ECHANTILLON NE-16
Rue Jeanne de Hochberg, 3 – Tour des prisons



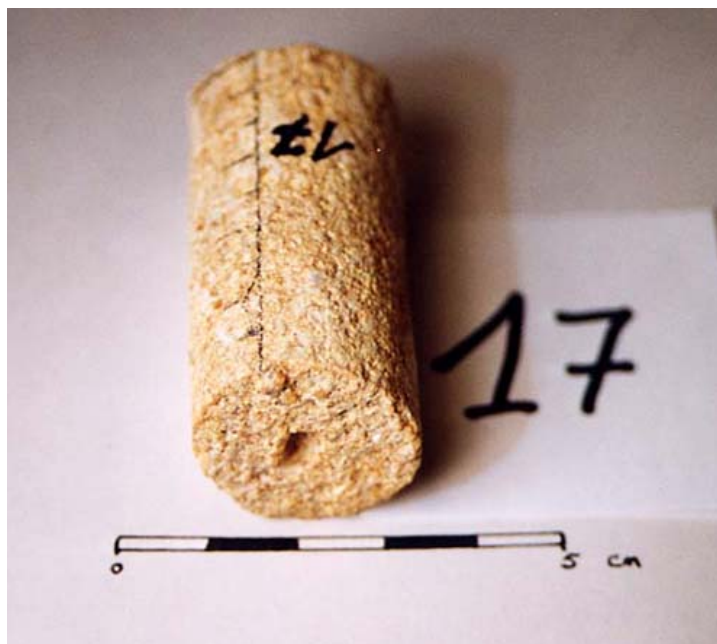
ECHANTILLON NE-17

Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade NO

Désordres : érosion / hydrogommage / **Litage** oblique par rapport à la surface

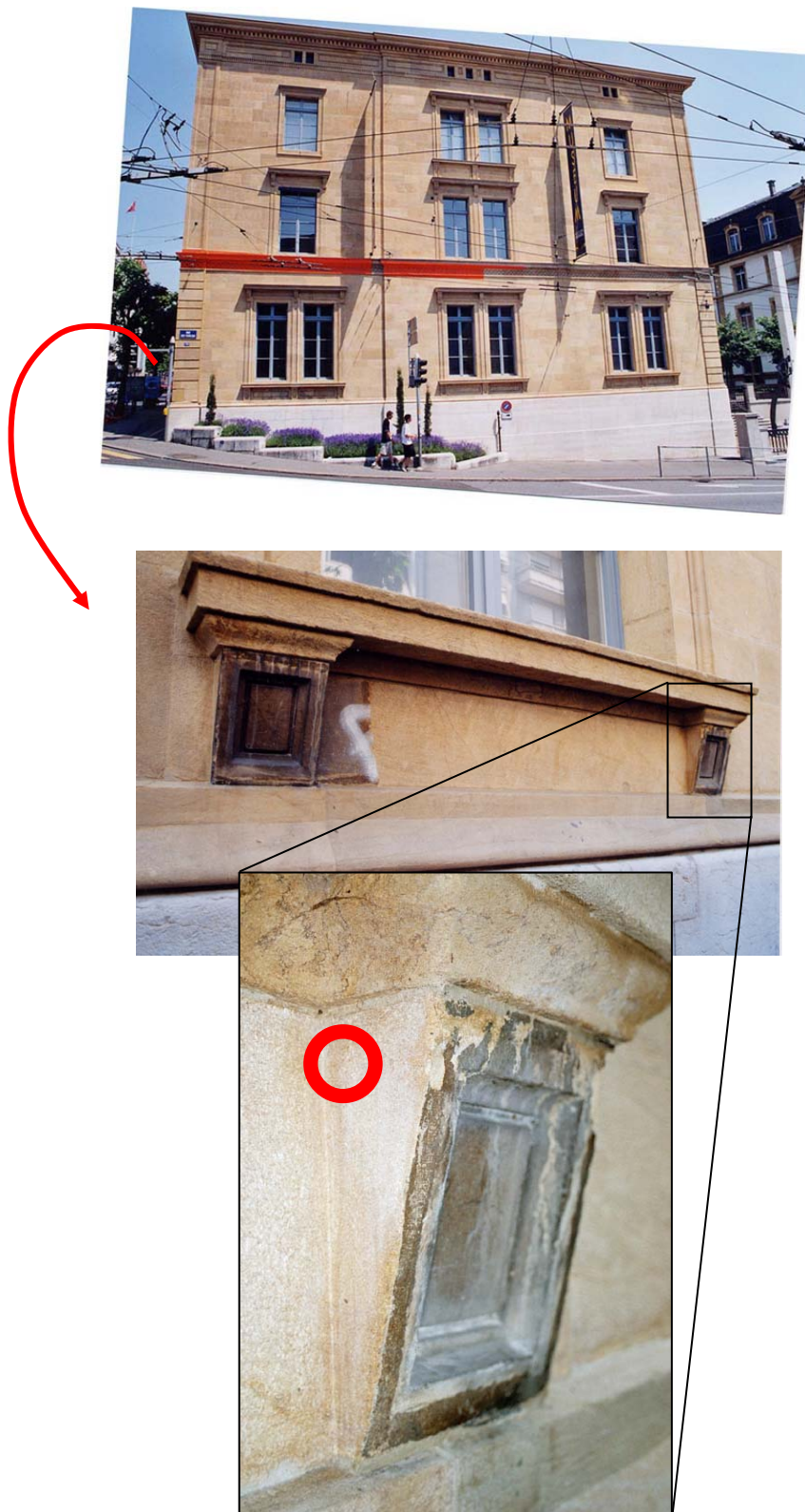


ECHANTILLON NE-17
Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade NO



ECHANTILLON NE-18 Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade NO

Désordres : érosion / hydrogommage / **Litage** ⊥ à la surface



ECHANTILLON NE-18
Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade NO

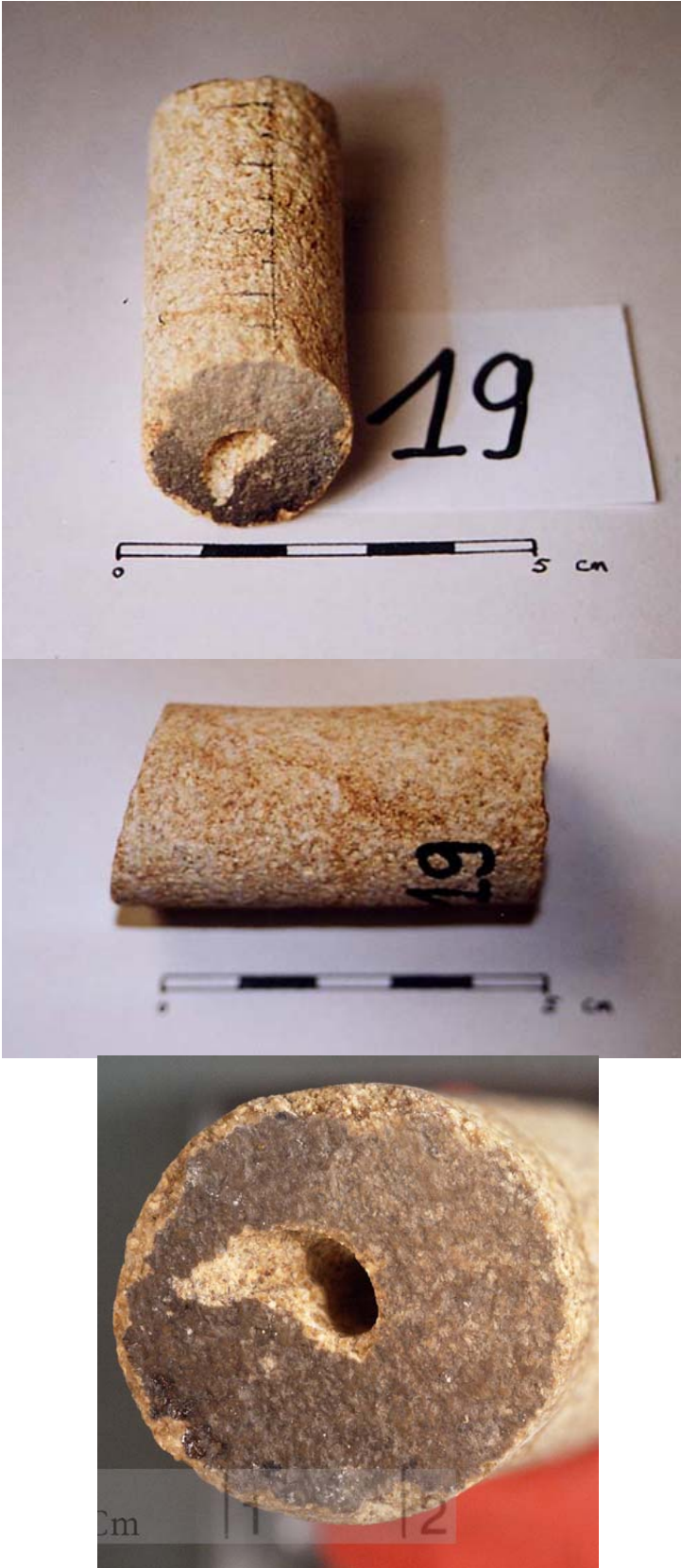


ECHANTILLON NE-19 Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade NO

Désordres : érosion / hydrogommage / Litage non net

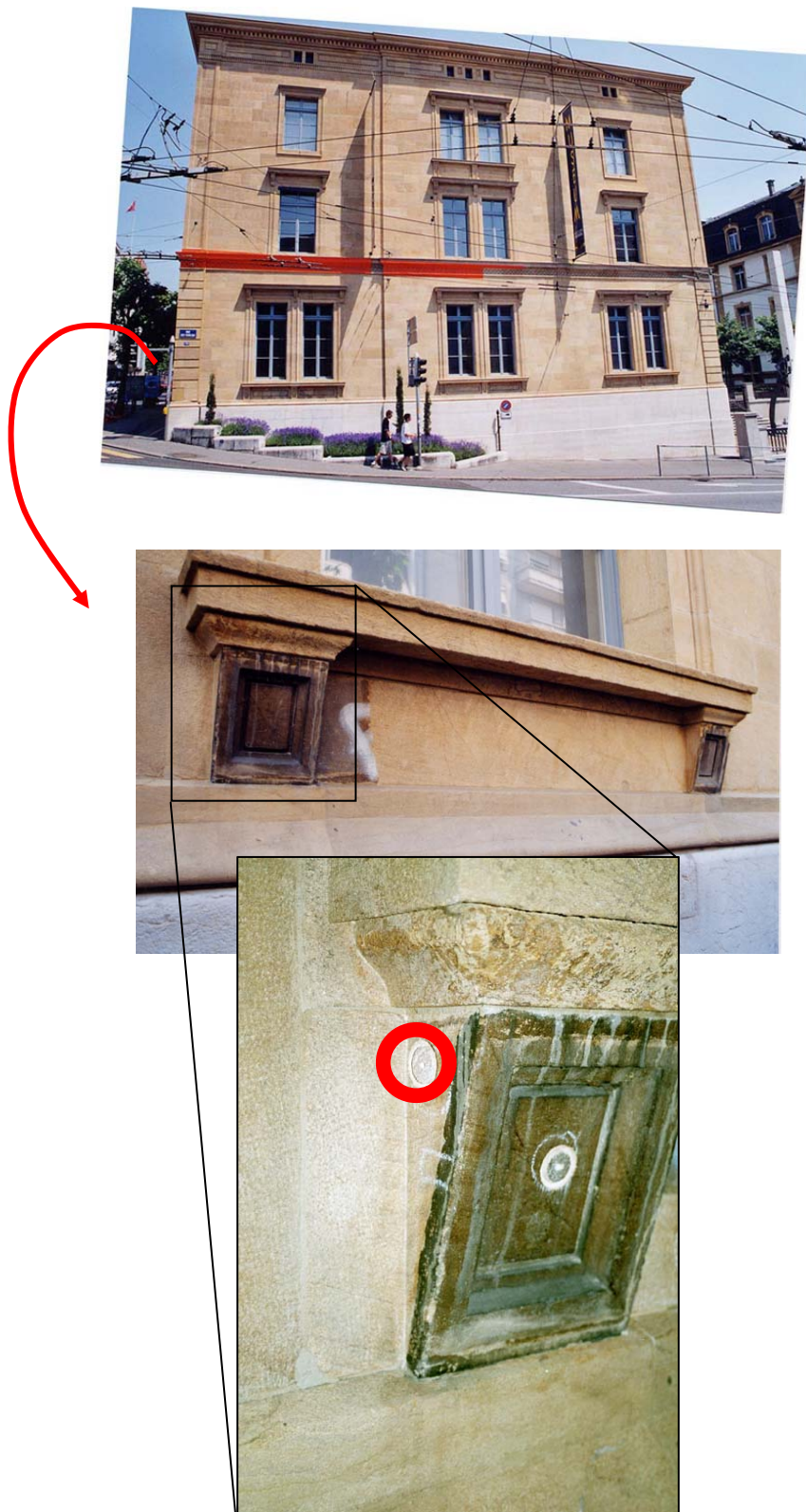


ECHANTILLON NE-19
Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade NO

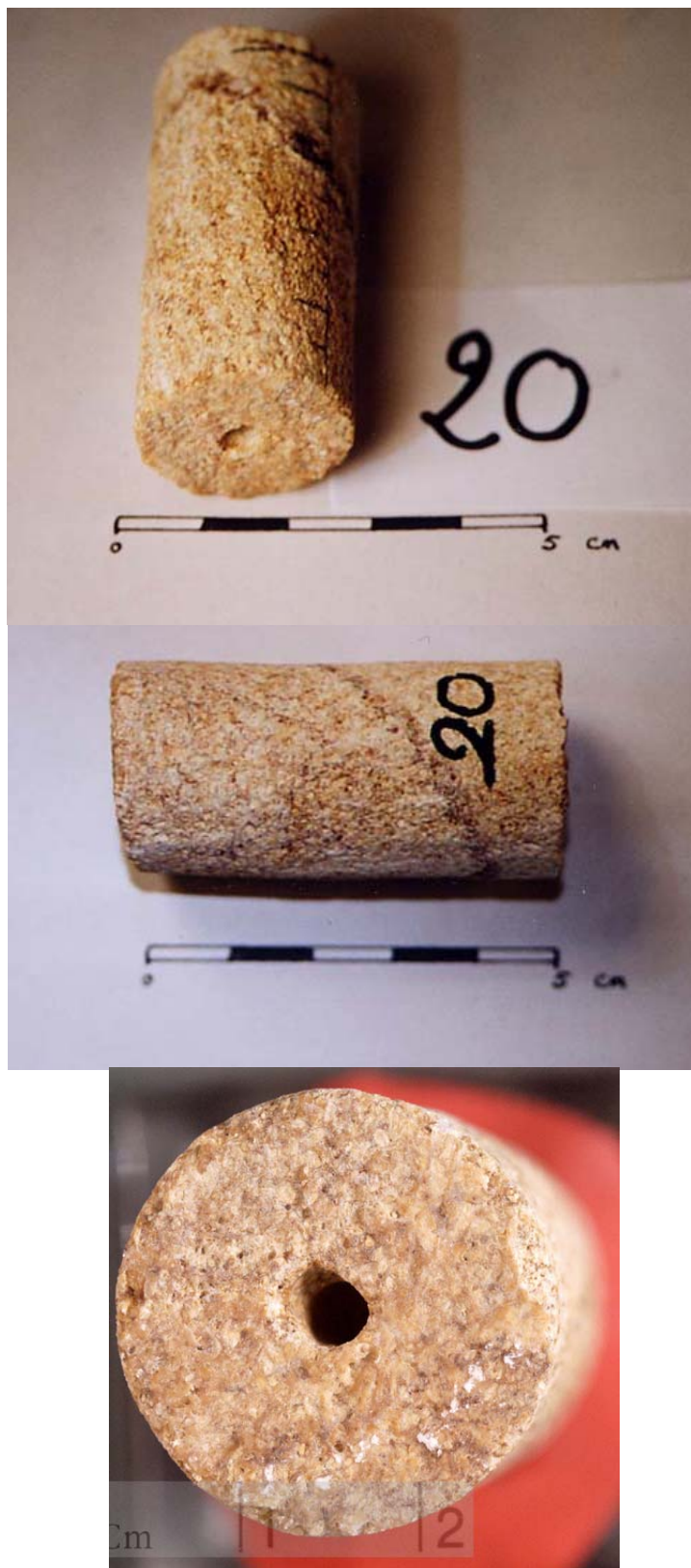


ECHANTILLON NE-20 Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade NO

Désordres : érosion / hydrogommage / **Litage** ⊥ à la surface



ECHANTILLON NE-20
Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade NO

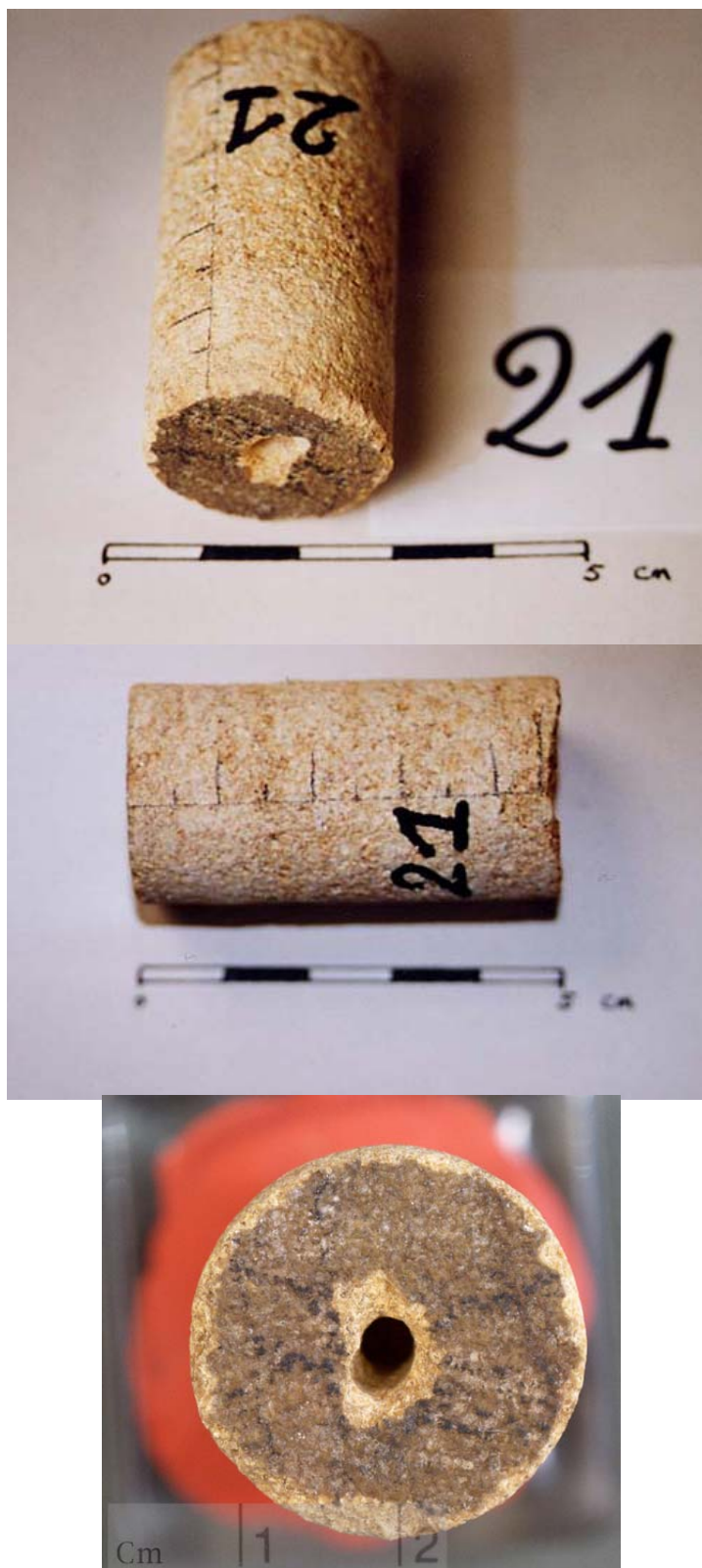


ECHANTILLON NE-21 Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade NO

Désordres : patine / Litage // à la surface



ECHANTILLON NE-21
Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade NO

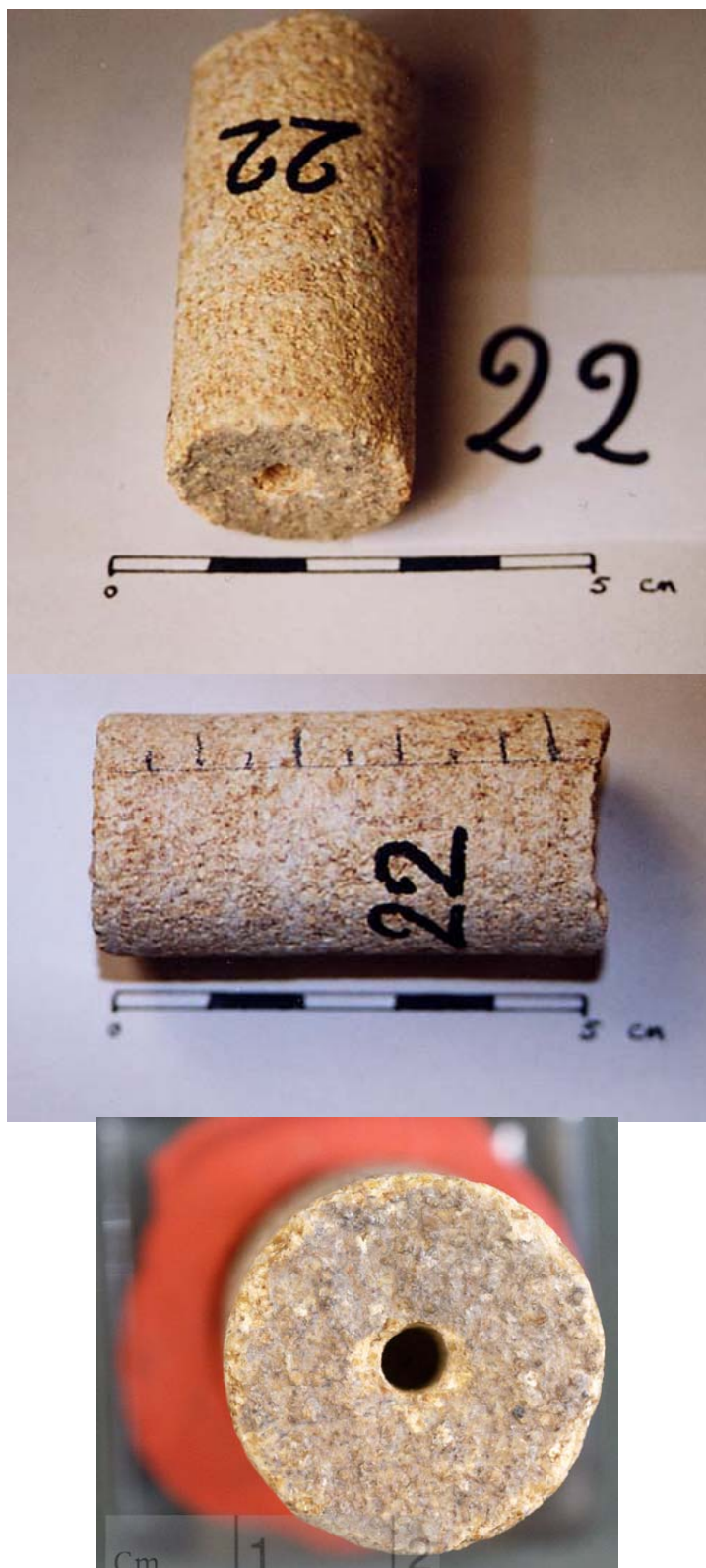


ECHANTILLON NE-22 Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade NO

Désordres : patine / Litage // à la surface



ECHANTILLON NE-22
Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade NO

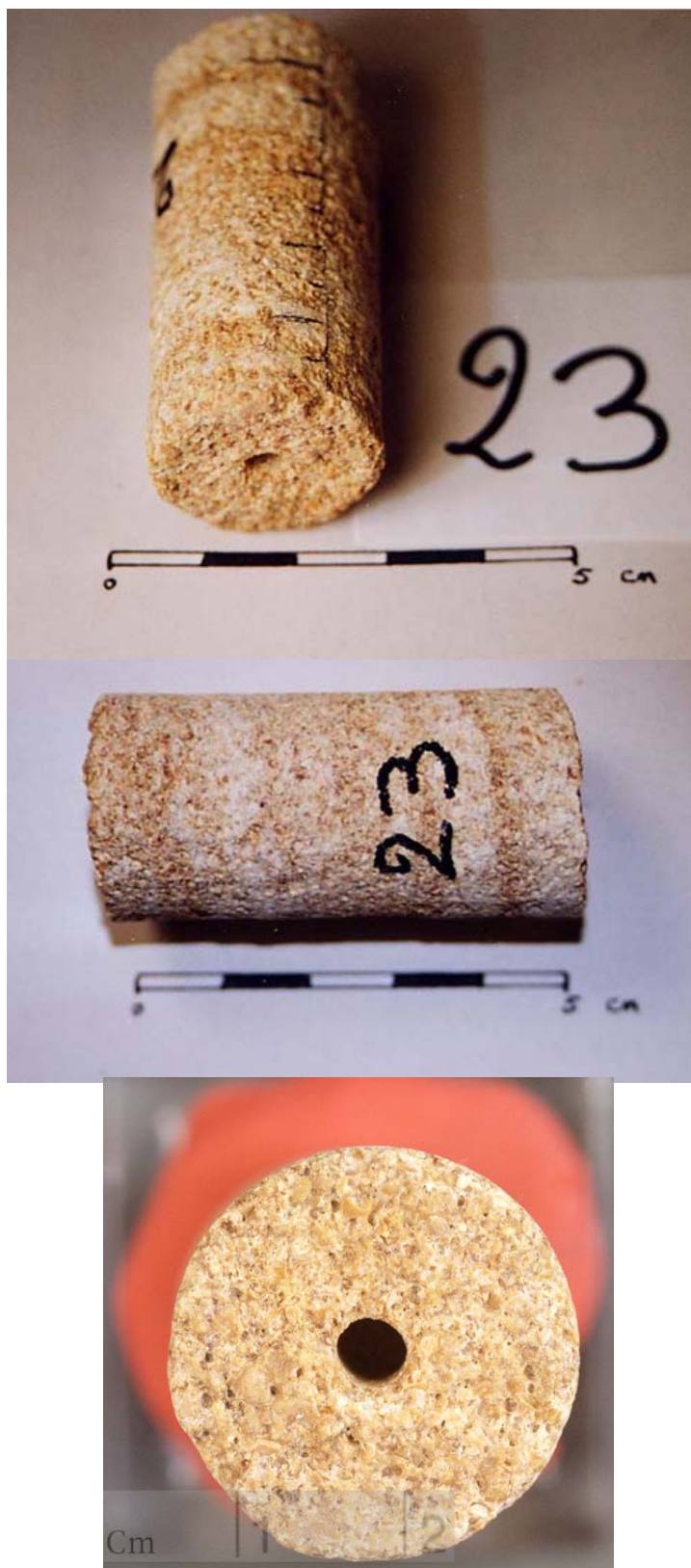


ECHANTILLON NE-23 Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade NO

Désordres : érosion / hydrogommage / Litage // à la surface



ECHANTILLON NE-23
Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade NO

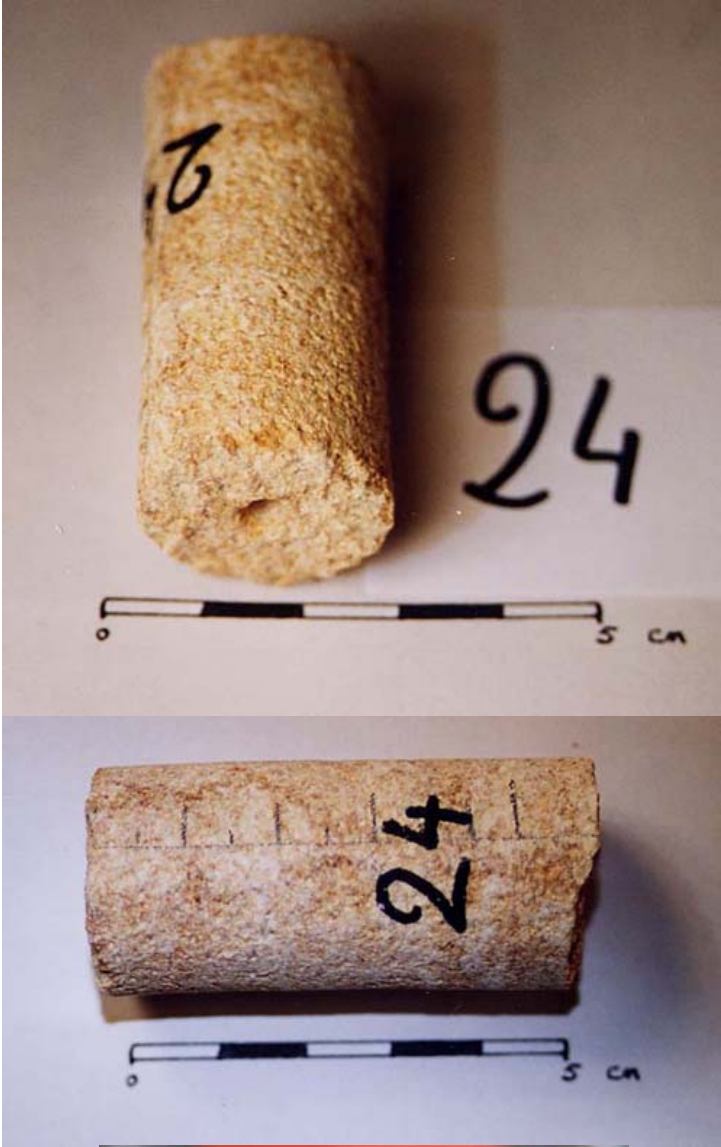


ECHANTILLON NE-24 Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade NO

Désordres : décoloration / nettoyage par compresse / Litage oblique



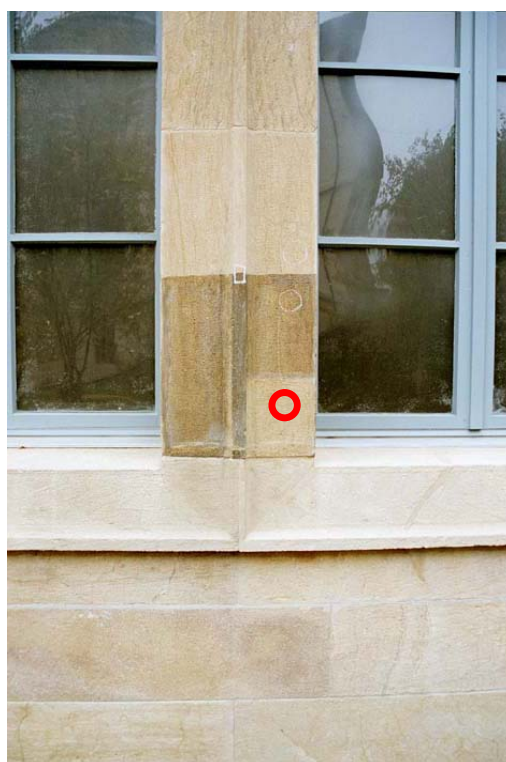
ECHANTILLON NE-24
Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade NO



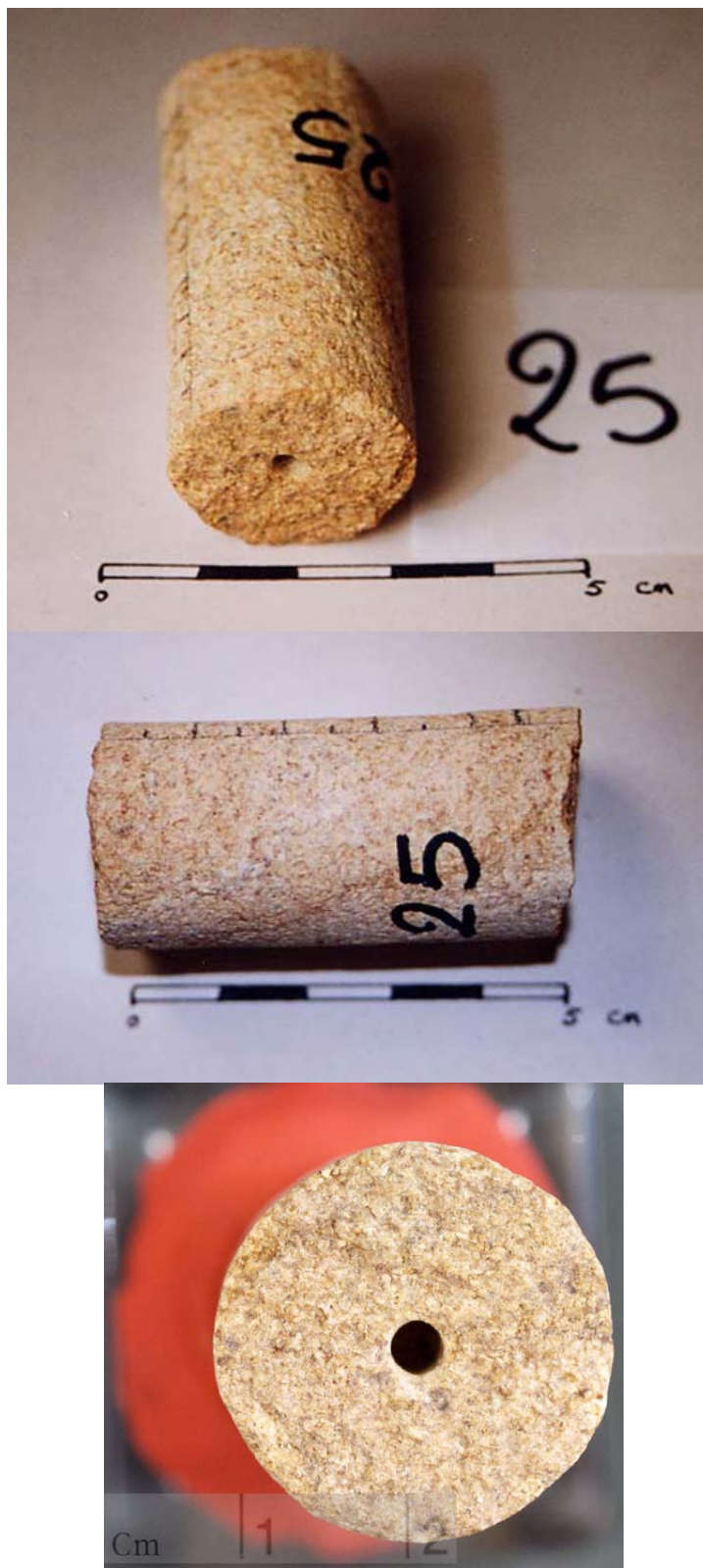
ECHANTILLON NE-25

Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade NE

Désordres : décoloration / nettoyage par compresse / **Litage** ⊥ à la surface

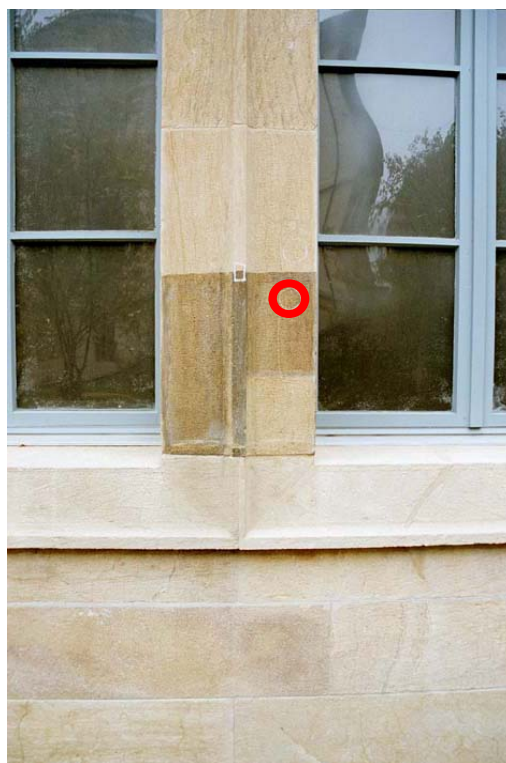


ECHANTILLON NE-25
Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade NE

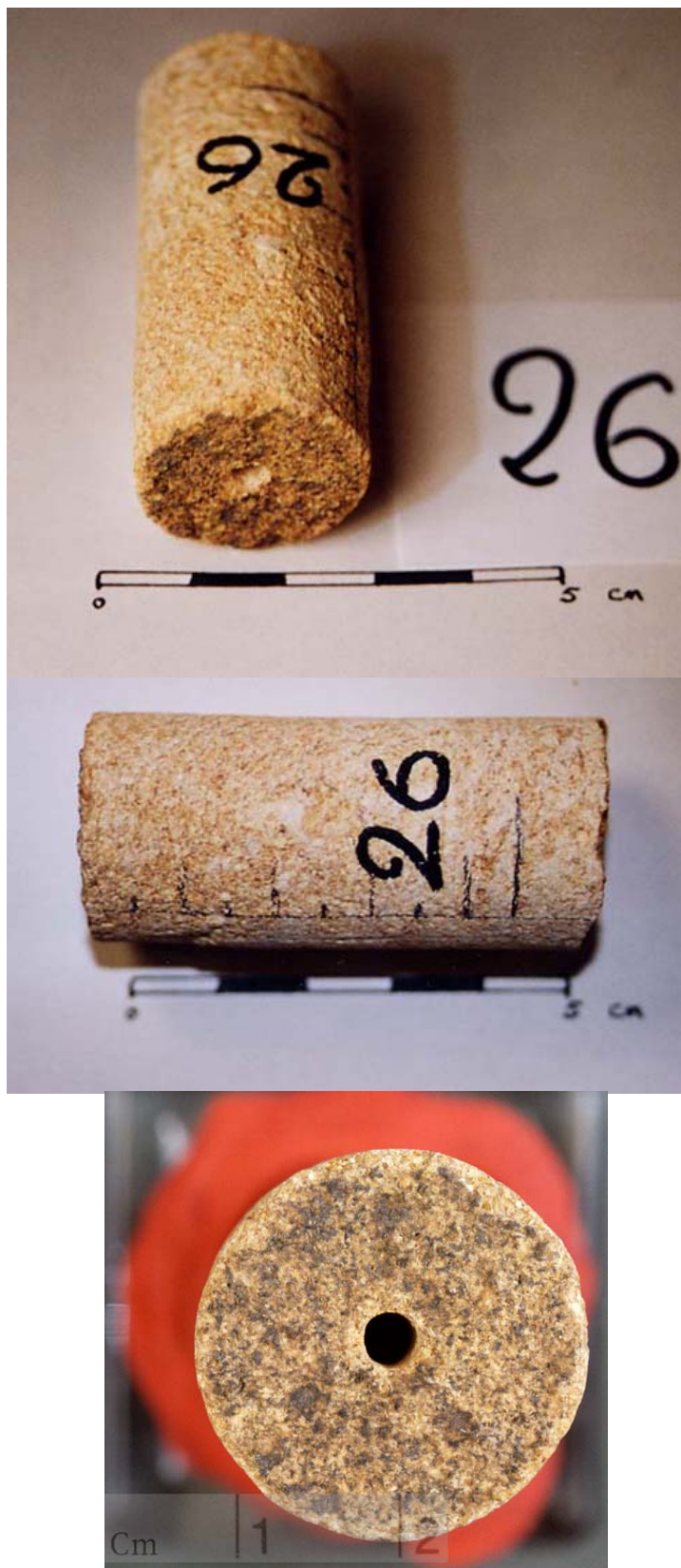


ECHANTILLON NE-26
Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade NE

Désordres : patine / Litage \perp à la surface

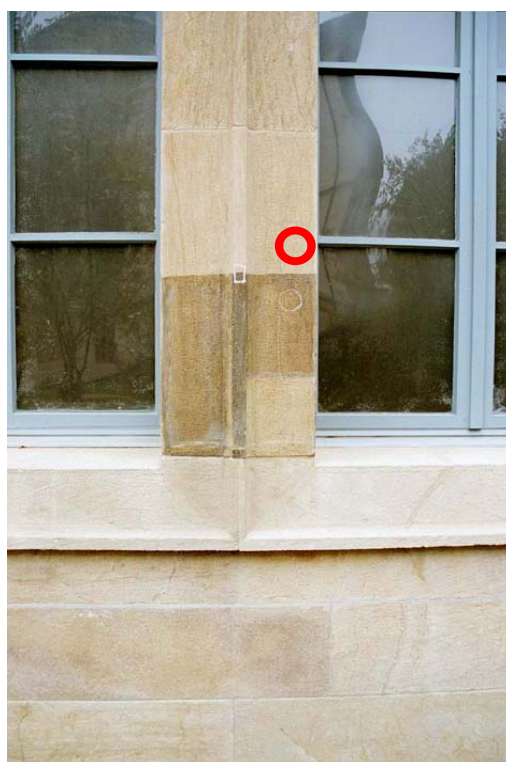


ECHANTILLON NE-26
Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade NE

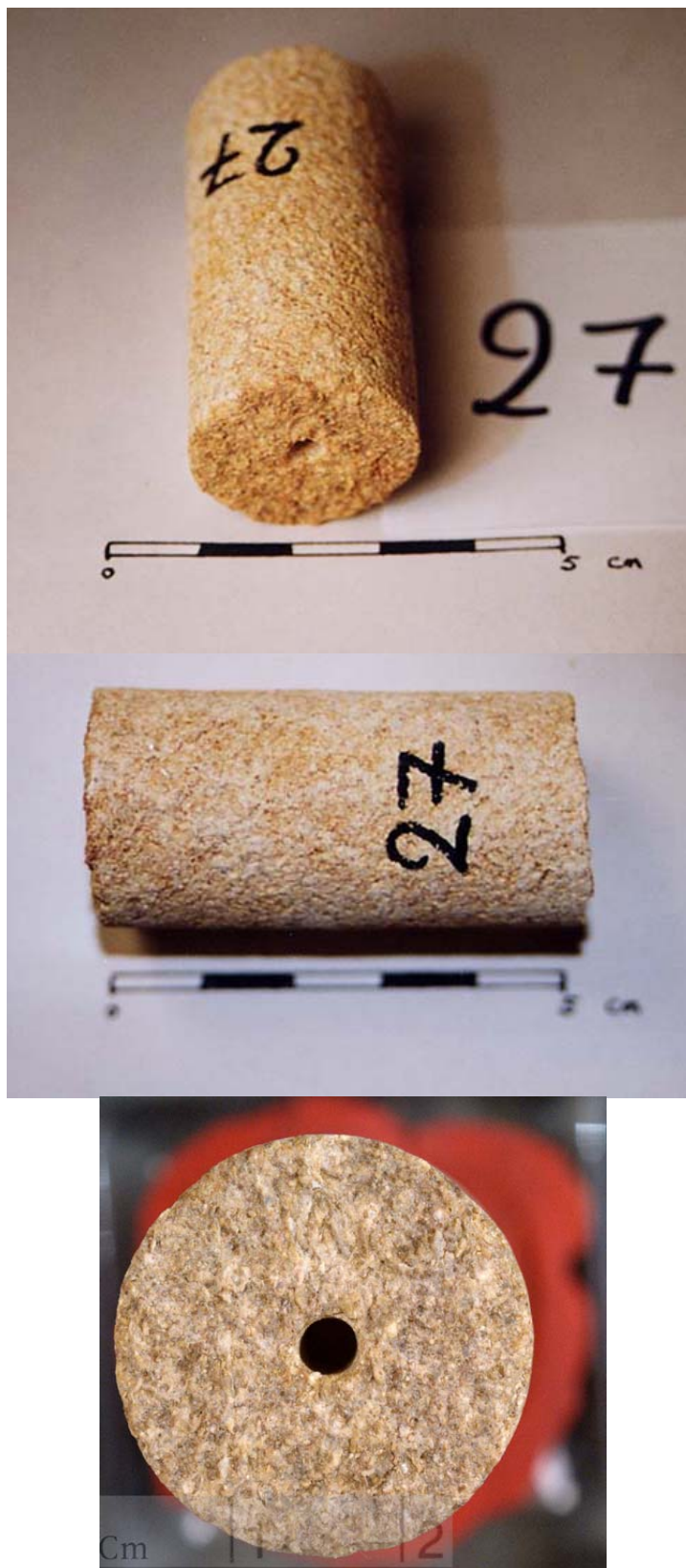


ECHANTILLON NE-27
Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade NE

Désordres : érosion / hydrogommage / **Litage** oblique par rapport à la surface



ECHANTILLON NE-27
Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade NE



ECHANTILLON NE-28 Rue Jeanne de Hochberg, face n°11 – Portail

Désordres : subflorescences – délitage / **Litage** // à la surface



ECHANTILLON NE-28
Rue Jeanne de Hochberg, face n°11 – Portail



ECHANTILLON NE-29 Rue Jeanne de Hochberg, face n°11 – Portail

Désordres : encroûtement – délitage / Litage // à la surface

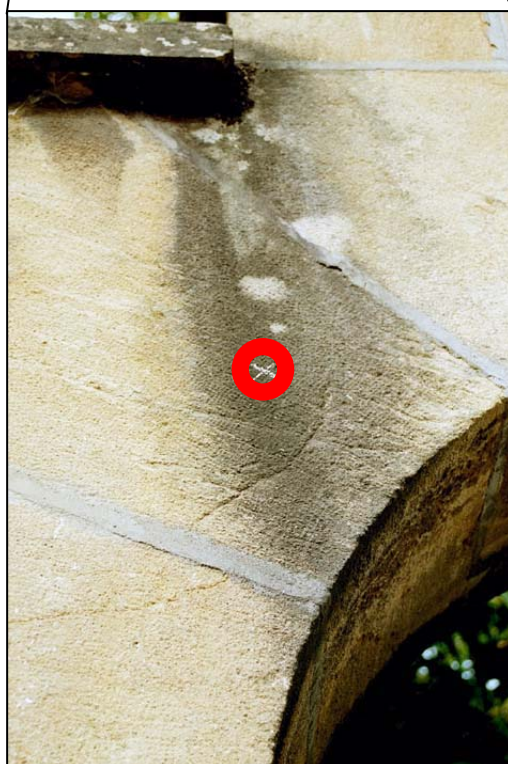


ECHANTILLON NE-29
Rue Jeanne de Hochberg, face n°11 – Portail

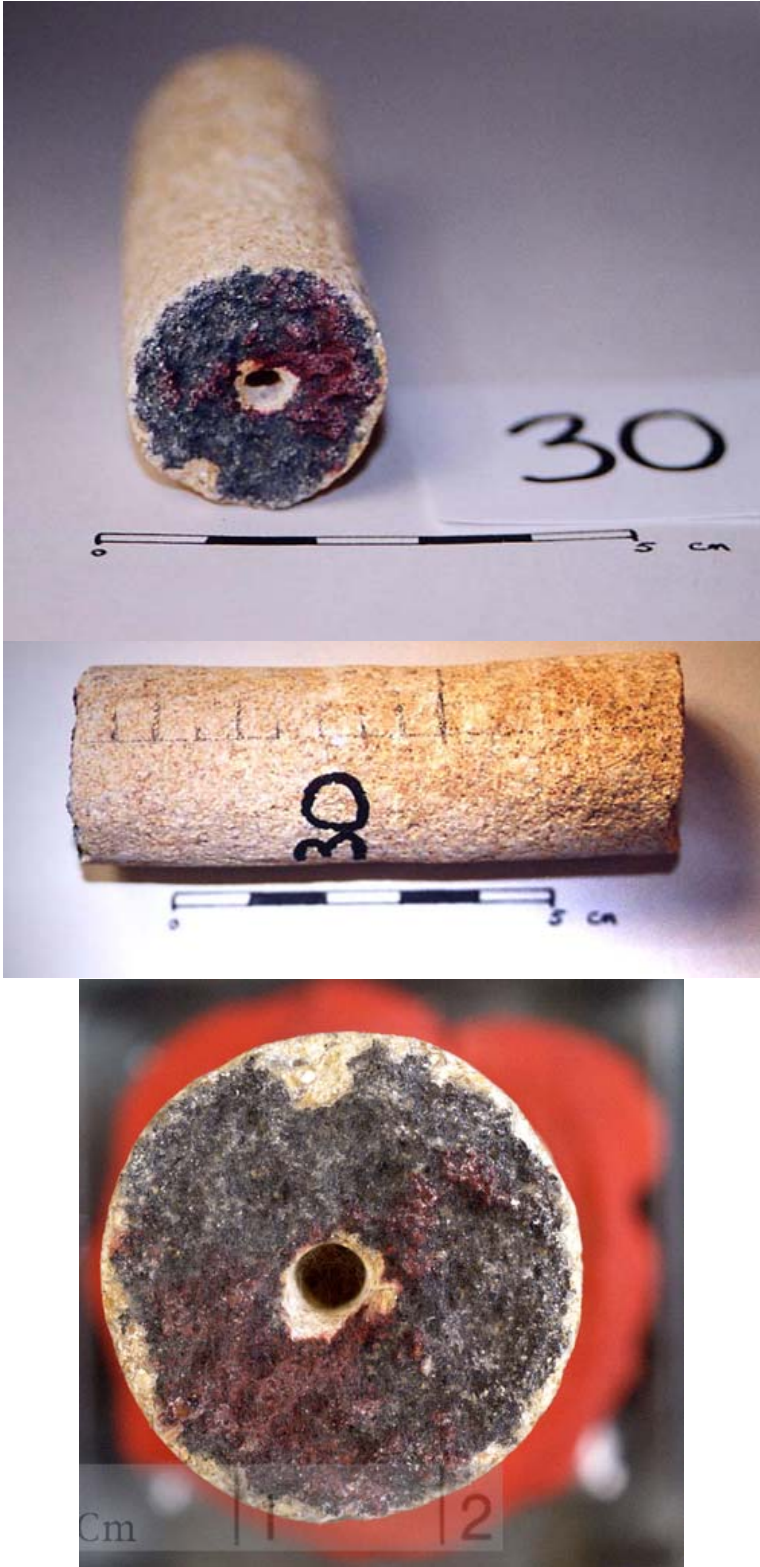


ECHANTILLON NE-30 Rue Jeanne de Hochberg, face n°11 – Portail

Désordres : algues / Litage \perp à la surface

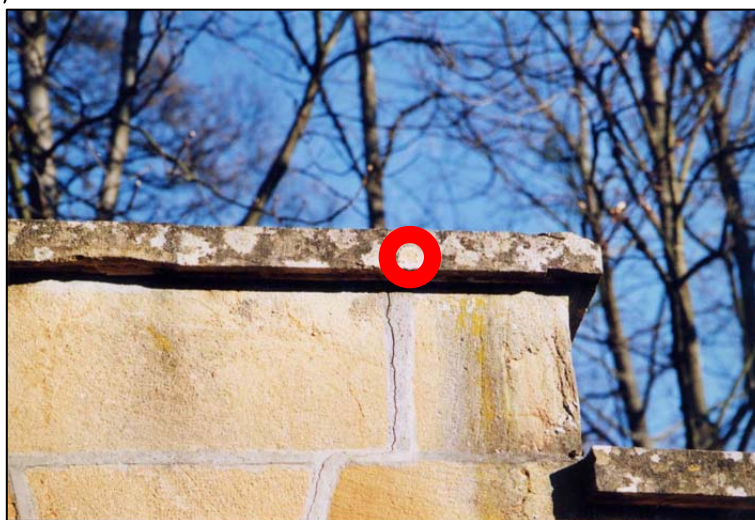


ECHANTILLON NE-30
Rue Jeanne de Hochberg, face n°11 – Portail

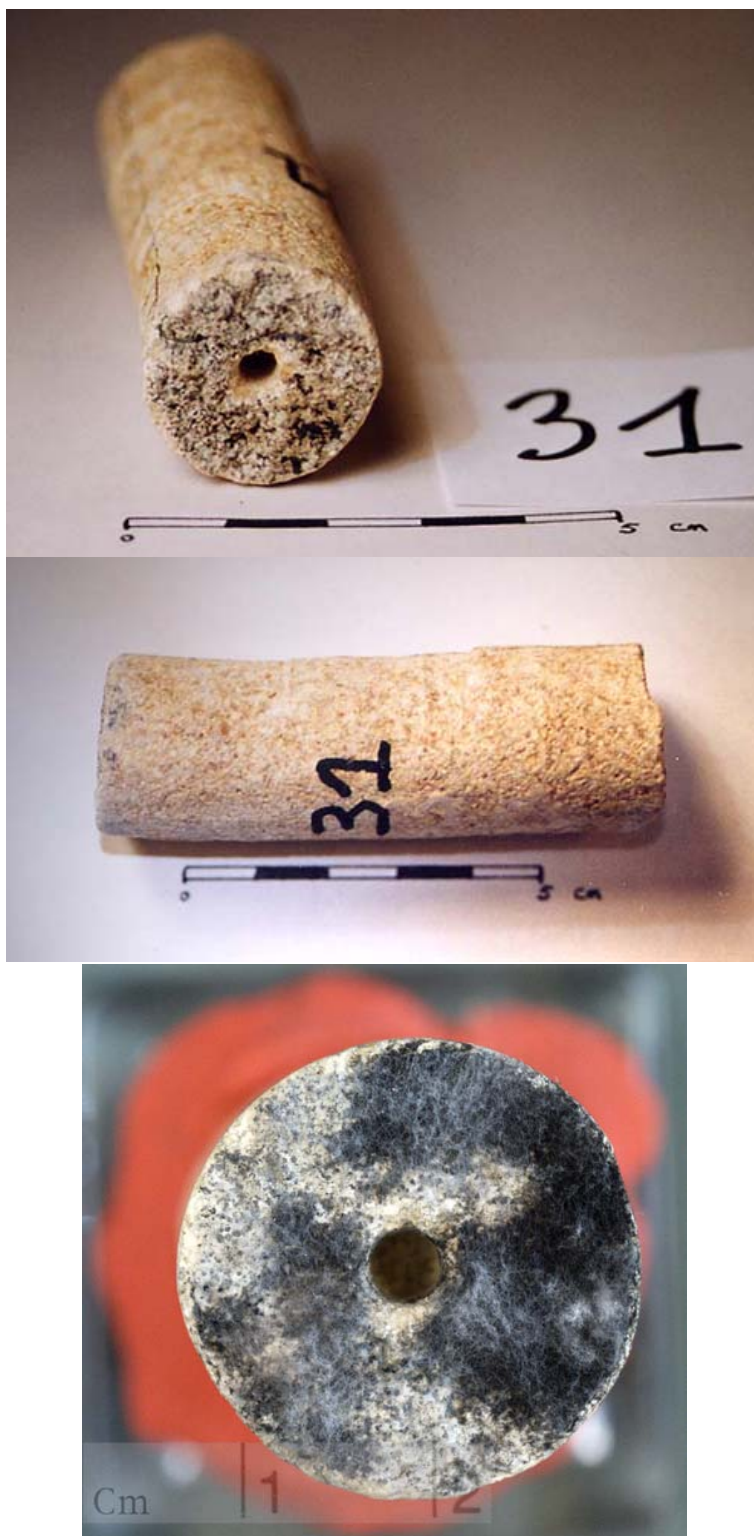


ECHANTILLON NE-31 Rue Jeanne de Hochberg, face n°11 – Portail

Désordres : lichen / Litage non net



ECHANTILLON NE-31
Rue Jeanne de Hochberg, face n°11 – Portail

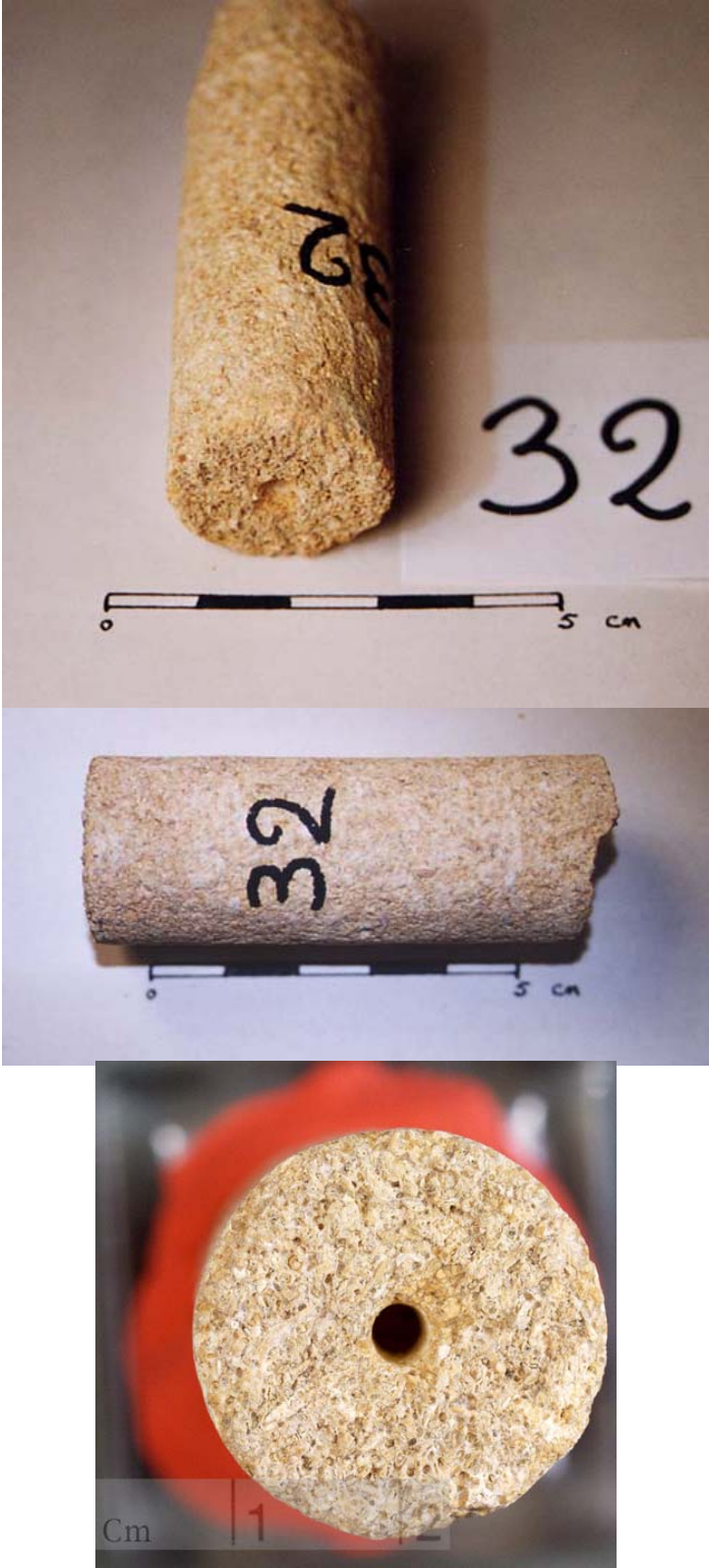


ECHANTILLON NE-32 Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade SO

Désordres : érosion / hydrogommage / **Litage** non net



ECHANTILLON NE-32
Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade SO



ECHANTILLON NE-33 Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade SO

Désordres : érosion / patine / **Litage** non net



ECHANTILLON NE-33
Rue des Terreaux, 14 – Musée d'histoire naturelle, façade SO



ANNEXE 2

PRELEVEMENTS SUR LES ANCIENS FRONTS DE TAILLE DE HAUTERIVE (NE)

Prélèvements Hauterive (à proximité du centre sportif)

Vues générales de l'affleurement en bord de route :



Vues générales de l'affleurement dans le parking :



Vues générales des affleurements autour du terrain de sport :





Prélèvement H1 :

Echantillon prélevé près du vestiaire du terrain de sport, derrière la petite cabane en bois.

Faciès fin, coquiller, dense argileux et glauconieux.



Prélèvement H2 :

Echantillon prélevé près du terrain de sport, à gauche du vestiaire.

Banc immédiatement supérieur à H1

Faciès plus grossier et plus glauconieux que H1, dense, surtout coquiller



Prélèvement H3 :



Echantillon prélevé derrière le filet tendu sur l'affleurement situé derrière le terrain de sport.

Faciès fin, très dense.



Prélèvement H4 :

Echantillon prélevé derrière le terrain de sport vers le coin gauche de la balustrade.

Faciès grossier, dense, coquiller.



Prélèvement H5 :

Echantillon prélevé à gauche du terrain de sport, derrière les gravats, à droite.

Faciès coquiller aussi grossier que H4, mais plus oolitique. Poreux, peu glauconieux

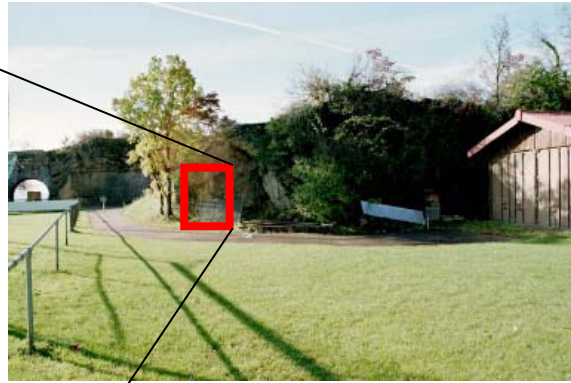
**Prélèvement H6 :**

Echantillon prélevé à gauche du terrain de sport, derrière les gravats, à gauche.

Faciès oolitique présentant une anomalie de porosité : oolites dissoutes.



Prélèvement H7 :



Echantillon prélevé à gauche du terrain de sport, sur l'affleurement en bordure du chemin, entre le parking et la remise.

Faciès coquiller très grossier à lamines entrecroisées. Dense, légèrement glauconieux.

Prélèvement H8 :

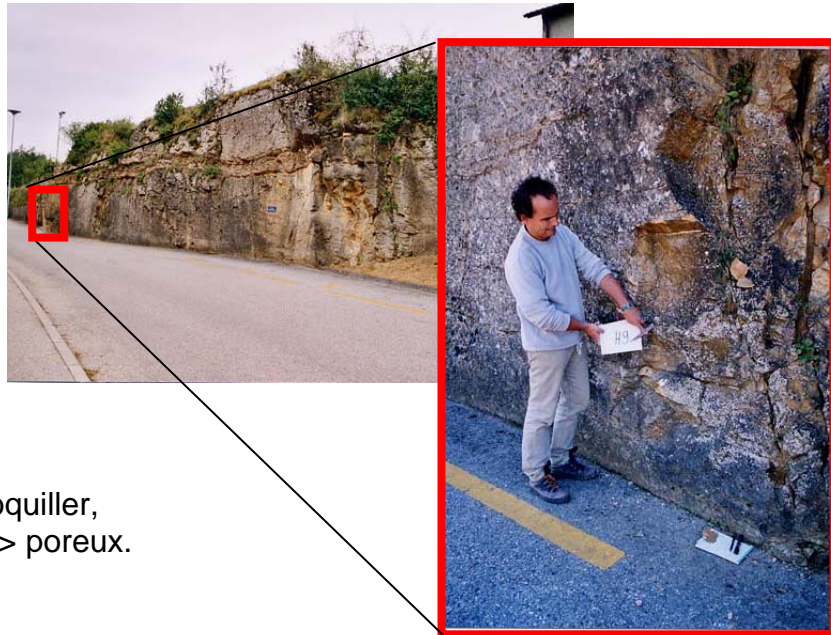
Echantillon prélevé sur le parking.

Faciès très dense, plutôt blanc. Éléments figurés nombreux mais non identifiables à l'œil nu.



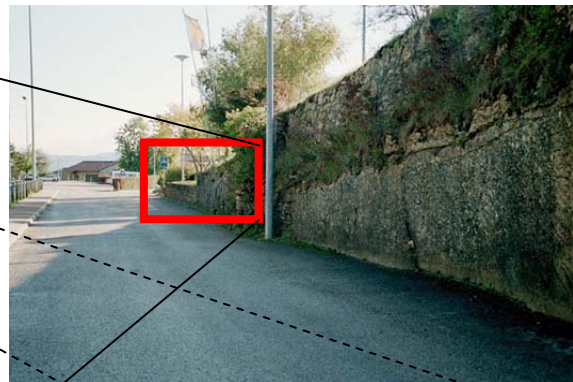
Prélèvement H9 :

Echantillon prélevé en bordure de route, à droite du passage "souterrain" donnant accès au terrain de foot.



Faciès fin oolitique et coquiller, mauvaise cimentation => poreux. Banc massif inférieur.

Prélèvement H10 :



Echantillon prélevé en bordure de route, à gauche du passage "souterrain".

Il semble que ce soit le même faciès oolitique poreux (oolites partiellement dissoutes), fin et glauconieux.

banc que H9,



Prélèvement H11 :

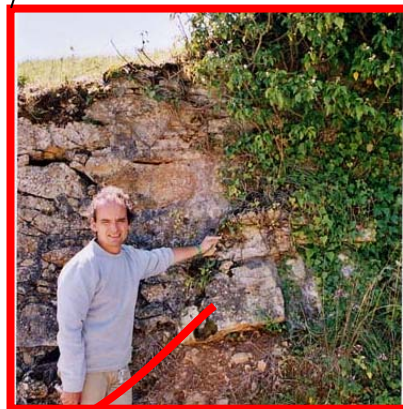
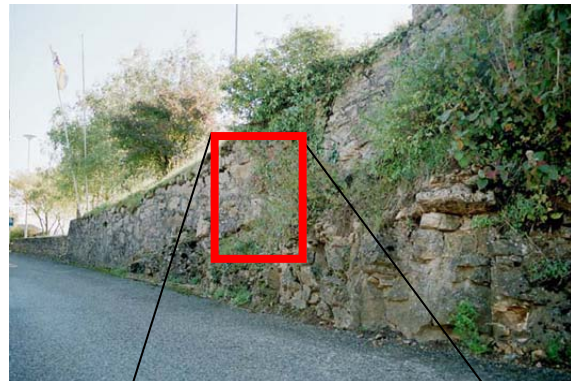
Echantillon prélevé en bordure de route, à gauche de H10

Il s'agit du banc intermédiaire entre les deux bancs massifs, faciès au dessus de H9-H10. C'est un faciès fin, hétérogène, très argileux. Par place sont visibles des fortes concentrations d'argiles.

**Prélèvement H12 :**

Echantillon prélevé en bordure de route, à gauche de H11

Faciès très similaire à H11, même niveau intermédiaire entre deux bancs massifs.



ANNEXE 3

DESORDRES AFFECTANT LA PIERRE JAUNE DE NEUCHATEL

Dans cette annexe sont énumérés les plus importants désordres observés sur la pierre jaune de Neuchâtel. Les définitions correspondent aux propositions récentes du groupe ICOMOS (Vergès-Belmin, 2004).

Le critère de classification employé est l'origine des désordres. Il est rare qu'une seule cause soit à l'origine d'un désordre. C'est pourquoi la même définition peut se retrouver dans plusieurs sous-chapitres. De plus, bien souvent une forme d'altération découle de l'évolution d'une première forme, et entre ces deux extrêmes existent toute une série d'altérations différentes. Il est donc difficile de donner une définition parfaitement cloisonnée pour chaque désordre observé.

Afin de relativiser la gravité des divers désordres qui seront énoncés ci-après, il est bon de reprendre les remarques faites par Félix (1995) dans son rapport 22/95/LCP :

1. Toute pierre exposée aux intempéries subit des altérations et des dégradations plus ou moins profondes, toujours **irréversibles**, résultats de processus physico-chimiques et biologiques. Ces processus complexes font partie de l'**évolution normale** de la matière minérale.

2. Les textes les plus anciens (dont la Bible) font état de la dégradation des pierres de construction. Ils montrent aussi que l'urbanisation et ses **nuisances** (pollutions de toutes sortes) étaient déjà le lot des civilisations les plus anciennes connues. La pollution atmosphérique (et les autres nuisances environnementales modernes) n'est donc qu'un facteur d'altération parmi de nombreux autres. Mais elle est capable de ce fait - et comme tout autre facteur d'altération - de provoquer localement des **accélération**s de certains processus d'altération.

3. On considère souvent la pierre en voie d'altération ou de dégradation comme "**malade**" (on parle en effet couramment des "maladies de la pierre", "de la lèpre ou du cancer des cathédrales",...) ; dans cette vision ou interprétation anthropomorphiste de l'altération, il faut alors traiter la pierre avec toutes les précautions d'un malade qui ne guérira jamais.

Enfin, avant d'énumérer les divers désordres rencontrés, il est important de rappeler deux définitions générales afin de bien comprendre le vocabulaire employé dans le rapport :

Définitions importantes :

Désordre ou altération : toute modification du matériel n'impliquant pas nécessairement une détérioration de ses caractéristiques du point de vue de la conservation.

Dégradation : toute modification avec incidence nuisible, du point de vue de la conservation, sur le comportement des matériaux.

Pour chacun des termes suivant une définition est d'abord donnée, puis le cas particulier de la pierre jaune de Neuchâtel est traité.

N.B. :

Dans l'ébauche de nomenclature de Félix (1995), les altérations étaient spectaculaires et semblaient désastreuses. Alors que d'après la liste ici présente, les désordres semblent moins catastrophiques. Ceci tient au fait que Félix s'est principalement basé sur les observations qu'il a pu faire sur la façade Sud de la salle du grand conseil avant qu'elle ne soit nettoyée et restaurée. Cette façade était dans un état particulièrement mauvais, principalement les éléments sculptés directement

exposés aux pluies. Pour la présente étude, les dégâts énumérés sont relatifs à de très nombreux édifices de Neuchâtel et des alentours, et il s'avère qu'en dehors de quelques cas particuliers très locaux, les désordres affectant la pierre jaune sont rarement aussi graves que ceux observés par Félix. La différence d'interprétation entre ces deux études illustre bien la complexité de la question de l'altération d'une pierre. Notons encore que, si dans la plupart des cas les altérations "graves" qui affectent la pierre jaune de Neuchâtel sont peu fréquentes, chaque édifice constitue néanmoins un cas particulier qui doit être étudié séparément avant une intervention de grande ampleur.

1. ALTERATIONS CHROMATIQUES

Les altérations chromatiques se manifestent par la variation d'un ou plusieurs des paramètres qui définissent la couleur (luminance et chrominance). Cette modification peut apparaître sur des zones de forme et de taille variables.

Ces modifications sont très courantes sur la pierre jaune de Neuchâtel et ce sont certainement les désordres qui affectent, en termes de surface, le plus ce matériau. Ce sont des désordres qui peuvent beaucoup affecter l'aspect esthétique de la pierre jaune, mais qui sont néanmoins sans gravité du point de vue de la conservation.

1.1. Décoloration

Un matériel décoloré a perdu sa couleur originelle, en raison d'un processus préjudiciable l'affectant directement, comme la pénétration d'eau (taches colorées plus ou moins permanentes), l'insolation (perte d'intensité de la couleur) ou la formation d'oxydes métalliques. Cette différence de teinte n'est pas due à un dépôt.



Carrière d'Eclépens (VD)

La coloration jaune bien connue de la pierre jaune de Neuchâtel peut elle même être qualifiée de décoloration. En effet, dans les sondages provenant des travaux autoroutiers, ou dans certaines strates de subsurface (cf. photo de la carrière d'Eclépens ci-dessus), la pierre "jaune" qui n'a jamais été mise en contact avec l'oxygène de l'air est bleue. C'est l'oxydation des minéraux ferreux qui provoquent cette variation de teinte. Ce désordre est sans conséquence sur la conservation de la pierre.

1.2. Patine

La patine est une modification naturelle de la surface de la pierre après vieillissement. Il se forme une "couche" externe très mince qui adhère bien au substrat dont elle est néanmoins chimiquement différente. Cette évolution de la pierre n'entraîne pas de détérioration évidente, mais toujours une modification d'aspect physique et généralement de couleur.

Les patines évoluent progressivement vers la formation de croûtes.

Les patines sont très courantes sur la pierre jaune de Neuchâtel. Ce sont des patines, dans un premier temps, qui provoquent un brunissement de la pierre. Ce genre d'altération, bien qu'inesthétique, n'est pas néfaste pour la pierre (des données fournies dans ce rapport permettent de le mettre en évidence).



Neuchâtel, Rues des Beaux Arts, 18,20 : la partie droite du bâtiment a été nettoyée récemment tandis que la partie gauche est recouverte d'une patine. Photo B. Rousset, 2002



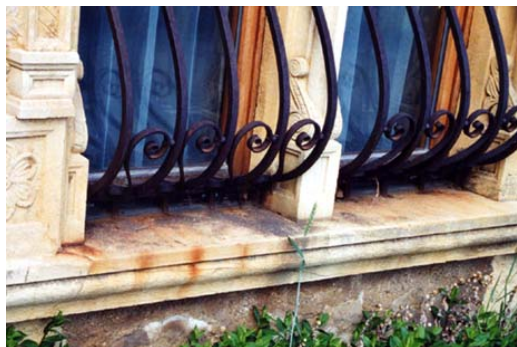
Neuchâtel, Place du Port, 2 : le bâtiment est couvert d'une patine plus ou moins épaisse, excepté sur les parties régulièrement lessivées par les pluies. Photo B. Rousset, 2002

1.3. Tache

Ce type de désordre est en général corrélé avec la présence de matériaux étrangers, déposés ou ayant pénétré la maçonnerie, comme la rouille, des sels de cuivre, des substances organiques, une peinture, un vernis...

Sur la pierre jaune, des taches sont visibles, mais elles représentent en général des désordres très ponctuels liés à des problèmes précis comme le dépôt de sels de cuivre sous une gouttière ou la formation de rouille autour de barreaux ou de gonds métalliques enchâssés dans la pierre. Ces désordres, ne présentent aucun risque pour la bonne conservation de la pierre.

Il faut encore noter que la pierre jaune de Neuchâtel peut présenter des taches naturelles, dues à des accumulations ponctuelles de minéraux colorés tels que des oxydes métalliques de fer ou de manganèse par exemple.



Cressier, Rue Laurent Peroud. Le rebord de fenêtre est taché par la rouille provenant du lessivage des barreaux métalliques. Photo B. Rousset, 2002



St-Blaise, Grand-Rue, 21. Cette pierre d'angle présente une tache violette naturelle formée par les oxydes métalliques de la pierre. Photo B. Rousset, 2002

1.4. Rubéfaction

La rubéfaction est une coloration rouge de la pierre suite à un incendie qui a provoqué l'oxydation des minéraux métalliques et particulièrement les minéraux contenant du fer.

Ce type d'altération affecte les pierres jaunes qui ont subi les divers incendies de Neuchâtel (comme à la collégiale), ou dans les villages environnants (abbaye de Romainmôtier, abbaye de Bevaix...). Les rubéfactions ne représentent pas un problème pour la conservation de la pierre jaune.



Bevaix, façade est de l'ancienne abbaye : les pierres jaunes situées au dessus de la porte sont rubéfiées. Photo B. Rousset, 2002



Neuchâtel, façade ouest de la collégiale (vue du cloître) : de nombreuses pierres sont rubéfiées. Photo B. Rousset, 2002

2. ÉROSION CHIMIQUE ET/OU MECANIQUE

L'érosion est une perte de particules solides de la surface du matériau. Le matériel endommagé présente un aspect différent de l'original, avec des reliefs, des anfractuosités,... L'érosion peut être due à l'eau, au vent, à des méthodes de nettoyage trop agressives...

L'érosion due à l'eau et au vent est un processus de dégradation "normal" de la pierre, accentué par les conditions d'exposition sur les bâtiments (multiplication des surfaces exposées et des angles). Cette érosion naturelle affecte la pierre jaune de Neuchâtel comme toutes les autres pierres, avec une intensité fonction de l'orientation. Mais nous avons constaté que même sur les parties les plus exposées aux intempéries, l'érosion n'est jamais un problème grave pour la pierre jaune de Neuchâtel, sauf peut-être quelques rares cas de faciès naturellement plus fragiles. Lorsque des facteurs autres que l'eau et le vent participent à l'érosion, les désordres qui en découlent peuvent être plus néfastes pour la pierre. C'est aussi le cas si des sels solubles sont présents et accélèrent le processus d'érosion naturel en cristallisant dans la porosité et entraînant ainsi la désolidarisation des grains constitutifs. Les désordres plus particulièrement liés aux sels seront exposés dans le chapitre 7 ci-dessous.

Les érosions chimiques et/ou mécaniques d'origine anthropique sont en perpétuelle augmentation et sont plus néfastes que les érosions naturelles avec ou sans sels.

2.1. Alvéolisation - Dissolution karstique

L'alvéolisation est une détérioration qui se manifeste principalement sur les matériaux fortement poreux, par formation de multiples cavités de formes et de dimensions variables (alvéoles, sillons). Les alvéoles sont, dans beaucoup de cas, interconnectées et ne présentent pas de distribution uniforme. Ce type d'altération, commun aux grès, aux calcaires et tout autre matériau de maçonnerie non homogène, est caractéristique des climats arides, mais il peut aussi être trouvé en zone humide. Ces dégâts apparaissent sur les surfaces exposées aux vents forts où l'évaporation des sels se produit en dessous de la surface, la creusant progressivement.

La dissolution karstique est un cas particulier d'alvéolisation propre aux matériaux calcaires : elle façonne divers types de cavités à bordures concaves (formes karstiques ou micro-karstiques) par dissolution de la calcite.



Neuchâtel, contrefort de la façade est de la collégiale : la présence de sels associée à un apport d'eau important pendant un certain temps a donné naissance à une érosion par alvéolisation. Photo B. Rousset, 2002



Cressier, encadrement de porte Rue Vallier, 5 : de nombreuses pierres de Cressier présentent ces formes d'altération entre l'alvéolisation, la dissolution karstique et l'érosion différentielle (cf. 2.2). Photo B. Rousset, 2002

Ces dissolutions karstiques se trouvent exceptionnellement sur la pierre jaune. Les conditions nécessaires à leur apparition sont très restreintes. Elles nécessitent soit la présence de sels et de conditions d'humidifications particulières (collégiale), soit un faciès de pierre jaune particulièrement sensible à l'érosion différentielle (cf. paragraphe suivant) qui débute par une alvéolisation (comme c'est le cas dans le village de Cressier). Lorsque ce type d'altération se met en place sur la pierre jaune et qu'il est lié à de trop grands apports d'eau et de sels, il peut entraîner la destruction irrémédiable de la pierre. Il n'est possible de l'arrêter qu'en supprimant l'apport d'eau et/ou de sels, et éventuellement en retirant les sels se trouvant déjà dans la pierre.

2.2. Erosion différentielle

L'érosion différentielle est une érosion qui apparaît avec une intensité variable sur différents secteurs du matériel. Cette différence d'intensité est due aux variations de la structure du matériel : l'érosion différentielle souligne très souvent l'hétérogénéité de la structure originale, et elle est plus courante sur les pierres sédimentaires formées de successions de strates de composition et de densité différentes.

L'érosion différentielle apparaît sur la pierre jaune de Neuchâtel généralement accompagnée de problèmes liés à la cristallisation de sels solubles qui favorisent une érosion rapide. La désolidarisation des grains, provoquée par les cristallisations de sels, ne se fait pas avec la même importance dans toutes les strates de pierre jaune. Cette pierre, très hétérogène, est souvent constituée par l'alternance de couches à granulométrie grossière et de couches à granulométrie fine. Ce sont dans ces dernières que les dégâts provoqués par les sels seront les plus intenses. Ainsi les strates les plus affectées seront en retrait tandis que les moins affectées resteront en relief. L'altération différentielle altère plus facilement certains faciès que d'autres.

Comme pour l'alvéolisation, si l'érosion différentielle de la pierre jaune est liée à la présence de sels et d'un apport d'eau, elle peut être très néfaste pour la pierre. Mais ces problèmes sont très locaux et très rares.



Neuchâtel, portail sud de la collégiale : la décohésion des grains due à des cristallisations de sels est plus conséquente dans les lamines les plus fragiles qui se retrouvent en retrait par rapport à la surface, laissant les lamines plus cohérentes en relief. Photo B. Rousset, 2002

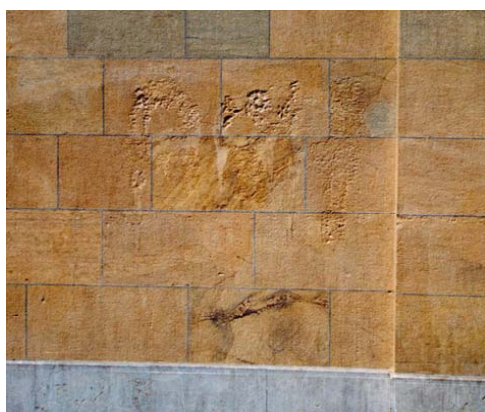


St-Blaise, Grand rue, 21. Les cycles imbibition-séchage et gel-dégel provoquent la décohésion des grains de la pierre jaune de ce soubassement. La décohésion est plus forte le long des strates les plus fragiles qui se retrouvent en retrait par rapport à la surface d'origine. Photo B. Rousset, 2002

2.3. Érosion chimique et/ou mécanique d'origine anthropique

Le nettoyage de la pierre visant à la débarrasser de sa couche de salissures externe provoque une érosion de la pierre plus ou moins importante. Suivant le procédé de nettoyage choisi, l'érosion sera mécanique et/ou chimique.

Les neuchâtelois acceptent mal de voir la pierre jaune de Neuchâtel se noircir, ou être recouverte de graffitis. En conséquence, divers nettoyages sont pratiqués de plus en plus fréquemment et bien souvent de manière incontrôlée. Ces nettoyages entraînent l'effacement de toute trace d'outil et la mise en relief des hétérogénéités de la pierre quand ils ne provoquent pas des dégâts encore plus graves.



Neuchâtel, Ruelle Breton. Le nettoyage d'un graffiti a été fait de manière si agressive que la surface de la pierre est creusée. Photo B. Rousset, 2002



Neuchâtel, Place Numaz Droz, 3, Collège latin. L'ensemble du bâtiment a été nettoyé par une technique trop abrasive qui a effacé toute trace d'outil en mettant en évidence les hétérogénéités de la pierre jaune. Photo B. Rousset, 2002

3. MODIFICATIONS DE LA SURFACE PAR DES APPORTS ENDOGENES

3.1. Patine

Cf. § 1.2

3.2. Croûte, incrustation, encroûtement

La croûte concerne la partie extérieure de la pierre où l'accumulation de produits a modifié les propriétés par rapport à l'intérieur. C'est une couche superficielle compacte, de couleur et de structure nettement différentes de celles du substrat (natures chimique, minéralogique et physique différentes).

Les produits qui s'accumulent en surface pour former les croûtes peuvent être à la fois des précipitations de produits endogènes (généralement des précipitations de carbonates véhiculés à travers la pierre de l'intérieur vers l'extérieur) et des dépôts exogènes (comme des particules de suies, de poussières et/ou de produits de décomposition de micro-organismes).

La croûte peut correspondre à l'évolution d'une patine. Elle peut être calcitique ou gypseuse et parfois peut renfermer du silicate de calcium, qui la rend plus difficile à enlever. À un stade plus évolué, il est possible que les croûtes aient tendance à moins bien adhérer au substrat. Elles peuvent alors avoir une plus faible cohésion

que le matériau sur lequel elles se développent, et tendent à devenir plus noires. Elles peuvent finir par se détacher spontanément du substrat, qui dans ce cas est souvent désagrégé et/ou pulvérulent immédiatement sous la croûte. En général les croûtes se développent plus facilement en zone abritée, où l'eau ne peut jamais dissoudre et lessiver les matériaux accumulés en surface.

Les croûtes ou incrustations sont fréquentes sur la pierre jaune de Neuchâtel, mais en général elles n'affectent pas de grandes surfaces. Elles occupent généralement des superficies nettement plus restreintes que les patines, et correspondent souvent à l'évolution locale de ces patines qui s'épaississent progressivement, perdant ainsi leurs caractéristiques de patine.



Neuchâtel, Rue Jeanne de Hochberg. Développement d'une croûte noire gypseuse en zone abritée sur un encadrement de porte. La croûte est pustuleuse en raison du développement des cristaux de gypse. Photo B. Rousset, 2002



Neuchâtel, Rue de la Maladière, 45, Portail de l'hôpital Pourtalès : La croûte noire gypseuse développée sur ce pilier, s'épaissit de bas en haut en raison de l'augmentation de la protection du chapiteau. Vers le sommet, la cristallisation intense des sels sous la croûte provoque sont décollement du substrat. Photo B. Rousset, 2002

4. MODIFICATIONS DE LA SURFACE PAR DES APPORTS EXOGENES

4.1. Patine

Cf. § 1.2

4.2. Salissure

Dépôt de matière (saleté) d'origine externe au matériau et n'évoluant pas chimiquement avec ce dernier, qui reste non modifié. Cette matière reste non cristallisée et non consolidée bien qu'elle puisse parfois adhérer très fortement au substrat. En général la surface est noircie. Ces salissures, souvent accidentelles, apparaissent par exemple après qu'un objet sale a été frotté contre une façade.

Ce type d'altération est très peu courant sur la pierre jaune où il correspond le plus fréquemment à des empoussièrément sous abris.



Neuchâtel, Faubourg du Lac, 11 : cet élément décoratif sous abri est couvert de poussière. Photo B. Rousset, 2002

4.3. Croûte, incrustation, encroûtement (cf. § 3.2)

Cf. § 3.2

4.4. Pellicule, film

Une pellicule - ou film - est une couche extérieure compacte, très mince, facilement détachable du substrat sain, constituée de substances étrangères à la pierre.

Des films de produits anti-graffitis sont très fréquents sur la pierre jaune en ville de Neuchâtel. Généralement ces films adhèrent bien aux façades traitées. Ils provoquent généralement un net blanchiment des façades traitées. Certains sont brillants, ce qui renforce encore la modification d'aspect des pierres traitées. Mis à part cet aspect esthétique, si ces films sont imperméables à la circulation de vapeur d'eau, ils peuvent être très dangereux pour la pierre : ces pellicules hermétiques empêchent l'eau qui pénètre la pierre par infiltration ou imbibition de s'évaporer, ce qui accélère la dégradation du matériau pierreux.



Neuchâtel, Ruelle Vaucher, Lycée Denis de Rougemont : le pan inférieur est très nettement blanchi par un traitement antigraffiti. Photo B. Rousset, 2002



Neuchâtel, Rue Jeanne de Hochberg, face à la Tour des Prisons : par endroit, le produit antigraffiti, très épais, s'écaille apparemment sans dommage pour la pierre. Photo B. Rousset, 2002

4.5. Graffitis

Dépôt de peinture, d'encre ou de matière semblable sur la surface d'un matériau de construction. Les graffitis sont habituellement le résultat d'un acte de vandalisme.

En ville de Neuchâtel, les graffitis sont malheureusement fréquents. D'où l'abondance des traitements anti-graffitis. Les graffitis affectent principalement l'esthétique de la pierre jaune sans entraîner de dégâts notables tant qu'ils n'affectent que des surfaces réduites. Mais leur abondance implique de nombreux nettoyages qui s'avèrent souvent très dégradants pour la pierre quelle qu'elle soit.



Passage Jean Jacques Rousseau, Galerie de l'étrange. Sans commentaires ! Photo B. Rousset, 2002



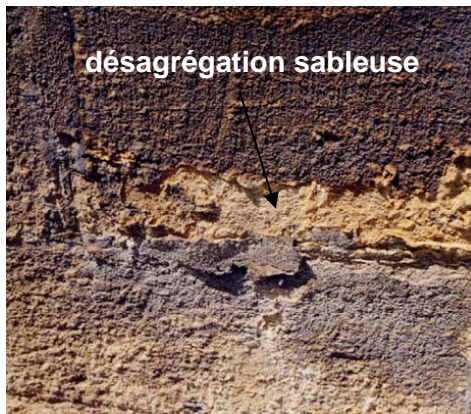
Neuchâtel, Ruelle Vaucher, 13. Sans commentaires ! Photo B. Rousset, 2002

5. MODIFICATIONS PAR DECOHESION DE LA PIERRE

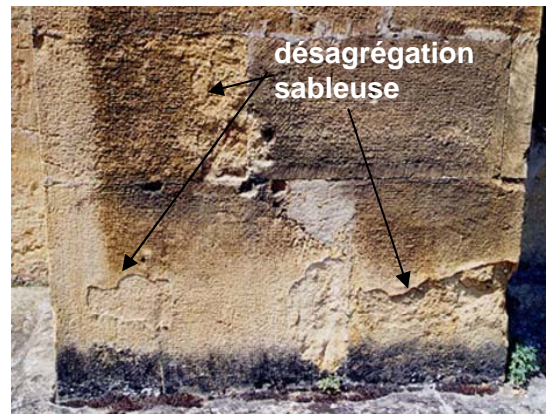
5.1. Désagrégation (sableuse)

La désagrégation – ou désagrégation sableuse – est un état avancé de décohésion caractérisé par le détachement de fragments de pierre, grains ou cristaux sous la plus légère stimulation mécanique. Elle implique une diminution considérable de la résistance mécanique originelle et une augmentation notable de porosité. La désintégration peut se produire à l'intérieur d'un matériau (perte de cohésion) ou à l'interface entre deux matériaux censés être joints entre eux (perte d'adhérence) : c'est le cas par exemple lorsqu'un mortier ou une peinture se détachent de la maçonnerie.

D'après les observations, la désagrégation sableuse de la pierre jaune est très rare et toujours liée à la présence de grandes quantités de sels solubles et d'une forte humidité sans lessivage direct. Elles apparaissent en général sous des croûtes qui, pendant un certain temps, ont imperméabilisé la surface et empêché les sels de venir cristalliser en surface. Les sels s'accumulent sous la surface lors des périodes sèches, et sont redissous lors des périodes humides. Les cycles de cristallisation/dissolution des sels dans la porosité provoquent alors la décohésion de la subsurface de la pierre, la croûte - qui s'est alors transformée en plaque - tombe et la désagrégation sableuse continue. Ce type de désordre (principalement s'il est causé par la présence de sels solubles) est très dangereux pour la pierre.



Neuchâtel, base du mur externe de la partie romane du château : les remontées capillaires depuis le sol dissolvent les sels du mortiers qui cristallisent en subsurface provoquant une désagrégation sableuse de la pierre jaune. Photo B. Rousset, 2002



Neuchâtel, base d'un contrefort de la façade est de la collégiale : ici ce sont les remontées capillaires depuis le socle qui dissolvent les sels du mortiers qui cristallisent en subsurface. Photo B. Rousset, 2002

5.2. Délitage

Le délitage est caractérisé par le détachement total ou partiel de couches, plaques, feuilles, parallèles à un débit naturel de la roche (stratification, foliation, schistosité) et qui reflète donc la nature structurale de celle-ci. En raison de leur structure stratifiée, les roches sédimentaires (grès, calcaires) posées en délit (strates parallèles à la surface exposée) sont facilement affectées par ce type d'altération. Si ces pierres sédimentaires sont formées par alternance de strates plus ou moins argileuses, le processus de délitage est accentué en raison de la vulnérabilité plus importante des lits les plus argileux. Les couches qui se séparent du substrat sont généralement formées de matériau qui semble inchangé, de forme et d'épaisseur irrégulières. Ce phénomène étant favorisé par la présence de sels solubles et/ou de microorganismes, des efflorescences de sels et/ou des patines biologiques se trouvent souvent sous les couches décollées. Ce phénomène peut aussi être favorisé par les cycles de gel/dégel.



Bevaix, mur d'enceinte du parc du château : cette pierre d'angle subit un délitage intense probablement en raison du gel qui désagrège les strates les plus fines. Photo B. Rousset, 2002



St-Blaise, chemin de la petite France : ce pilier soutenant un balcon se délite. Photo B. Rousset, 2002

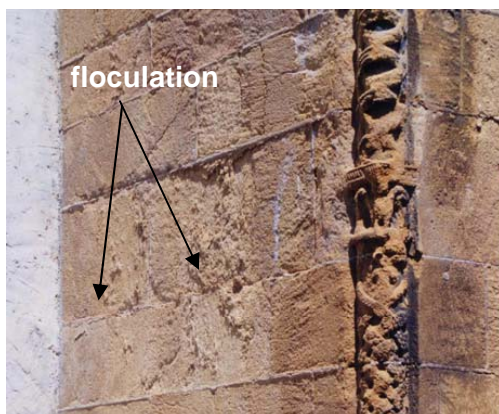
Les délitages sur la pierre jaune sont très rares. Même s'il existe une forte anisotropie dans cette pierre liée à l'alternance de couches sédimentaires très nettement différentes, il n'en demeure pas moins que le ciment qui relie les strates entre elles est très solide et très exceptionnellement argileux. Les délitages n'affectent par conséquent que quelques rares faciès très particuliers, ou des pierres jaunes en délit dans lesquelles les sels sont abondants ou facilement soumis à de forts apports d'eau et des cycles de gel/dégel.

Ce type d'altération n'est dangereux pour la pierre que si les strates qui se décollent sont très épaisses et/ou s'il est en relation avec la présence de sels.

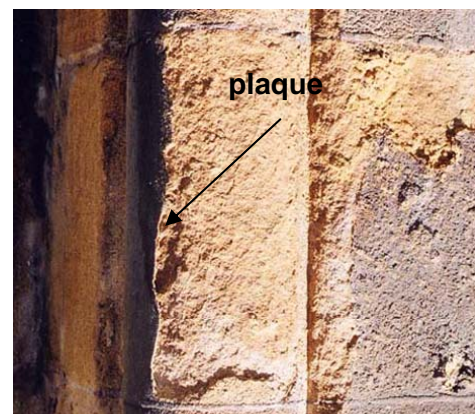
5.3. Exfoliation

Désordre se traduisant par le détachement de couches minces (feuilles) parallèles à la surface de la maçonnerie, indépendamment d'une éventuelle structure litée de la pierre. Ces couches présentent une épaisseur homogène de l'ordre du millimètre jusqu'à – exceptionnellement – quelques centimètres. Elles peuvent être constituées de matériel soit apparemment sain, soit altéré. Lorsque les morceaux détachés ont une petite superficie (=flocons) l'exfoliation est appelée **floculation** ; s'ils ont une superficie plus grande (= plaques), on parle de **décollement de plaque**.

Les exfoliations de la pierre jaune sont très rares, et toujours reliées à des conditions extrêmes d'humidité importante et de présence de sels solubles. Généralement les pierres affectées par ce désordre sont très exposées aux intempéries : pluies, vent et insolation. Il en résulte qu'après une période humide, les vents et/ou le soleil favorisent un séchage rapide de la pierre. Les sels n'ont pas le temps d'atteindre la surface avant de cristalliser. Ils cristallisent par conséquent en sub-surface, à une profondeur toujours plus ou moins identique. C'est le long de cette surface de cristallisation préférentielle que la décohésion de la pierre est intense et que se décolle progressivement une plaque d'une épaisseur fonction de la porosité du matériau et les conditions d'exposition. Cette plaque est parallèle à la surface d'origine et indépendante de la stratification naturelle de la pierre. Ce genre de désordre est dangereux pour la pierre parce que toujours lié à la présence de sels solubles.



Neuchâtel, mur externe de la partie romane du château : les cristallisations de sels en subsurface provoquent une floculation. Photo B. Rousset, 2002



Neuchâtel, mur interne de la partie romane du château : les cristallisations de sels en subsurface provoquent un décollement de plaque. Photo B. Rousset, 2002

6. MODIFICATIONS LIEES A LA PRESENCE D'EAU

6.1. Taches d'humidité, zones humides

La surface du matériel montre des taches clairement mouillées ou des zones de couleur différente, généralement plus foncées. Ce type de dommage peut être provoqué par exemple par la pénétration d'eau (par remontée capillaire), ou par un comportement hygroscopique dû à la présence de sels.

Ce type de désordre est rare sur la pierre jaune de Neuchâtel et lié à la présence de sels hygroscopiques. Il apparaît et disparaît en fonction de l'humidité relative ambiante.



Auvernier, ancienne fontaine devant le château : la présence de sels hygroscopiques dans la pierre jaune se traduit par la présence d'efflorescences (voiles blancs) et de taches humides (pierre plus sombre à droite). Photo B. Rousset, 2002



Neuchâtel, partie romane du château : cette tache humide est visible même en période sèche. Photo B. Rousset, 2002

6.2. Remontées capillaires

Les remontées capillaires correspondent à un phénomène d'absorption par capillarité de l'eau du sol depuis la base des murs de maçonnerie, ou depuis toute surface horizontale. L'eau qui remonte à travers les murs mouille les surfaces intérieures et extérieures où une tache, limitée horizontalement, est visible. L'eau capillaire transporte souvent des sels en solution, ce qui peut se traduire par des efflorescences et mener à long terme à la détérioration de la maçonnerie, du plâtre, du bois et de la peinture. Les remontées capillaires depuis le sol peuvent résulter d'un mauvais drainage.

D'après nos observations, il y a peu de problèmes de remontées capillaires sur les bâtiments en pierre jaune. Généralement la base des bâtiments est construite en "roc du Jura", pierre calcaire très dure et très peu poreuse qui empêchent les remontées capillaires depuis le sol vers la maçonnerie en pierre jaune. Ainsi les problèmes liés à la présence de sels solubles sont fortement limités dans ces maçonneries. Il peut y avoir des remontées capillaires depuis le socle en roc du Jura qui a tendance à retenir l'eau qui s'écoulerait naturellement vers le bas. Dans ce cas,

les remontées capillaires ont très peu de conséquences pour les pierres sus-jacentes parce que les eaux transférées sont beaucoup moins chargées en sels que si elles provenaient directement du sol.

En général, les remontées capillaires depuis le sol ou depuis le socle sont très peu étendues verticalement, sans doute en raison de la faible vitesse d'absorption d'eau de la pierre jaune.



Le Landeron, entrée du temple, intérieur : effet de remontées capillaires depuis le sol où s'accumule les eaux et les sels de déverglaçage apportés par les paroissiens. Photo B. Rousset, 2002



Neuchâtel, avenue de la gare, 6 : effet de remontées capillaires depuis un rebord inférieur imperméable. Photo B. Rousset, 2002

7. MODIFICATIONS LIEES A LA PRESENCE DE SELS

7.1. Cryptoflorescences, subflorescences

Il s'agit d'accumulation non évidente de cristaux de sels solubles juste sous la surface d'une maçonnerie qui sont donc des "efflorescences" de sub-surface. Les subflorescences sont potentiellement nocives : la pression exercée par les cristaux lorsqu'ils croissent peut provoquer des dommages à la maçonnerie, la formation de plaques. Des efflorescences de surface peuvent être accompagnées de subflorescences.

Sur la pierre jaune de Neuchâtel, comme sur les autres pierres, les cryptoflorescences accompagnent toutes les modifications par décohésion (cf. chapitre 5 ci-dessus : décohésion intergranulaire, désagrégation sableuse, délitage, exfoliation) ainsi que les alvéolisations-dissolutions karstiques (cf. § 2.1) et l'érosion différentielle (cf. § 2.2). Toutes ces altérations étant plutôt rares sur la pierre jaune, les subflorescences le sont aussi. La présence de cryptoflorescences est toujours un grand danger pour la pierre car elles témoignent de la présence de sels et de conditions d'exposition telles que ces sels ne peuvent pas cristalliser en surface ; ceci provoque la décohésion du substrat et d'importantes pertes de matière lors des cycles de dissolution-cristallisation. Les sels étant très hygroscopiques, même si la source d'humidité est interrompue, ils ont la capacité d'adsorber de grandes quantités de vapeur d'eau jusqu'à provoquer leur propre dissolution. Pour stopper leur effet néfaste, il faut stopper l'apport d'humidité mais aussi – pour autant que ce soit possible - les éliminer eux-mêmes.



Neuchâtel, partie romane du château : des cristallisations de sels (aiguilles blanchâtres) se développent sous la surface et décollent progressivement la croûte. Photo B. Rousset, 2002

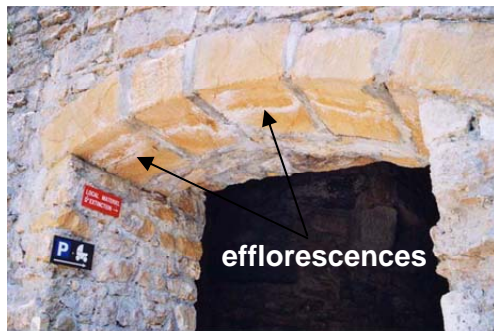


Neuchâtel, portail de la collégiale : sous les croûtes se développent des subflorescences qui après la chute de la partie superficielle deviennent des efflorescences. Photo B. Rousset, 2002

7.2. Efflorescences

Tout dépôt de sels visible à la surface de la maçonnerie est une efflorescence. Ces dépôts de cristaux de sels solubles sont généralement blanchâtres et peu consistants (voiles blanchâtres). Ils sont provoqués par les phénomènes de migration des sels lors de l'évaporation de l'eau contenue dans la maçonnerie. Les remontées d'eau capillaire, par exemple, peuvent entraîner des sels exogènes à l'intérieur de la maçonnerie, comme les chlorures employés pour saler les chaussées ou bien encore les nitrates des engrais. On trouve aussi parmi ces sels les carbonates provenant des mortiers à la chaux ainsi que des dépôts de sulfates en partie d'origine atmosphérique. Une efflorescence peut aussi être un résidu de sel laissé sur la surface de la maçonnerie par un nettoyage chimique, soit que la solution chimique employée était trop concentrée, soit que le rinçage était inadapté. L'efflorescence elle-même est souvent plus inesthétique que nocive, mais sa présence sur des bâtiments anciens sert souvent d'avertissement en indiquant que l'eau a trouvé un point d'entrée dans la structure. Une fois que cette étape est franchie, des dommages plus sérieux peuvent habituellement être prévus. L'efflorescence peut également indiquer la présence d'accumulations de sels sous la surface de la maçonnerie (subflorescences, cf § précédent) qui sont potentiellement préjudiciables à la maçonnerie, et plus certainement sources d'ennuis.

Comme les subflorescences, les efflorescences sont relativement rares sur la pierre jaune de Neuchâtel. Elles sont toujours très localisées. Ces efflorescences ne sont visibles qu'en zones abritées des pluies et autres ruissellements directs qui les lessiveraient, ou sur des zones potentiellement lessivables, mais en période très sèche. Les efflorescences participent à la naissance des alvéolisations (cf. § 2.1), de l'érosion différentielle (cf. § 2.2), de la désagrégation sableuse (cf. § 5.1), des patines (cf. § 1.2) et des encroûtements (cf. § 3.2). Affectant seulement la surface, elles ne sont pas vraiment néfastes, mais témoignent toutefois d'un apport d'humidité et de sels solubles dans la construction qui peuvent devenir dangereux si les conditions hygrométriques changent : les efflorescences apparaissent en surface sur les zones qui sèchent lentement. Si ce séchage devient plus rapide, les sels ne cristalliseront plus en surface mais en subsurface et dans ce cas les subflorescences qui se formeront seront nocives pour la pierre.



Valangin, entrée des toilettes du château : les sels des joints au ciment sont dissous et véhiculés par l'eau à travers la pierre jusqu'en surface où ils forment des efflorescences. Photo B. Rousset, 2002



Romainmôtier : l'encadrement de porte de ce garage est recouvert d'efflorescences. Photo B. Rousset, 2002

7.3. Taches d'humidité, zones humides

Cf. § 6.1.

8. MODIFICATIONS D'ORIGINE BIOLOGIQUE

Des recouvrements d'origine biologique, dont beaucoup d'organismes vivants (lichen, algues, mousses, champignons, fougères, végétaux supérieurs,...) prospèrent de façon évidente dans/sur les maçonneries. Les végétaux supérieurs sont immédiatement reconnaissables tandis que les microorganismes doivent être différenciés des autres dépôts grâce à l'observation de leurs parties vivantes, et de leurs caractéristiques propres (aspect, couleur...).

Les recouvrements d'origine biologiques sont très fréquents sur les pierres jaunes de Neuchâtel et sont de différentes natures.

8.1. Algues

Les algues se développent à la surface des pierres, en général, à l'extérieur d'un bâtiment sur des parties d'édifice régulièrement soumises aux pluies ou à une forte humidité. Ces algues forment des dépôts pulvérulents constitués de filaments. Elles sont habituellement vertes, rouges, brunes ou noires.

Les algues croissent sur toutes les pierres jaunes qui présentent des conditions idéales à leur développement, soit une grande humidité. Suivant l'ensoleillement, les espèces qui se développent diffèrent. Elles sont inesthétiques mais leur nocivité pour la pierre n'est pas évidente : elles forment un film qui peut être protecteur mais, suivant les espèces, les produits qu'elles excrètent pourraient s'avérer dangereux pour la pierre calcaire.



Neuchâtel, Faubourg du lac, colonne sur une fontaine : le recouvrement gris noir est dû à des algues. Photo B. Rousset, 2002



Neuchâtel, rue de l'Evole : tout ce pilier est recouvert d'un film verdâtre dû à des algues. Photo B. Rousset, 2002

8.2. Lichens

Les lichens se développent sur les parties extérieures régulièrement soumises aux pluies ou à une forte humidité et présentent un aspect écaillé ; ils sont habituellement orange, vert, gris ou noir.

Les lichens abondent sur les pierres jaunes directement soumises aux pluies, comme les mains courantes, les balustrades, les corniches, les balcons,... Ces microorganismes ont besoin d'humidité et de lumière.

Comme pour les algues, les lichens sont inesthétiques, mais leur nocivité pour la pierre n'est pas évidente.



Neuchâtel, château : à côté ou sur le recouvrement gris noir des algues se développent des lichens gris blanc. Photo B. Rousset, 2002

8.3. Mousses

Les mousses se développent sur les parties extérieures régulièrement soumises aux pluies ou à une forte humidité, sous forme de coussins verts ou de touffes velues ; lorsqu'elles sont sèches, elles sont de couleur brune. Les mousses plongent leurs racines dans le substrat. Ces racines produisent des acides qui dissolvent certains minéraux, et le liant dans le cas des mortiers.

Les mousses sont plus rares que les algues et les lichens. Elles semblent nécessiter moins de lumière que ceux-ci. Elles se développent bien sur tous les éléments architecturaux en pierre jaune directement soumis aux pluies et qui ont tendance à retenir l'eau en dehors des périodes de pluies. Les mousses sont inesthétiques, et leur racines en s'insérant dans les anfractuosités naturelles de la pierre peuvent

accélérer la dégradation de celle-ci.



Neuchâtel, faubourg de l'Hôpital, 68 : dans la frange capillaire se répartissent les algues et les lichens (jaune, gris vers le haut) et les mousses (à la base). Photo B. Rousset, 2002



Neuchâtel, mur externe du cloître de la collégiale : les mousses se développent sur les contreforts où l'humidité est élevée et la luminosité peu importante. Photo B. Rousset, 2002

8.4 Végétaux supérieurs

Les végétaux supérieurs (des fougères aux arbres) prospèrent dans les mortiers délabrés de la maçonnerie, ou sur des éléments architecturaux sur lesquels suffisamment de matériaux terreux ont pu s'accumuler.

Les végétaux supérieurs se développent rarement sur les bâtiments en pierre jaune et traduisent un mauvais entretien. Leurs racines ont tendance à désolidariser les blocs de pierre les uns des autres en pénétrant toujours plus profondément dans les anfractuosités et les parties les plus tendres. Elles s'attaquent à la pierre de façon mécanique mais aussi de façon chimique en se nourrissant des minéraux rencontrés.



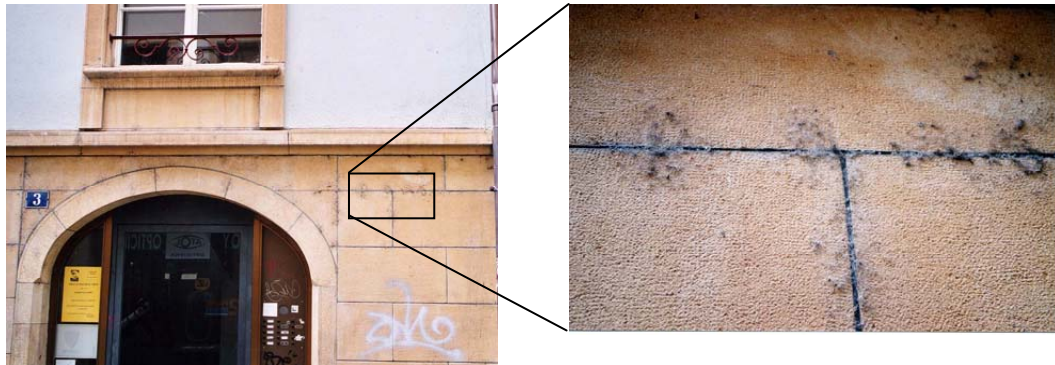
Neuchâtel, cloître de la collégiale : des arbustes se sont développés sur le toit en tuiles mais leurs racines risquent d'atteindre la pierre sous-jacente et de déceler des blocs. Photo B. Rousset, 2002

8.5 Araignées

Les araignées colonisent tous les éléments architecturaux à l'abri de la pluie et qui fournissent suffisamment d'aspérités pour permettre l'installation d'une toile. Ce sont les toiles et non les araignées elles-mêmes qui sont le plus visibles et sont par endroits si abondantes qu'elles sont très inesthétiques.

Les toiles d'araignées sont très fréquentes en ville de Neuchâtel. Les araignées profitent de toutes les cavités accessibles pour s'installer : la porosité naturelle de la pierre, des joints en retraits par rapport à l'appareillage, des rebords de fenêtres ou

de corniches. Ce désordre n'affecte bien sûr que l'esthétique de la pierre jaune.



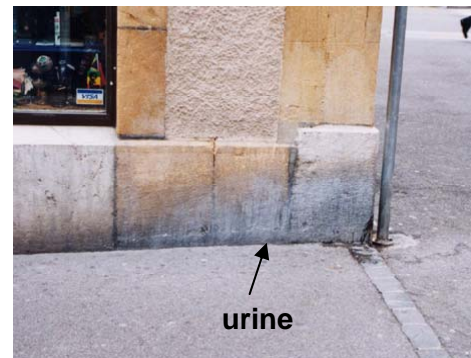
8.6 Urine de canidés

Dans toutes les villes, le mobilier urbain et la base des éléments architecturaux verticaux sont les lieux de déjection privilégiés des chiens. Au bout d'une certaine durée de ce "traitement", les pierres tendent à noircir et le noircissement à se recouvrir d'un voile blanchâtre.

Ces désordres inesthétiques n'épargnent pas la pierre jaune de Neuchâtel lorsqu'elle est à hauteur de patte. Ils ne semblent pas être très néfastes à la pierre, étant très localisés. Néanmoins l'accumulation de ces dépôts superficiels chargés en sels solubles pourrait provoquer par endroits des dégâts liés à la présence de ces sels.



Neuchâtel, faubourg du lac. Photo B. Rousset, 2002



Neuchâtel, Grand-Rue. Photo B. Rousset, 2002

9. MODIFICATIONS PHYSIQUES ET/OU MECANIQUES

9.1. Éclats, épaufrures, esquilles

Il s'agit de fragments compacts de taille et de forme variables, se séparant de la maçonnerie, souvent à partir des coins saillants ou au niveau des joints de mortier. Ces éclats sont constitués de matériau apparemment inchangé. Ces désordres peuvent résulter de dommages causés par des interventions postérieures à la mise en oeuvre, comme l'utilisation d'un mortier trop dur, un accident ou du vandalisme.

Si à de très rares endroits la pierre jaune est effectivement amputée de quelques éclats, il semble que ces désordres soient toujours liés à une altération mécanique brutale accidentelle.



Neuchâtel, rue du Château : un véhicule a probablement percuté ce mur, entraînant une fissure et un éclat. Photo B. Rousset, 2002

9.2. Éclatement

L'éclatement de la surface de la pierre est provoqué par le gonflement d'un mortier, d'éléments métalliques à l'intérieur de la maçonnerie.

Ces éclatements sont parfois observés sur la pierre jaune de Neuchâtel. Ils sont toujours nettement liés au gonflement de pièces métalliques rouillées comme des gonds, des barreaux, des tirants. Ces dégâts peuvent être dangereux, non pas pour la construction mais surtout pour les passants s'ils affectent des pierres surélevées.



Colombier, château : l'oxydation des barreaux de fer a provoqué l'éclatement de la Pierre jaune. Photo B. Rousset, 2002



Colombier, château : le gond enchâssé trop près du bord a fait éclater la pierre. Photo B. Rousset, 2002

9.3. Fissure, fracture

Une fissure est une discontinuité qui apparaît dans un matériau, séparant macroscopiquement une partie d'une autre, avec ou sans déplacement relatif des deux parties. La fissuration peut être limitée à la surface du matériau, mais elle peut également être plus conséquente et affecter le matériau en profondeur et même le faire tomber en pièces. Les fissures doivent être surveillées. Différentes formes de fissures peuvent être définies suivant leur largeur, leur forme, leur emplacement sur la construction. La fissuration peut résulter de diverses conditions comme la structure du bâtiment, l'utilisation d'un mortier trop dur, un accident ou bien encore une évolution logique du matériau employé.

Bien que de nombreuses fissures ont pu être observées par Félix lors de l'expertise préliminaire au nettoyage de la salle du grand conseil, lors des observations faites depuis le sol, seules quelques fissures accidentelles ont été repérées. D'après les observations de Félix, les fissures de la pierre jaune de Neuchâtel semblent caractéristiques des éléments sculptés, très découpés et soumis aux pluies directes. Ces fissures témoignent sans doute d'une évolution normale de la pierre jaune dans ces conditions extrêmes : cette pierre présentant une forte anisotropie due à sa stratification, lorsqu'elle est fortement découpée, peut être soumise à de fortes tensions qui induisent la formation de fissures.

Souvent les fissures observées correspondent à des joints stylolithiques dans lesquels la matière argileuse et/ou riche en oxydes de fer a été lessivée.

Cf image § 9.1 ci-dessus

ANNEXE 4

POROSITE A L'EAU ET MASSES VOLUMIQUES

1. PRINCIPE

La porosité d'un matériau poreux est définie par la fraction du volume V qui n'est pas occupé par une phase solide. La valeur de porosité mesurée à l'eau par imbibition sous vide correspond à la fraction du réseau V qui est parfaitement connectée. Mais dans les roches sédimentaires dont la pierre jaune fait partie, la porosité occluse est extrêmement faible, voire inexistante, et par conséquent la valeur mesurée à l'eau est égale à la porosité totale.

Cette valeur ne donne aucune information sur les dimensions et la distribution des pores : deux roches de même porosité à l'eau peuvent avoir des propriétés physiques totalement différentes.

Après avoir fait le vide à l'intérieur de l'espace poreux, un échantillon est totalement immergé dans l'eau. Tout le volume poreux connecté se trouve alors occupé par de l'eau. Connaissant le poids sec, le poids imbibé mesuré dans l'eau et le poids imbibé mesuré dans l'air, il est possible de déduire la quantité de volume poreux de l'échantillon, ainsi que les masses volumiques apparente et réelle.

Ces mesures ont été effectuées par la méthode de la triple pesée conseillée par les normes RILEM (1978 – essai n°I-1).

2. RESULTATS

Légende des tableaux :

$P1$ = poids sec

$P2$ = poids imbibé pesé dans l'air

$P3$ = poids imbibé pesé dans l'eau

Po = porosité totale = $(P2-P1)/(P2-P3)*100$

MVa = masse volumique apparente = $P1/(P2-P3)*1000$

MVr = masse volumique réelle = $P1/(P1-P3)*1000$

Couleur de fond : chaque bloc de couleur continu (vert ou blanc) correspond à un faciès. Ainsi par exemple, les échantillons ne1, ne2, ne3, ne4 proviennent tous de blocs différents, chacun étant caractérisé par un faciès. Par contre les échantillons ne19, ne20 et ne 21 proviennent tous d'un même bloc de pierre et présentent plus ou moins le même faciès.

2.1. Félix C., 1993 (rapport 32/93/LCP)

Éprouvette	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	Po (% vol)	MVa (kg/m ³)	MVr (kg/m ³)
25	758.1	824.5	479.9	19.3	2200	2725
26	789.0	850.2	499.3	17.4	2249	2724
27	786.8	839.5	498.0	15.4	2304	2724
28	761.6	822.2	481.7	17.8	2237	2721
29	754.5	819.4	477.3	19.0	2205	2722
30	791.3	842.9	500.4	15.1	2310	2720
31	756.4	817.2	477.9	17.9	2229	2716
32	767.1	825.9	485.1	17.3	2251	2720
33	758.0	819.3	479.0	18.0	2227	2717
34	761.5	821.4	481.2	17.6	2238	2717
35	759.6	825.6	484.0	19.3	2224	2756
36	765.1	818.7	479.9	15.8	2258	2683
			Moyenne	17.5	2244	2720
			Écart type	1.4	34	16
			Minimum	15.1	2200	2683
			Maximum	19.3	2310	2756
			Effectif	12		
			Nb de faciès	1		
Tableau A4-1. Porosité à l'eau, Félix 1993 - Type d'échantillons : éprouvettes cubiques d'arête de 7cm tous issus d'un même bloc de pierre						

2.2. Echantillons prélevés sur les monuments

Bâtiment	Eprouvette	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	Po (% vol)	MVa (kg/m ³)	MVr (kg/m ³)
Hôpital Pourtalès	ne 1	17.0	18.7	10.8	21.0	2142	2712
	ne 2	17.1	18.4	10.8	18.1	2223	2715
	ne 3	17.2	18.5	10.9	17.6	2240	2718
	ne 4	20.9	21.9	13.2	11.5	2404	2716
Maison Wavre	ne 5	18.9	20.0	11.9	13.7	2340	2713
	ne 6	24.6	25.7	15.5	10.8	2417	2710
	ne 7	21.6	22.8	13.7	12.5	2387	2728
	ne 8	18.1	19.2	11.4	13.6	2340	2707
6, Dupeyrou	ne 9	20.4	21.8	12.9	16.6	2274	2728
Portail Collégiale	ne 12	21.6	22.7	13.7	12.5	2376	2717
	ne 13	20.6	21.8	13.0	13.6	2345	2713
Tour Prisons	ne 15	22.5	23.6	14.2	12.0	2372	2697
MHN sous fenêtre	ne 17	18.3	19.4	11.5	14.9	2308	2713
	ne 18	19.4	20.6	12.3	14.5	2321	2713
	ne 19	20.4	21.7	12.9	14.6	2313	2709
	ne 20	19.8	20.9	12.5	13.1	2357	2712
	ne 21	18.9	20.1	11.9	14.2	2323	2708
	ne 22	18.8	20.0	11.9	13.8	2337	2711
	ne 23	18.4	19.8	11.6	16.3	2273	2714
MHN cour	ne 24	19.3	20.5	12.2	14.3	2330	2718
	ne 25	18.9	19.8	11.9	11.7	2396	2713
	ne 26	18.0	19.2	11.4	15.1	2307	2719
Portail Rue Jeanne de Hochberg	ne 27	19.3	20.4	12.2	13.4	2350	2714
	ne 28	15.2	16.4	9.6	17.6	2247	2726
	ne 29	11.8	12.7	7.5	18.2	2231	2727
	ne 30	17.2	18.2	10.8	13.6	2341	2711
MHN Rue	ne 31	19.1	20.0	12.1	10.9	2423	2719
	ne 32	18.2	19.4	11.5	14.3	2327	2714
	ne 33	9.7	10.3	6.1	14.3	2320	2708
Moyenne					14.4	2323	2715
Ecart type					2.4	64	7
Minimum					10.8	2142	2697
Maximum					21.0	2423	2728
Effectif					29		
Nb de faciès					21		
<p>Tableau A4-2. Porosité à l'eau des échantillons prélevés sur les constructions neuchâteloises - Type d'échantillons : selon les cas, ¼ ou ⅓ des éprouvettes cylindriques (diamètre de 2.5 cm pour une longueur ramenée à 4.5 cm) coupé dans le sens de la longueur</p>							

2.3. Echantillons prélevés sur les fronts de taille

Eprou- vette	Forme	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	Po (% vol)	Mva (kg/m ³)	MVr (kg/m ³)
H1a	Cube 4	183.50	185.10	115.59	2.3	2640	2702
H1b	Cube 4	205.89	207.85	129.86	2.5	2640	2708
H1	Qcq	624.03	628.74	392.62	2.0	2643	2697
H2a	Cube 4	96.51	97.86	61.00	3.7	2618	2718
H2b	Cube 4	95.11	96.77	60.14	4.5	2597	2720
H2	Qcq	660.09	671.51	417.47	4.5	2598	2721
H3a	Cube 4	182.29	184.34	115.29	3.0	2640	2721
H3	Qcq	435.69	443.73	275.15	4.8	2584	2714
H4a	Cube 4	190.19	192.87	120.22	3.7	2618	2718
H4b	Cube 4	188.28	190.51	118.96	3.1	2631	2716
H4	Qcq	713.85	725.74	451.25	4.3	2601	2718
H5a	Cube 4	163.42	168.66	103.17	8.0	2495	2712
H5b	Cube 4	162.35	168.12	102.53	8.8	2475	2714
H5	Qcq	478.84	497.17	302.56	9.4	2461	2716
H6a	Cube 4	128.67	141.37	81.28	21.1	2141	2715
H6b	Cube 4	130.66	142.62	85.54	21.0	2289	2896
H6	Qcq	550.60	599.50	347.58	19.4	2186	2712
H7a	Cube 4	192.77	195.43	121.77	3.6	2617	2715
H7b	Cube 4	198.11	200.82	125.10	3.6	2616	2713
H7	Qcq	420.16	426.56	264.80	4.0	2597	2704
H8a	Cube 4	194.02	197.38	122.44	4.5	2589	2711
H8b	Cube 4	192.64	195.80	121.61	4.3	2597	2712
H8	Qcq	585.74	591.15	369.04	2.4	2637	2703
H9a	Cube 4	152.31	159.91	96.34	12.0	2396	2721
H9b	Cube 4	152.04	159.97	96.13	12.4	2382	2719
H9	Qcq	996.60	1053.40	630.08	13.4	2354	2719
H10a	Cube 4	150.29	157.66	94.94	11.8	2396	2715
H10	Qcq	392.54	411.12	247.80	11.4	2404	2712
Moyenne					7.5	2516	2720
Ecart type					5.8	145	35
Minimum					2.0	2141	2697
Maximum					21.1	2643	2896
Effectif					28		
Nb de faciès					10		

Tableau A4-3. Porosité à l'eau des échantillons prélevés sur les fronts de taille –
Forme des échantillons : Cube 4 = cube de 4 cm d'arête ; Qcq = échantillon "brut" non scié,
de forme quelconque

ANNEXE 5

POROSIMETRIE AU MERCURE

1. PRINCIPE

La porosité totale ne donne qu'une estimation globale du volume poreux d'une roche. Pour rendre compte de la répartition volumique des pores en fonction de leur rayon d'accès, il est nécessaire de définir le spectre de porosité. Ceci peut être fait par injection de mercure.

Après avoir fait le vide dans l'espace poreux, le volume de la roche est déterminé par immersion dans un bain de mercure. Le mercure étant non mouillant, il ne pénètre pas dans l'espace poreux à la pression atmosphérique. On fait croître la pression de mercure par paliers successifs jusqu'à ce que le fluide pénètre dans le réseau poreux. Si la pression est suffisante le mercure envahit même les plus petits pores. La valeur de pression appliquée, P_{Hg} , qui est connue et contrôlée peut être reliée à une valeur de rayon d'accès aux pores, $R_{\text{accès}}$, et pour chaque palier de pression le volume de mercure ayant pénétré dans l'échantillon, V_{Hg} , est mesuré.

Lorsqu'on augmente la pression sur le mercure, les pores dont les accès de plus en plus petits sont progressivement envahis.

Le volume de mercure cumulé ayant pénétré reste faible pour un grand intervalle de pression. A partir d'une certaine valeur de pression correspondant à la valeur de rayon seuil, R_{seuil} , la plus grande partie du volume poreux est envahi pour un intervalle de pression très réduit. Puis si l'augmentation de pression est poursuivie jusqu'à 2000 bars, pour un intervalle plus ou moins grand de très fortes pressions, le volume de pores qui peut encore être envahi par le mercure est faible.

Grâce à cet essai, nous avons accès au spectre de porosité d'une roche. Ceci se fait en plusieurs étapes :

- La macroporosité (quelques centaines à $7.5 \mu\text{m}$ de rayon d'accès) est envahie pour les valeurs de pressions basses de 10^{-2} mm de mercure jusqu'à la pression atmosphérique.
- La microporosité (de $7.5 \mu\text{m}$ à 3.7 nm environ) est envahie pour des pressions depuis la pression atmosphérique jusqu'à 2000 bars.

On peut aussi estimer indirectement la gélivité du matériau : un matériau pour résister au gel doit présenter un volume de pores capable d'absorber l'expansion volumique due à la transformation de l'eau en glace. Lorsqu'une pierre absorbe de l'eau par capillarité, en raison de la complexité du réseau poreux, une partie du volume des pores reste toujours occupée par de l'air qui se trouve piégé dans les grands pores. La transformation de l'eau en glace s'accompagne d'une expansion volumique de 9%. Ainsi, pour qu'un matériau poreux imbibé d'eau résiste au gel, il faut qu'au moment du gel le volume des pores libres d'eau - c'est-à-dire de plus grand diamètre - soit au moins égal à 10% de la porosité totale du matériau. La valeur de ce diamètre qui correspond au dixième de la porosité atteinte par le mercure lors de l'essai de porosimétrie, appelé diamètre ou rayon critique de gélivité, (R_{10}) peut suivant cette hypothèse, caractériser un matériau du point de vue de sa résistance au gel. L'étude empirique de différents types de matériaux de construction a montré que (Gérard, 1969) :

- si $R_{10} < 1 \mu\text{m}$ le matériau ne sera pas résistant au gel
- si $R_{10} > 1.5 \mu\text{m}$ le matériau sera résistant au gel
- si $1 \mu\text{m} < R_{10} < 1.5 \mu\text{m}$ l'essai porosimétrique n'est pas suffisant pour conclure sur la gélivité du matériau, d'autres essais sont nécessaires.

En fait, la transformation de l'eau en glace dans un réseau poreux est un processus extrêmement compliqué et aujourd'hui encore mal compris. Le seul critère R_{10} ne permet pas d'affirmer avec certitude si un matériau poreux est ou non gélif, mais il permet quand même d'avoir une idée relativement claire sur le

comportement d'un tel matériau lors du gel, surtout si les valeurs de R10 sont nettement définies et différentes des valeurs limites d'interprétation.

Le programme informatique couplé au porosimètre utilisé (Carlo Erba CE 2000 WS) donne dans tous les cas les valeurs suivantes :

- une courbe $V_{Hg} = f(P_{rHg})$ et une courbe $V_{Hg} = f(R_{accès})$ avec l'histogramme de la répartition des tailles de pores correspondant ;
- la porosité totale accessible au mercure sous pression jusqu'à 2000 bars ;
- la surface spécifique.

Il faut garder à l'esprit que ces valeurs ne sont que des estimations, le mercure étant un fluide non mouillant dont la molécule est grosse, les pores de très petites dimensions ne sont pas pris en compte lors de cette mesure. Ceci peut entraîner une grande différence entre l'estimation et la valeur réelle, mais dans le cas de la pierre jaune, les très petits pores ne représentant qu'un très faible volume du volume poreux total, ces estimations pourront toutefois être considérées comme relativement proches de la porosité totale.

De plus, il est possible de calculer ou de déterminer graphiquement pour chaque cas les valeurs suivantes :

- seuil d'accès au pore R_{seuil} ;
- la porosité piégée (volume de mercure restant dans le réseau poreux après diminution de la pression exercée) qui dépend fortement du rapport des dimensions pore/accès au pore ;
- le rayon critique de gélivité R10 ;
- le volume de la macroporosité et de la microporosité ;

La dimension limite entre la macroporosité et la microporosité varie suivant les auteurs parce qu'elle varie suivant les techniques employées pour l'observer. Nous prendrons comme limite la valeur de 1 μm , valeur qui correspond à la limite de résolution du microscope optique. Ainsi seuls les pores de taille supérieure ou égale à 1 μm sont visibles sur une lame mince observée au microscope optique.

L'essai de porosimétrie au mercure a été réalisé suivant les indications de la norme RILEM (1978 – essai n°I-5).

2. RESULTATS

Légende des tableaux :

Nb. Ech.	= nombre d'échantillons étudiés pour chaque faciès
PoHg (%)	= porosité totale mesurée par injection de mercure
PoHg-P (%)	= porosité piégée après injection de mercure
MacroPo (%)	= macroporosité ($> 1\mu\text{m}$)
Ss (m^2/g)	= surface spécifique
Rseuil (μm)	= rayon d'accès au pore correspondant à une valeur de pénétration seuil
Distribution	= répartition des rayons d'accès aux pores [1 = unimodale ; 2 = bimodale ; 3 = trimodale ; 1 à 2 = unimodale dominant à tendance bimodale ; 1 à 3 = unimodale dominant à tendance trimodale ; 2 à 3 = bimodale dominant à tendance trimodale ; fbl disp. = faiblement dispersée]
R10	= rayon critique de gélivité (pierre gélive si $R10 < 1\mu\text{m}$) (si les échantillons sont susceptibles d'être gélifs, R10 est en gras)

Chaque bloc continu de couleur verte ou blanche correspond à un faciès

2.1. Félix C., 1997 (rapport 2/97/ECL)

Bloc	Nb éch.	PoHg (%)	PoHg-P (%)	MacroPo (%)	Ss (m ² /g)	Rseuil (µm)	Distribution	R10 (µm)
PJ NE 01	5	11.8	67.4	32.4	1.82	0.25	1 – fbl disp.	2.10
PJ NE 02	4	10.25	70.4	9.4	1.84	0.19	1 – fbl disp.	0.99
PJ NE 03	5	12.9	70.0	19.2	2.07	0.25	1 – fbl disp.	1.28
PJ NE 04	4	14.3	77.4	32.0	2.41	0.25	1 – fbl disp.	2.00
PJ NE 05	3	15.1	72.1	34.7	2.63	0.26	1 – étalée	2.10
PJ NE 06	3	16.6	74.7	36.7	2.79	0.43	1 – fbl disp.	2.17
PJ NE 07	12	15.5	74.5	26.8	2.33	0.47	1 – fbl disp.	4.01
PJ NE 09	3	14.5	74.2	48.0	2.49	0.47	1 – très étalée	4.57
PJ NE 10	1	15.6	83.0	62.7	2.30	0.90	1 – fbl disp.	3.60
PJ NE 11	4	8.1	73.6	6.45	1.40	0.17	1 – fbl disp.	0.60
PJ NE 12	1	11.7	79.8	47.6	2.00	0.50	1 – fbl disp.	2.10
PJ NE 13	1	12.2	74.8	46.3	2.10	0.40	1 – fbl disp.	2.00
PJ NE 14	1	11.0	83.8	52.6	1.80	0.41	1 – étalée	4.00
PJ NE 15	1	16.9	71.8	61.3	2.75	0.30	1 à 2 - étalée	8.20
PJ NE 16	3	13.1	77.1	54.7	2.07	0.46	1 – étalée	4.60
PJ NE 17	3	13.9	80.1	58.6	2.13	0.71	1 – fbl disp.	4.40
PJ NE 18	7	16.3	68.1	50.2	2.56	0.99	1 – étalée	4.61
PJ NE 19	3	23.0	67.2	46.7	3.8	0.10/1.07	1 à 2 - étalée	2.5
PJ NE 20	3	16.1	71.6	56.0	2.47	0.78	1 – étalée	4.57
PJ NE 21	3	14.9	73.1	44.2	2.37	0.37	1 – fbl disp.	2.1
PJ NE 22	5	15.8	68.4	49.7	2.32	0.65	1 – fbl disp.	2.84
PJ NE 23	6	11.0	73.0	19.4	1.86	0.45	1 – fbl disp.	1.16
PJ NE 24	3	14.9	78.0	61.2	2.19	0.58	1 – étalée	5.67
Moyenne	--	14.2	74.1	41.6	2.28	0.47	--	3.14
Écart type	--	3.0	4.7	16.5	0.47	0.22	--	1.79
Minimum	--	8.1	67.2	6.5	1.40	0.17	--	0.60
Maximum	--	23.0	83.8	62.7	3.80	0.99	--	8.20
Effectif	84							
Nb faciès	24							

2.2. Echantillons prélevés sur les monuments

Bâtiment	Bloc	Pds éch. (g)	PoHg (%)	PoHg-P (%)	MacroPo (%)	Ss (m ² /g)	Rseuil (µm)	Distribution	R10 (µm)
Hôpital Pourtalès	PJ1	1.84	15.4	92.9	74.7	3.45	1.2	1 à 2 - fbl disp	10.25
	PJ3	2.07	14.4	90.3	56.9	3.55	0.29	1-fbl disp.	4.25
	NE3P	2.75	12.9	75.2	38.0	2.59	0.38	1-fbl disp.	1.7
	NE3S	3.38	14	97.9	46.4	2.92	0.5	1-étalé	2.2
Maison Wavre	NE5S	3.69	10.9	59.6	0.9	2.15	0.13	1-fbl disp.	0.18
	NE7P	2.97	11.71	51.2	4.3	2.68	0.2	1 à 3 – étalée	0.48
	NE7S	2.81	12.02	88.2	3.3	2.64	0.07	1-fbl disp.	0.21
	NE8P	2.22	18.5	75.1	25.9	4.01	0.33	1 à 3 - étalée	1.5
	NE8S	3.73	12.1	77.7	0.0	2.28	0.34	1 à 2- étalée	0.4
6, Dupeyrou	PJ9	2.09	14.3	83.2	23.1	4.03	0.23	1-fbl disp.	1.3
	NE9S	3.27	14.4	91.0	1.4	2.17	0.7	1-fbl disp.	0.72
4, Dupeyrou	PJ10-2F	1.87	11.7	79.5	12.0	3.34	0.3	1-fbl disp.	1
	PJ10-2G	2.04	11	86.4	23.6	2.82	0.4	1-fbl disp.	1.6
Portail Collégiale	PJ11-2	1.75	10.5	82.9	39.0	2.96	0.23	1 - très étalé	4
	PJ13	0.73	17.86	96.4	26.9	5.03	0.55	1 - très étalé	11
	NE13P	2.36	8.37	76.0	4.1	1.57	0.054	1 à 2 disp.	12
	NE13S	3.51	8.59	72.8	52.6	1.5	0.23	2 à 3 - fbl disp	0.38
	NE12P	2.52	16.7	0.0	25.1	3.2	0.4	1-étalé	1.4
	NE12S	3.51	12.1	88.5	5.8	2.08	0.2	1 à 2 -fbl disp.	0.21
Tour Prison	PJ14	2.81	5.1	51.0	2.0	1.51	0.02	1 - fbl disp	0.1
	PJ16	2.5	4.4	56.8	4.5	1.36	0.01	1 à 2 - fbl disp	0.41
MHN sous fenêtre	NE17P	2.7	24	79.6	42.5	4.6	0.9	1 à 2 - étalée	3
	NE17S	2.86	13.41	99.6	4.5	2.2	0.7	1 - étalé	0.9
	NE18P	3.27	16.08	97.0	63.4	2.73	0.8	1 - étalée	3
	NE18S	3.03	14.3	65.7	1.4	2.99	0.72	2	0.72
	NE19P	2.77	18.24	74.6	43.3	3.51	0.9	1 à 2 - étalée	1.9
	NE19S	2.71	14.95	83.6	8.0	2.57	1	1 - étalée	1
	NE20P	2.66	16.27	99.9	51.0	2.99	0.4	1 - étalée	3.2
	NE20S	3.31	15.2	73.0	23.0	3.1	0.5	1 à 2 - étalée	1.1
	NE21P	3.69	17	67.1	32.4	3.29	0.38	1 étalée	2
	NE21S	3.45	12.3	82.9	1.6	1.99	0.7	1 - étalée	0.7
	NE22P	2.93	10.86		48.8	2.13	0.53	1 - fbl disp	2.1
	NE22S	3.19	15.4	83.8	26.0	3.06	0.7	2	1.1
	PJ23	0.63	18.9	67.2	48.7	5.56	0.6	1 - très étalé	10
NE23P	2.49	12.46	96.3	61.8	2.51	0.6	1 - très étalé	6	

Bâtiment	Bloc	Pds éch. (g)	PoHg (%)	PoHg-P (%)	MacroPo (%)	Ss (m ² /g)	Rseuil (µm)	Distribution	R10 (µm)
MHN sous fenêtre (suite)	NE23S	2.94	12.8	82.8	39.8	2.63	0.6	1 - très étalé	1.5
	PJ24	0.44	18.06	52.0	38.2	5.79	0.53	1 - très étalé	2.1
	NE24P	2.95	19.02	0.0	47.3	3.05	0.7	1 à 3 - étalée	2.3
	NE24S	3.54	13.9	73.4	6.5	2.52	0.5	1 à 3 - étalée	0.84
MHN cour	PJ25	0.34	20.84	41.7	26.3	6.26	0.32	3	9
	NE25P	3.5	11.7	93.2	12.0	2.13	0.21	1 - étalé	1.1
	NE25S	3.68	9.52		2.1	1.77	0.21	1- fbl disp	0.29
	PJ26	0.52	19.2	58.9	36.5	5.99	0.41	1 à 3 - étalée	10.2
	NE26P	2.34	13.08	91.0	28.3	2.43	0.4	1 à 2 - fbl disp	1.3
	NE26S	2.93	13.09	77.2	5.3	2.84	0.3	1 à 2 fbl disp.	0.9
	PJ27	0.32	25.49	53.4	23.9	0.051	0.38	Ss tend. très étal	2.1
	NE27P	3.09	14.82	79.6	25.6	3.03	0.44	1 - étalé	1.3
NE27S	3.18	12	83.3	6.7	2.05	0.4	1 - fbl disp	0.5	
Portail Rue Jeanne de Hochberg	NE28P	3.35	17.1	91.2	31.6	3.06	0.4	1 - fbl disp	1.8
	PJ29	1.49	20.62	84.4	58.7	5.28	1.4	1 - très étalé	5
	NE29P	2.64	16.85	82.5	56.4	3.39	0.9	1 - étalé	3.8
	NE29S	2.68	19.17	87.1	40.7	3.77	1	1 - étalé	1.5
	PJ30	2.15	15.44	85.5	53.8	3.72	0.4	1 - très étalé	4.5
	NE30P	2.83	12.41		38.7	2.48	0.3	1 - étalé	2.1
	NE30S	3.14	11.1	83.8	11.7	2.52	0.3	1 à 2 - étalé	1
	PJ31	1.97	13.1	78.6	36.6	3.41	0.4	1 - étalé	2.4
	NE31P	2.1	14	86.4	49.3	2.41	0.7	1 à 3 - peu dips.	10
NE31S	3.03	10.21	95.0	3.9	1.85	0.53	1 à 3 - peu dips.	0.8	
MHN Rue	NE32P	2.63	16.7	70.1	39.5	3.32	0.72	1 à 2 - peu dips.	2
	NE32S	2.77	13.84	82.4	5.8	2.69	0.9	1 à 2 - peu dips	0.9
	PJ33	1.65	16	78.1	45.6	4.29	0.4	1 à 3 - étalé	3
	NE33P	1.82	15.85	68.8	16.4	3.21	0.18	1 à 3 - étalé	1.3
	NE33S	3.64	12.23	73.6	2.2	2.39	0.28	1 à 2 - peu dips	0.31
	Moyenne	--	14.4	76.3	27.2	3.01	0.48	--	2.63
	Écart type	--	3.8	19.5	20.3	1.15	0.28	--	3.03
	Minimum	--	4.4	41.7	0.0	0.05	0.01	--	0.10
	Maximum	--	25.5	99.9	74.7	6.26	1.40	--	12.00
	Effectif				67				
	Nb faciès				20				
	Ech gélifs				19				

ANNEXE 6

OBSERVATIONS MICROSCOPIQUES : FACIES, STRUCTURES POREUSES ET MODIFICATIONS DE SURFACE

1. PRINCIPE

Le microscope polarisant est un microscope optique muni de deux filtres polarisants appelés polariseur et analyseur. Il est utilisé en pétrographie pour l'observation et l'identification des minéraux dans les roches, et utilise la lumière polarisée. On prépare pour cela une lame mince : la roche est coupée en blocs fins. Chacun d'eux est collé sur une lame de verre puis aminci par polissage jusqu'à une épaisseur de 30 micromètres.

La lumière ordinaire (naturelle ou artificielle) est une onde électromagnétique qui vibre dans toutes les directions dans un plan perpendiculaire au trajet de propagation. Lorsque cette lumière traverse un filtre particulier — filtre polarisant — elle ne vibre plus que dans une seule direction, cette lumière est appelée lumière polarisée.

Dans la plupart des minéraux, suivant la direction de polarisation, la lumière n'aura pas la même vitesse. Lorsqu'un rayon lumineux pénètre dans un cristal, il se dédouble en deux rayons de polarisation différente qui se propagent avec une vitesse différente, c'est la biréfringence. Le filtre analyseur placé après l'échantillon sélectionne à nouveau les rayons lumineux selon leur polarisation, ainsi, selon la quantité dont a tourné la polarisation (donc selon la nature des cristaux), ceux-ci apparaissent plus ou moins lumineux, voire de couleurs différentes.

Le microscope polarisant permet également d'analyser la disposition des minéraux entre eux et donc d'avoir une visualisation des structures de porosité de la roche

2. RESULTATS

Dans le cas présent, le microscope polarisant a été employé pour identifier les phases minérales présentes dans la pierre jaune, pour identifier les éléments figurés, les phases de liaisons, les structures de porosité et pour mettre en évidence - lorsque c'était possible – des modifications de structures superficielles induites par l'exposition des pierres sur les constructions.

Seules les observations faites pour les échantillons prélevés sur les bâtiments sont exposées ci-après.

LNA = observation en lumière polarisée non analysée

LPA = observation en lumière polarisée et analysée

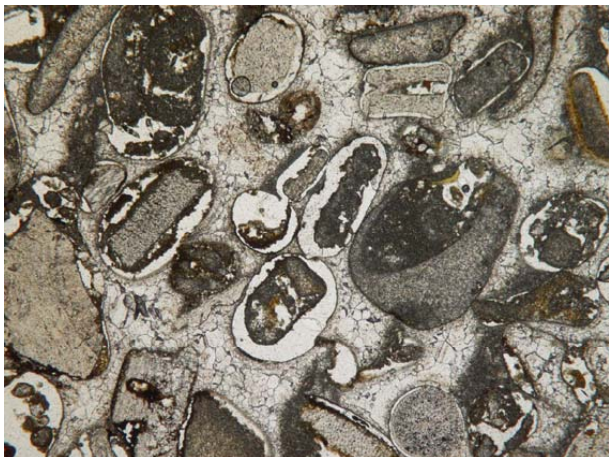
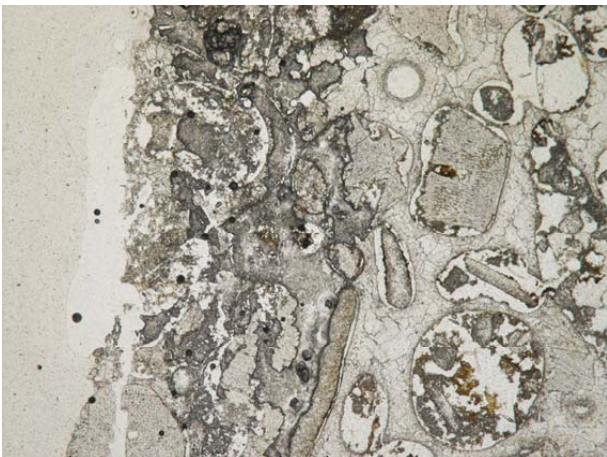
Echelle : toutes les images ayant été prises au même grossissement, l'échelle est la même pour toute, soit environ 4 mm pour la longueur.

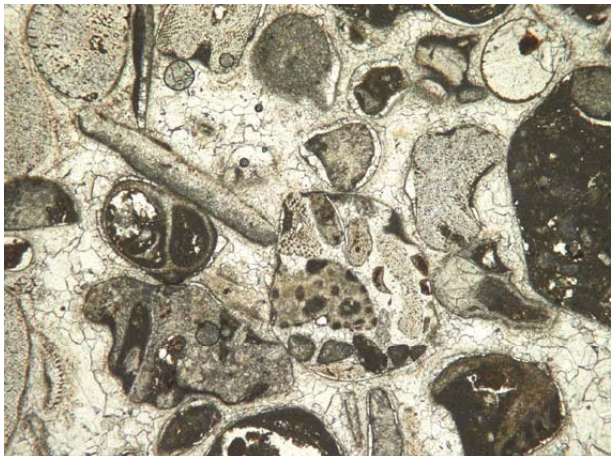
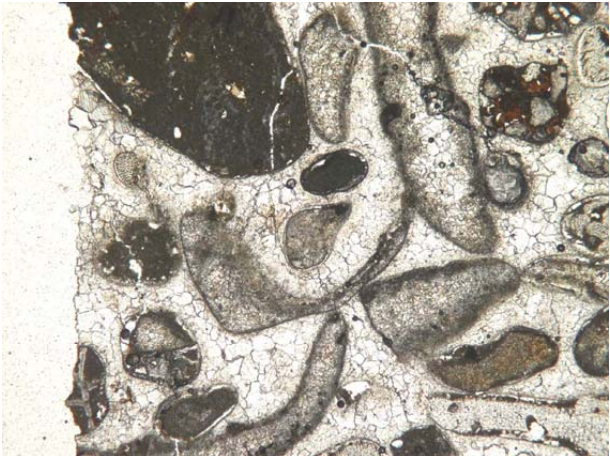
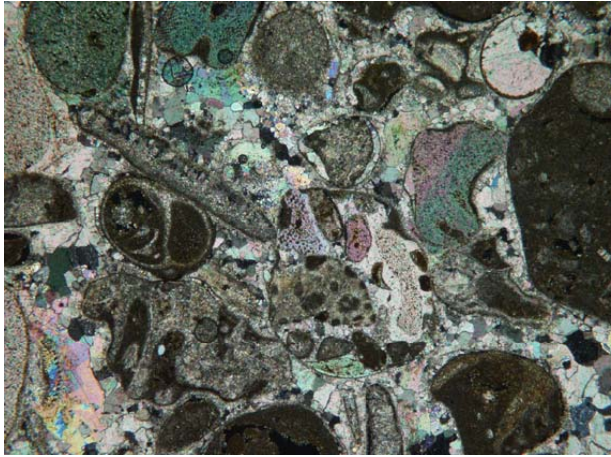
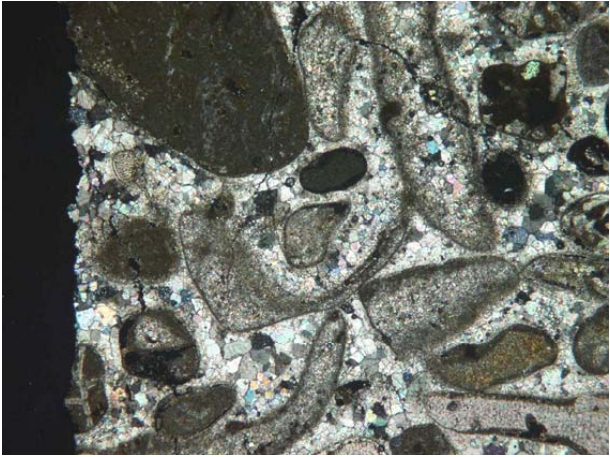
N.B. : Les carottes ne10, ne11, ne 14 et ne16 étant cassées, aucune lame mince n'a pu être préparée à partir de ces échantillons

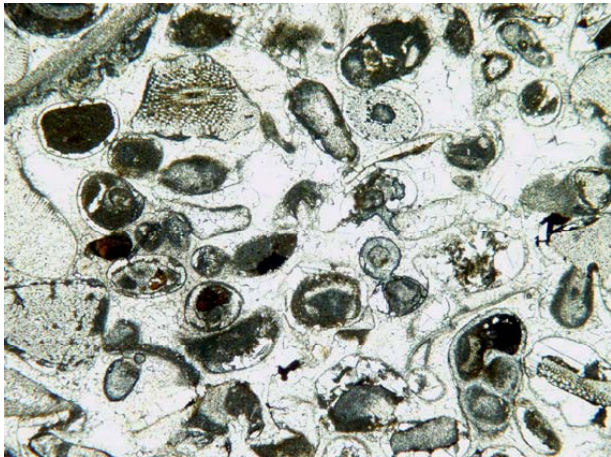
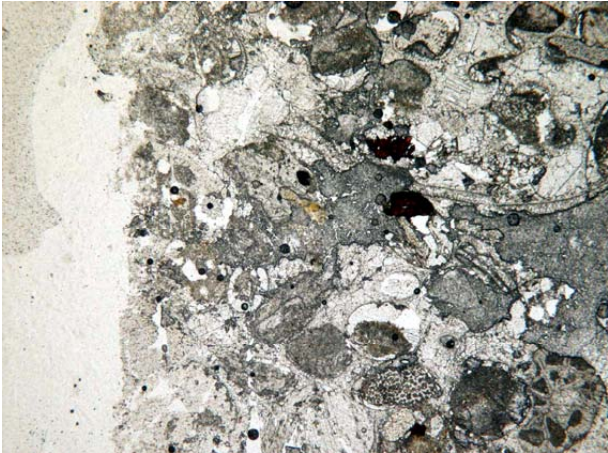
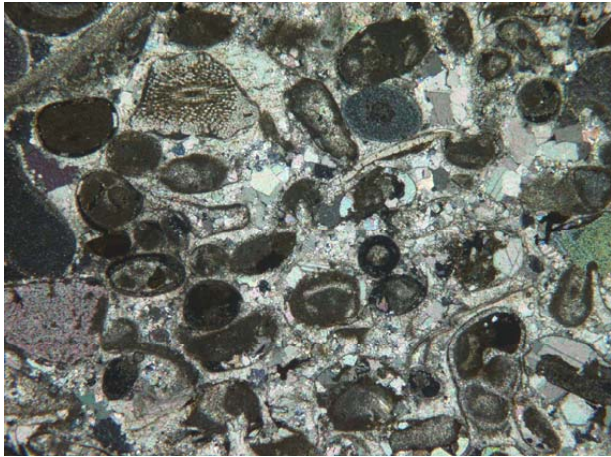
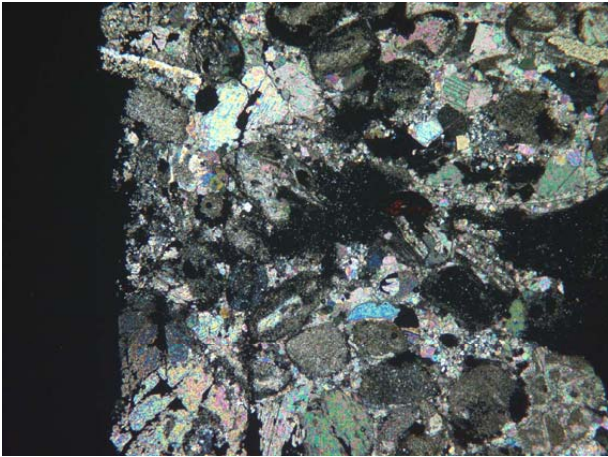
Bâtiment	Eprouvette	Nature des élémnts fig.	Dimensions des élémnts fig.
Hôpital Pourtalès	ne 1	oolitique	moyen
	ne 2	oolitique ET bioclastique	moyen à grossier
	ne 3	oolitique	fin
	ne 4	oolitique A bioclastique	moyen à grossier
Maison Wavre	ne 5	oolitique A bioclastique	moyen
	ne 6	bioclastique	très grossier
	ne 7	oolitique	fin
	ne 8	oolitique A bioclastique	moyen à grossier
6, Dupeyrou	ne 9	bioclastique	moyen à grossier
Portail Collégiale	ne 12	oolitique A bioclastique	moyen
	ne 13	oolitique A bioclastique	moyen
Tour Prison	ne 15	oolitique	fin à moyen
MHN sous fenêtre	ne 17	oolitique	fin à moyen
	ne 18	oolitique ET bioclastique	moyen
	ne 19	oolitique	fin
	ne 20	oolitique ET bioclastique	moyen
	ne 21	oolitique	moyen
	ne 22	oolitique ET bioclastique	moyen à grossier
	ne 23	oolitique ET bioclastique	moyen à grossier
	ne 24	oolitique ET bioclastique	moyen à grossier
MHN cour	ne 25	bioclastique	moyen
	ne 26	oolitique A bioclastique	moyen à grossier
	ne 27	oolitique	moyen
Portail Rue Jeanne de Hochberg	ne 28	bioclastique	fin à moyen
	ne 29	oolitique ET bioclastique	fin à moyen
	ne 30	oolitique ET bioclastique	moyen à grossier
	ne 31	bioclastique	très grossier
MHN Rue	ne 32	oolitique ET bioclastique	moyen à grossier
	ne 33	oolitique ET bioclastique	moyen à grossier

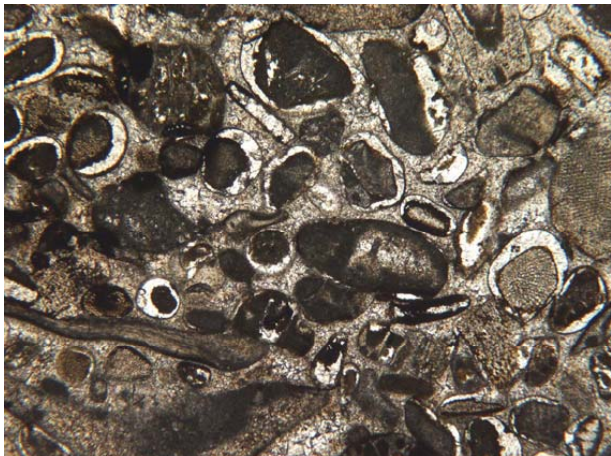
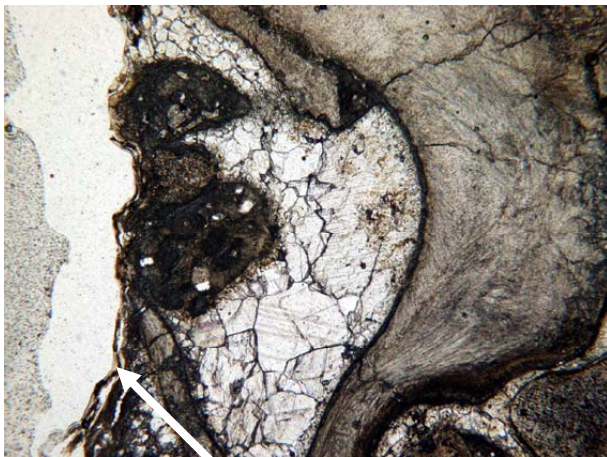
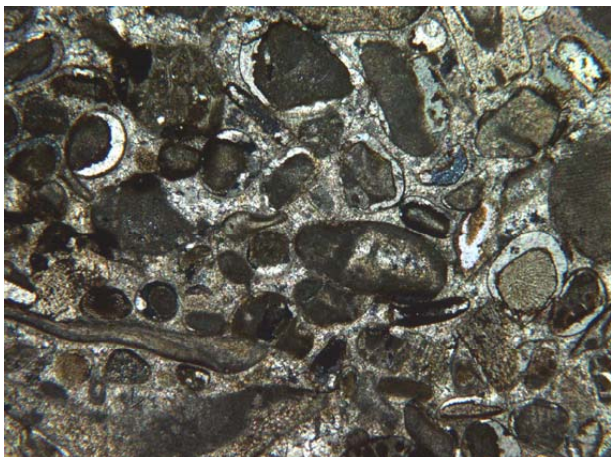
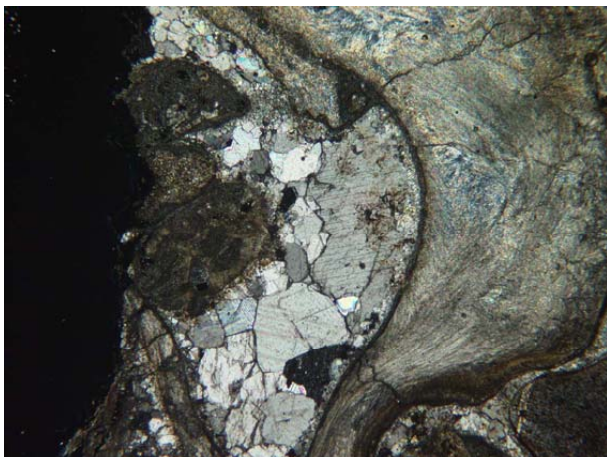
Tableau A6-1. Tableau résumant la nature des faciès observés, suivant qu'il sont :

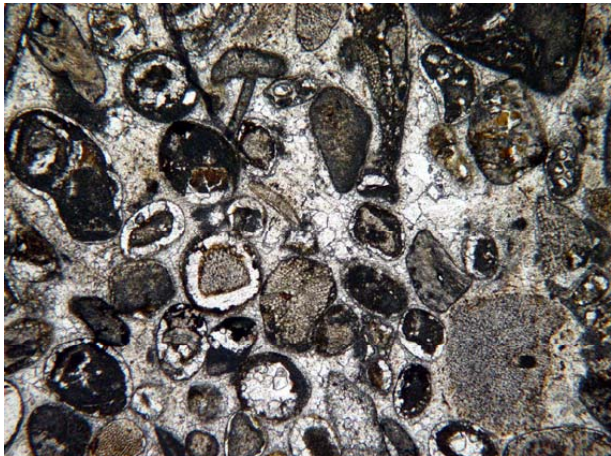
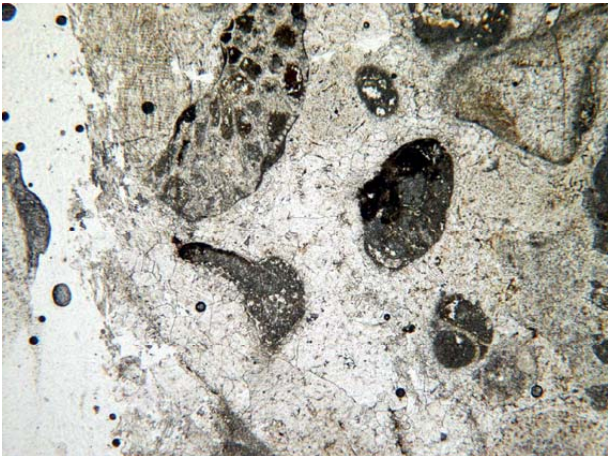
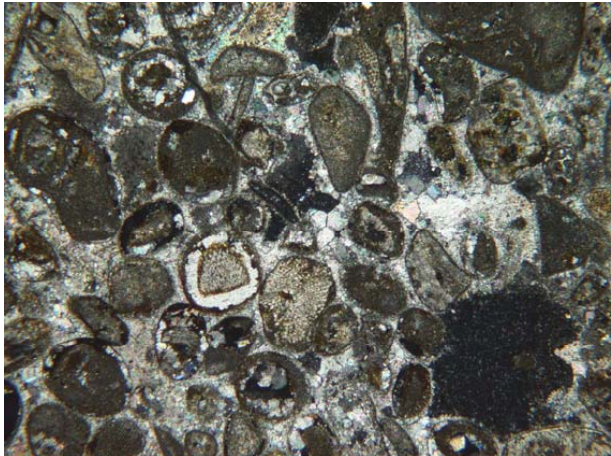
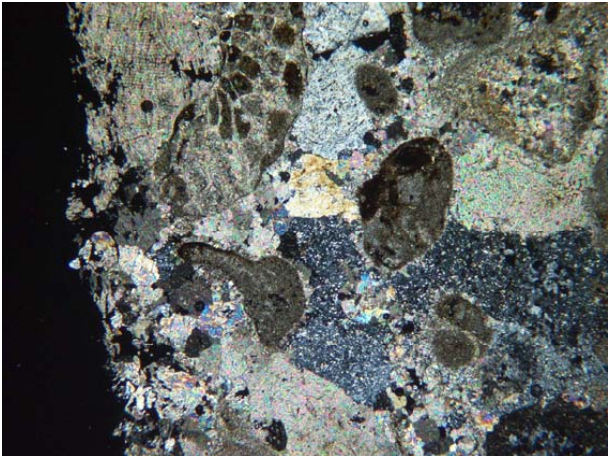
- oolitiques : la majorité de leurs éléments figurés sont des oolites ;
- bioclastiques : la majorité de leurs éléments figurés sont des bioclastes ;
- oolitiques ET bioclastiques : les éléments figurés de leur lamines sont des oolites et des bioclastes en quantité quasi égale ;
- oolitiques A bioclastiques : la majorité de leurs éléments figurés sont des oolites dans certaines lamines, tandis que ce sont des bioclastes dans des lamines voisines

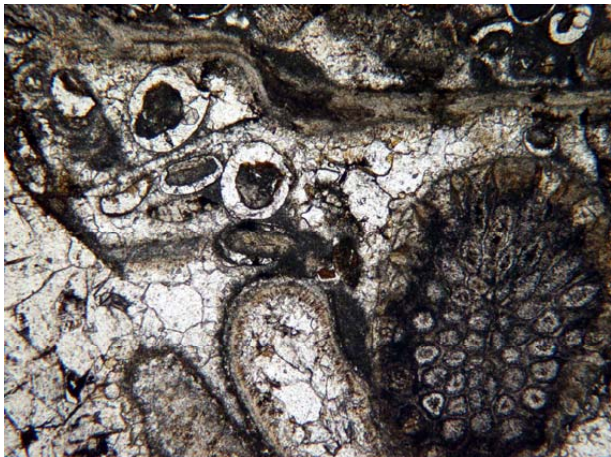
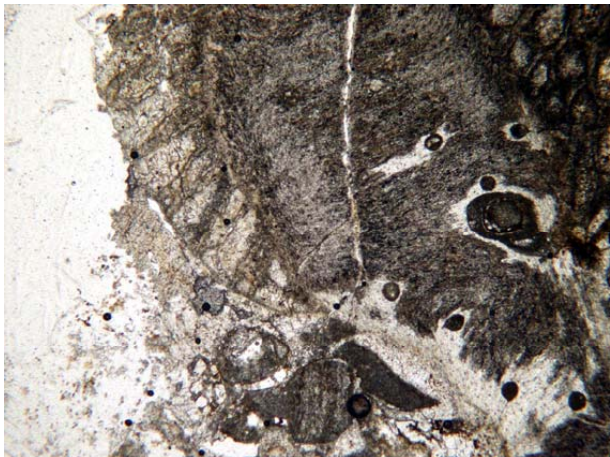
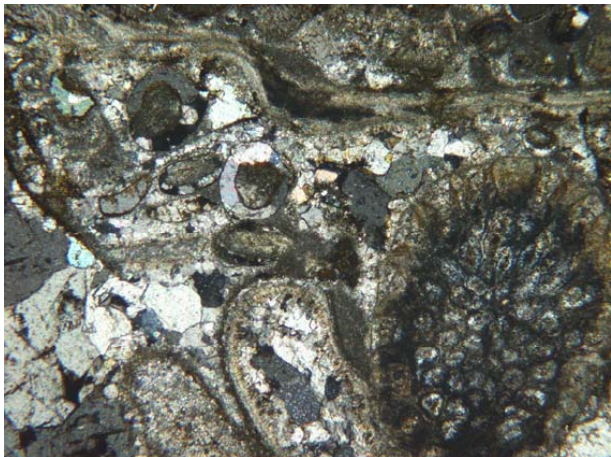
Carotte ne-1	Litage // à la surface	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		 <p>structure de la surface externe modifiée sur 1 à 1.5 mm</p>
Observation en LPA	Photo non disponible	Photo non disponible

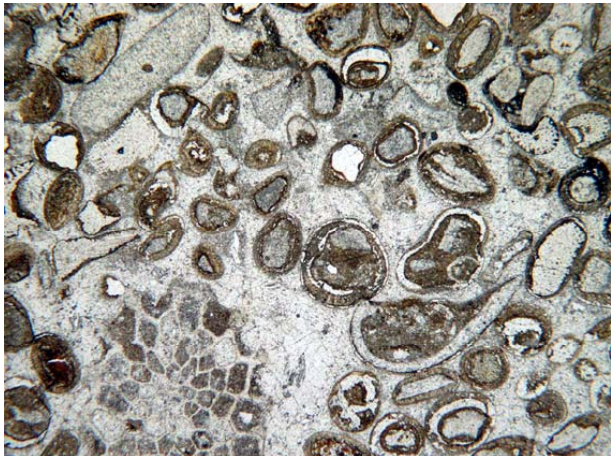
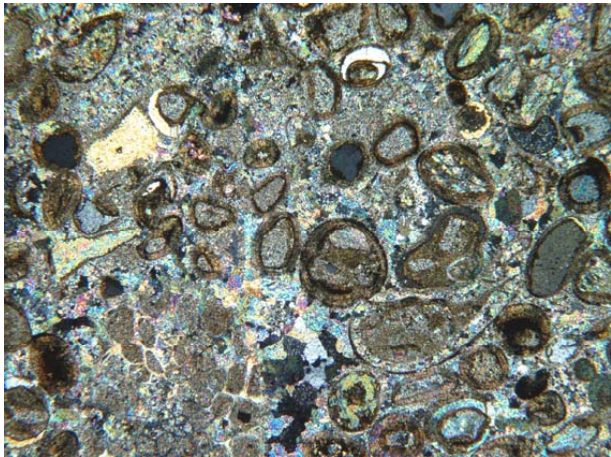
Carotte ne-2	Litage non net	
	Intérieur	Surface
<p>Observation en LNA</p>		 <p>modification de surface non visible (croûte tombée)</p>
<p>Observation en LPA</p>		

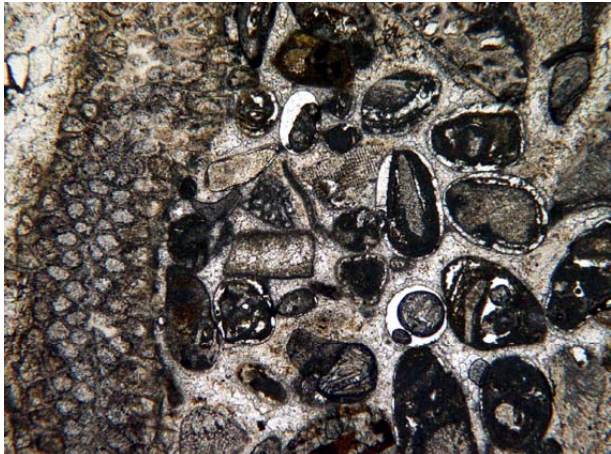
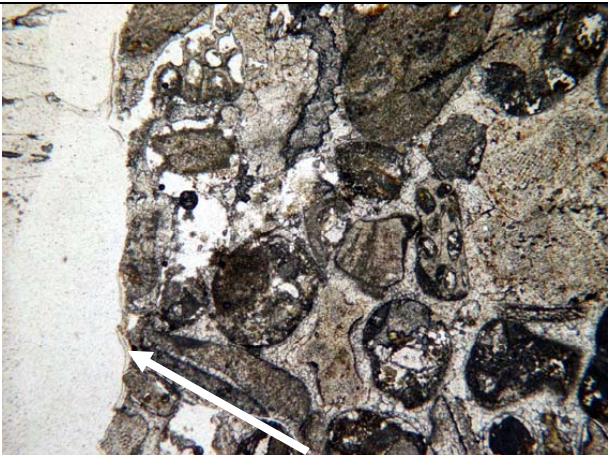
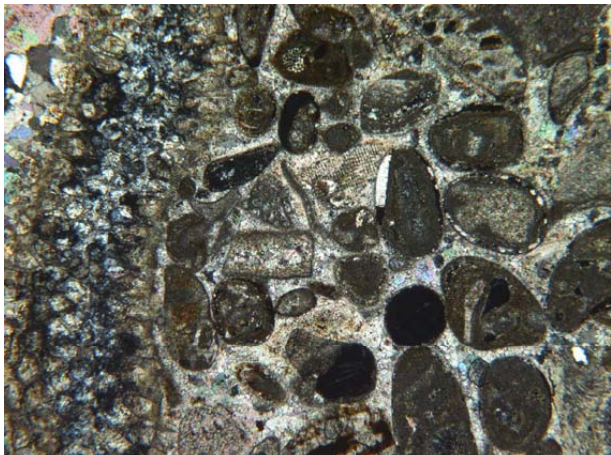
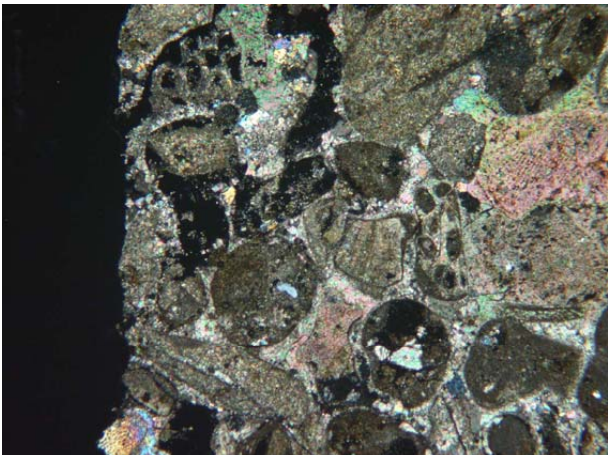
Carotte ne-3	Litage \perp à la surface	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		 <p>mauvaise fabrication de lame! => modification non visible</p>
Observation en LPA		

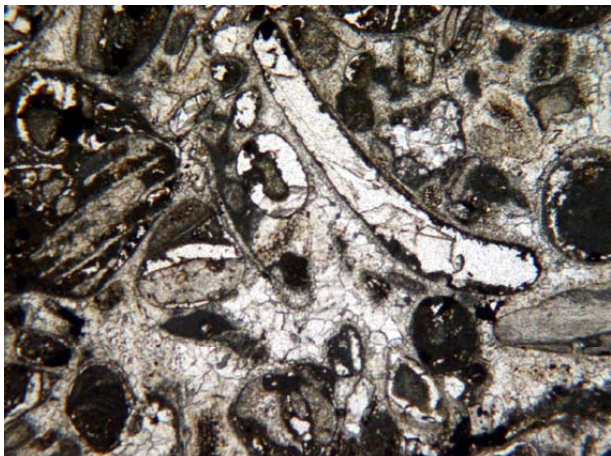
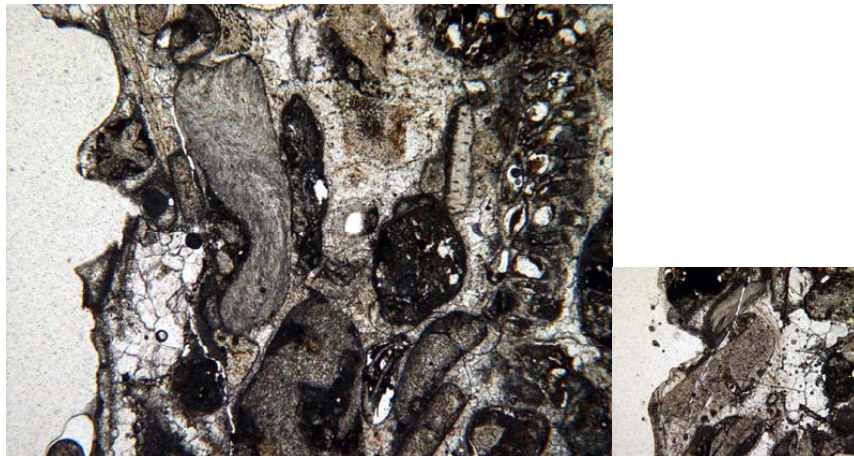
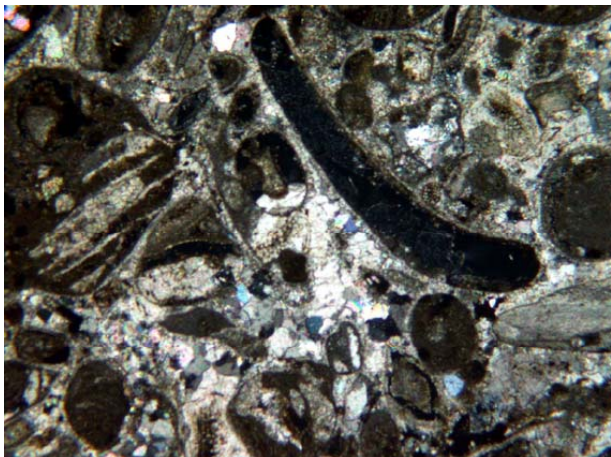
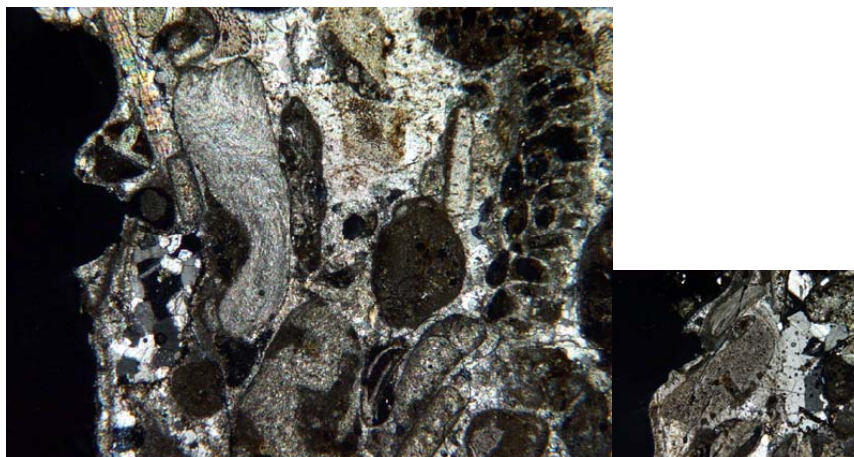
Carotte ne-4	Litage \perp à la surface	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		 <p>croûte très fine, pierre sous-jacente non modifiée</p>
Observation en LPA		

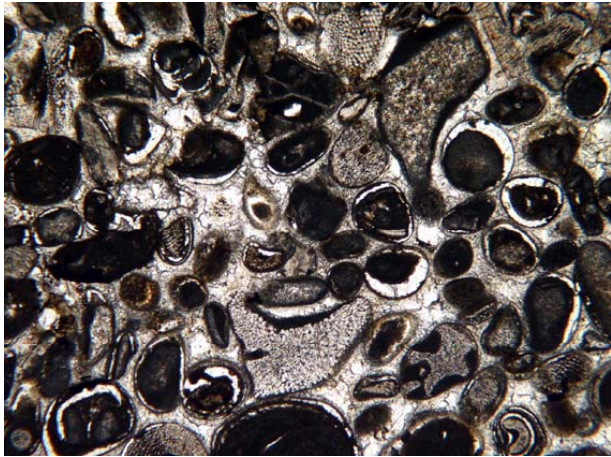
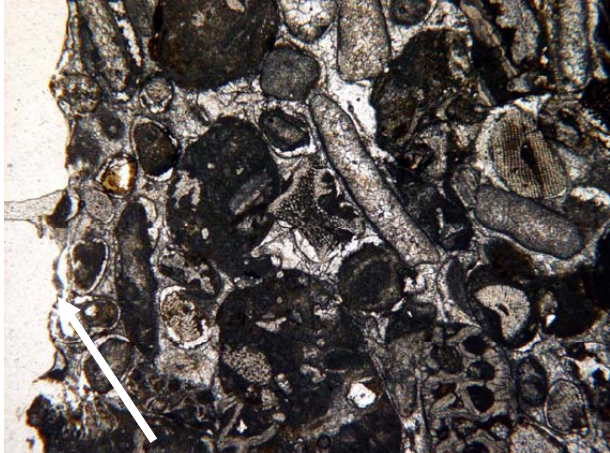
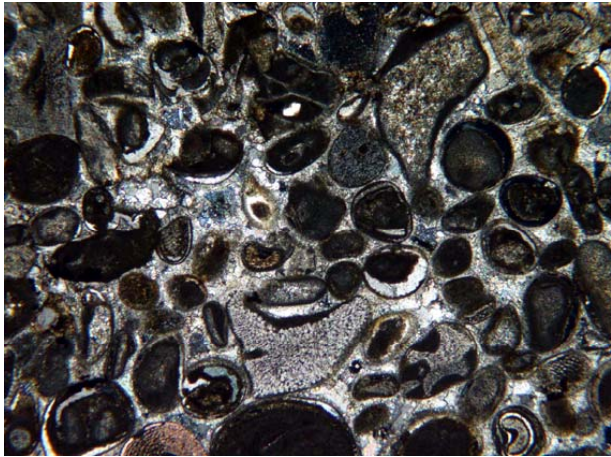
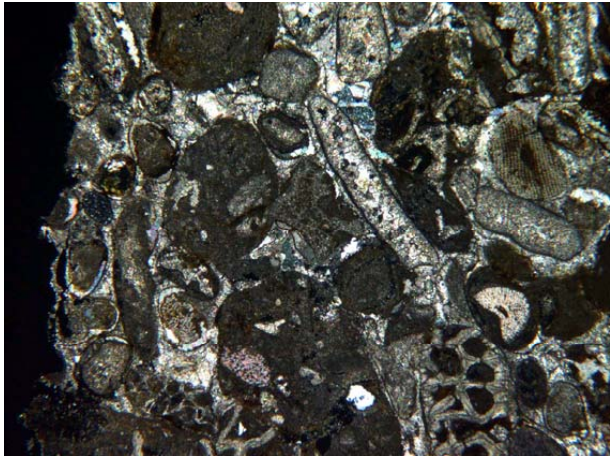
Carotte ne-5	Litage // à la surface	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		 <p data-bbox="1211 738 2033 770">mauvaise fabrication de lame ! => modification non visible</p>
Observation en LPA		

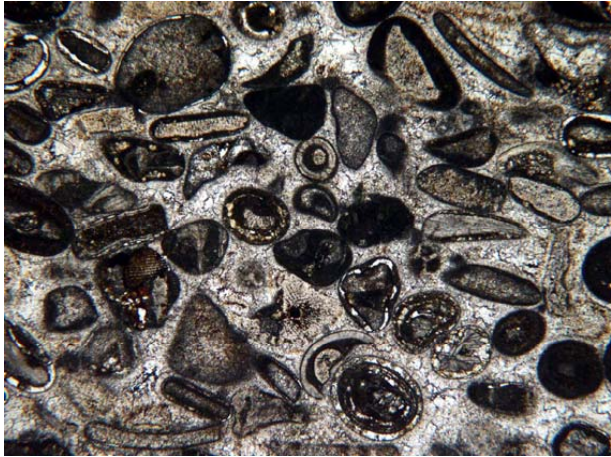
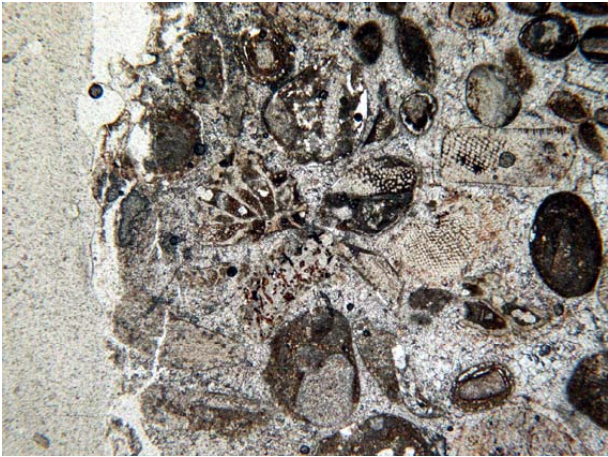
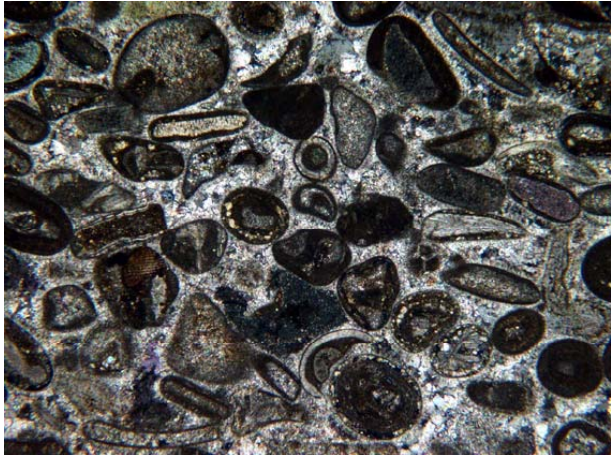
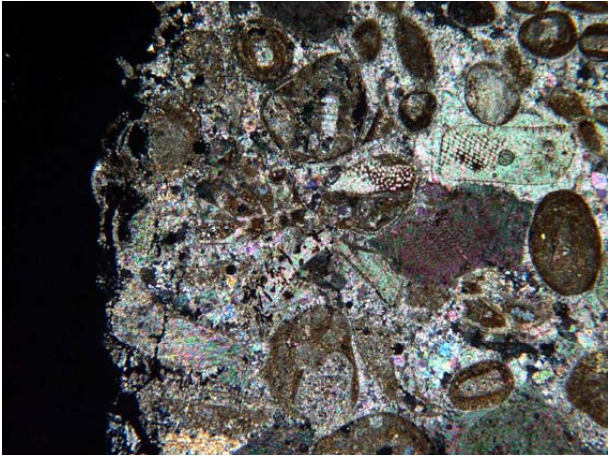
Carotte ne-6	Litage // à la surface	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		 <p>mauvaise fabrication de lame ! => modification non visible</p>
Observation en LPA		<p>Photo non disponible</p>

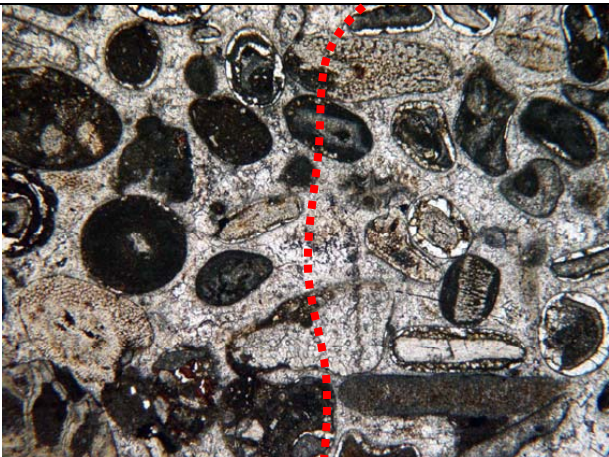
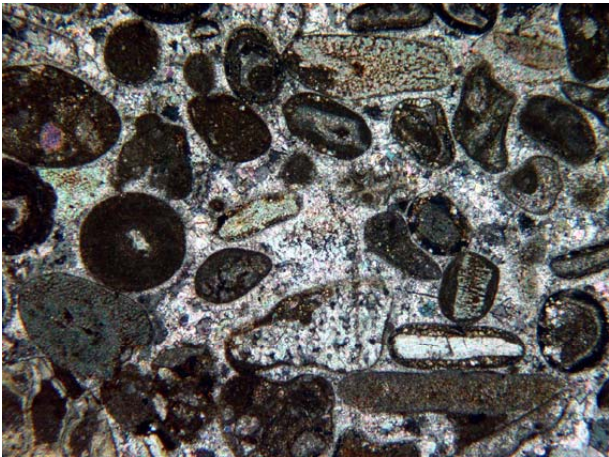
Carotte ne-7	Litage non net	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		Photo non disponible
Observation en LPA		Photo non disponible

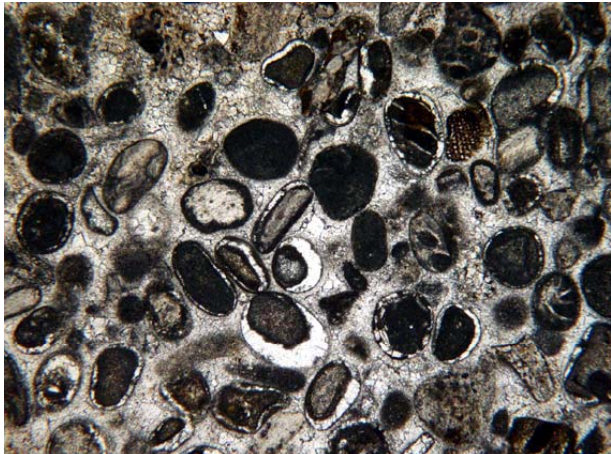

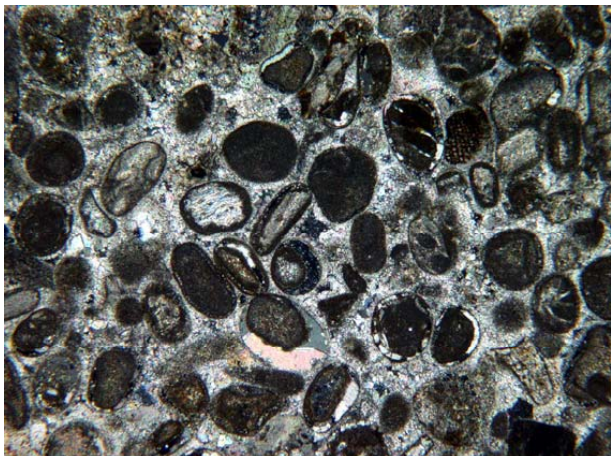
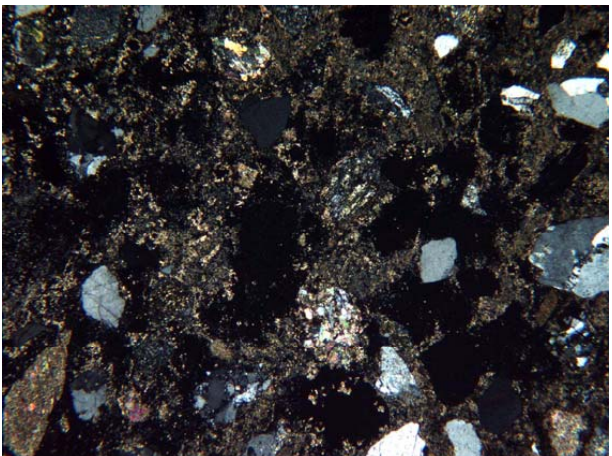
Carotte ne-8	Litage // à la surface	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		 <p>patine très fine, brunâtre</p>
Observation en LPA		

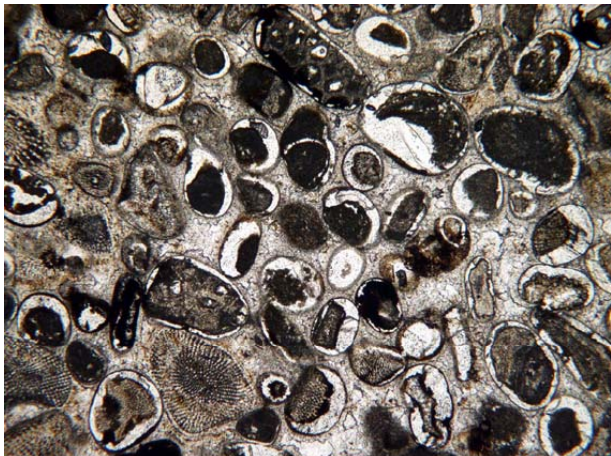
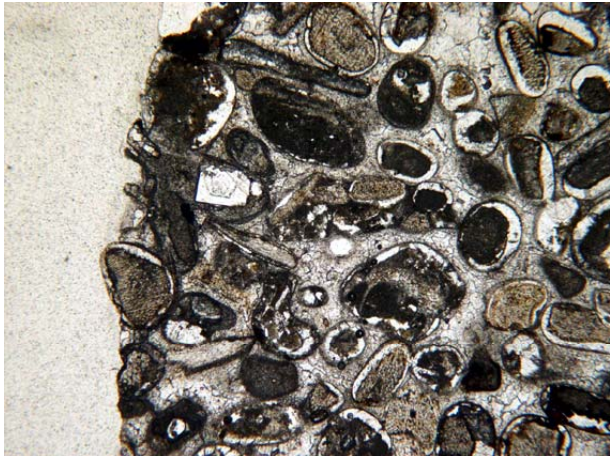
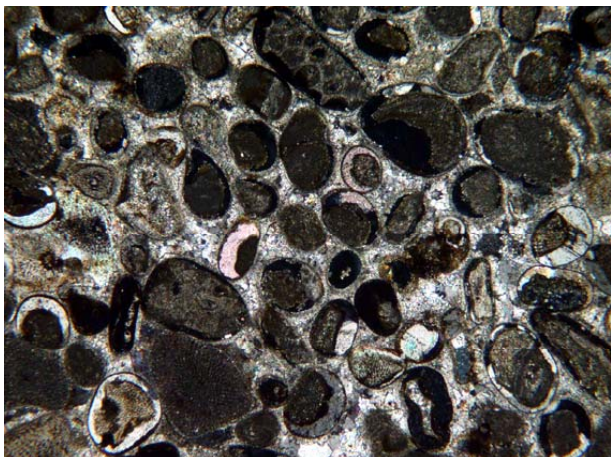
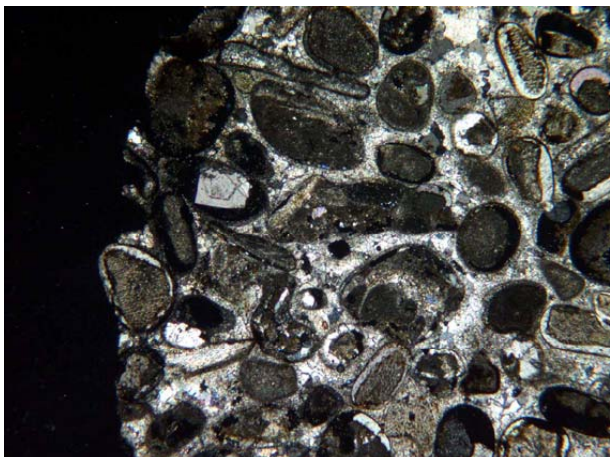
Carotte ne-9	Litage // à la surface	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		 <p>pierre non modifiée en profondeur, surface très rugueuse</p>
Observation en LPA		


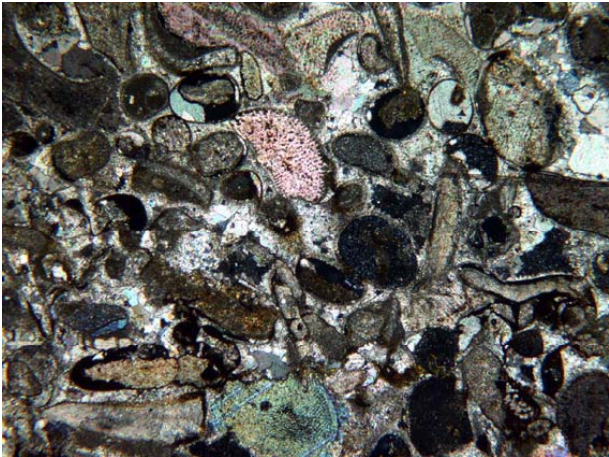
Carotte ne-12	Litage // à la surface	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		 <p>patine très fine, noirâtre</p>
Observation en LPA		

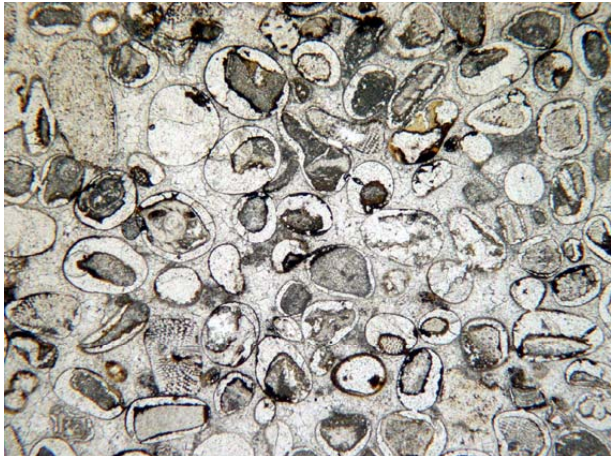
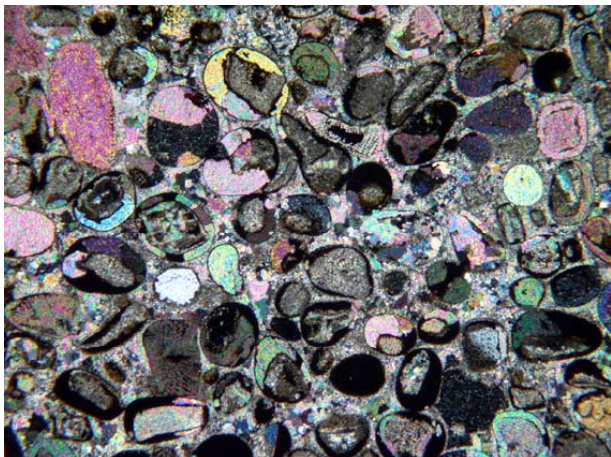
Carotte ne-13 Rubéfiée	Litage \perp à la surface	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		 <p data-bbox="1249 759 1995 794">mauvaise fabrication de lame ! => patine non visible</p>
Observation en LPA		

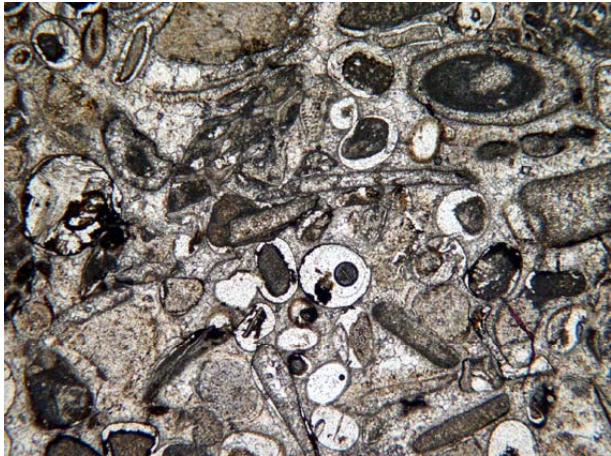
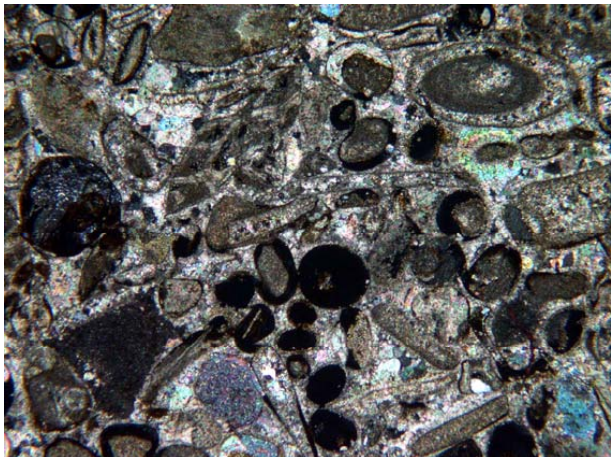
<p>Carotte ne-13 Transition de rubéfaction</p>	<p>Intérieur</p>	<p>Surface</p>
<p>Observation en LNA</p>	 <p>pierre rubéfiée non rubéfiée</p>	
<p>Observation en LPA</p>		

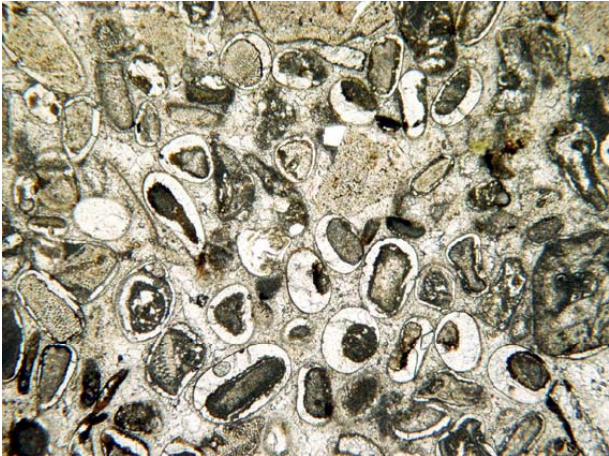
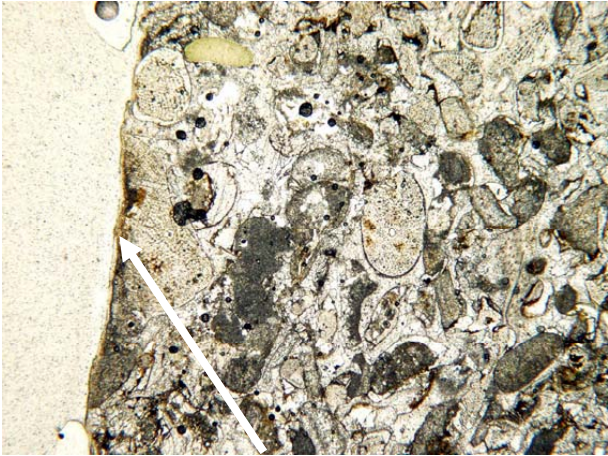
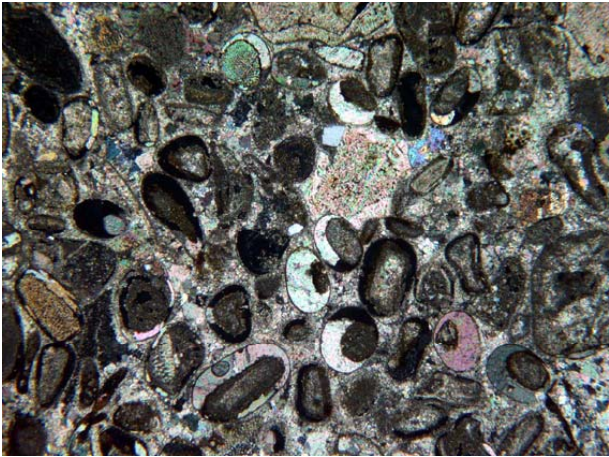
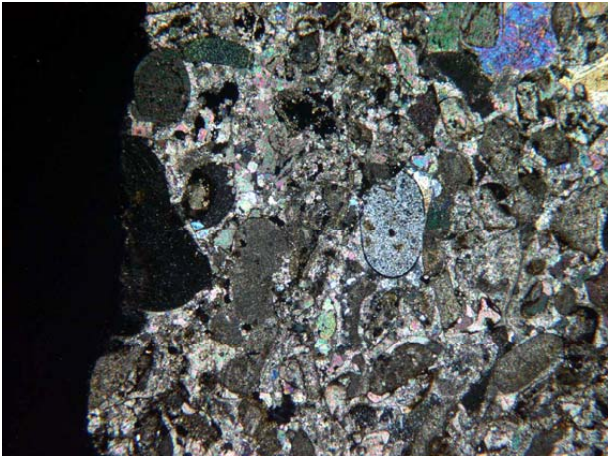
Carotte ne-15	Litage non net	
	Intérieur	Mortier de surface (photos de surface non disponible)
Observation en LNA		
Observation en LPA		

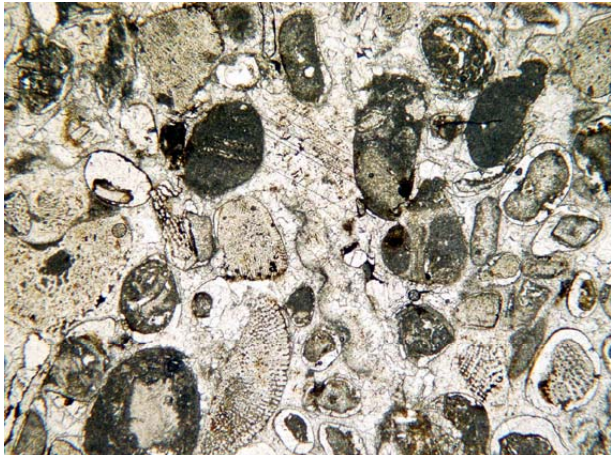

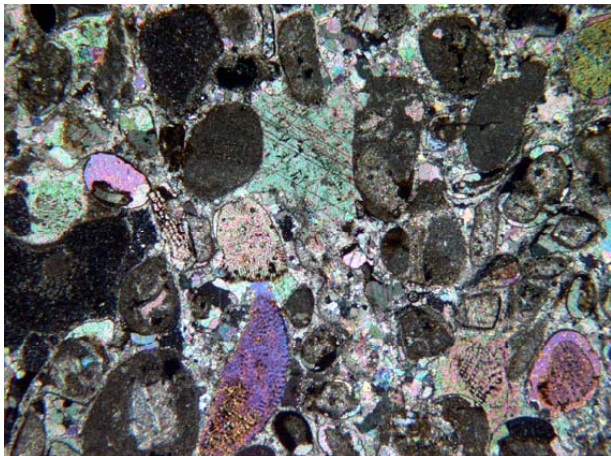
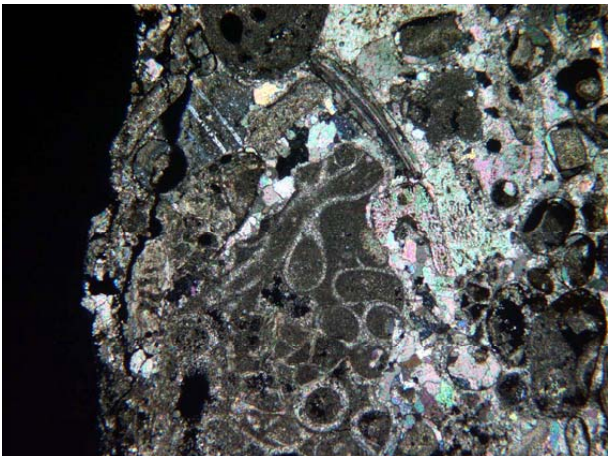
Carotte ne-17	Litage oblique par rapport à la surface	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		 <p data-bbox="1310 746 1930 778">mise à nue des éléments figurés de surface</p>
Observation en LPA		


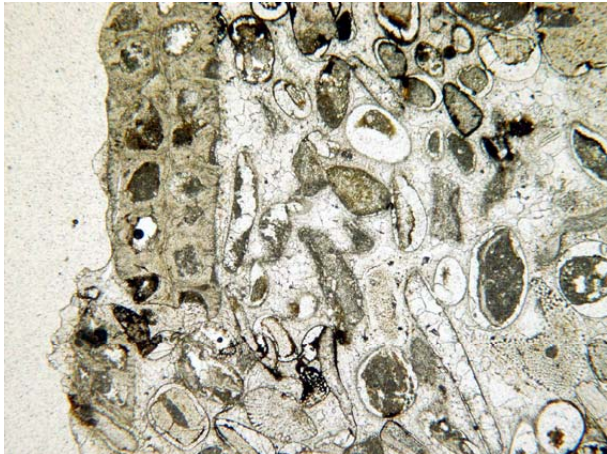
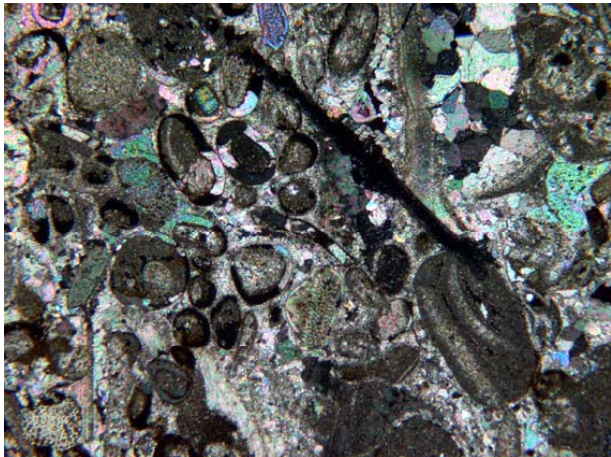
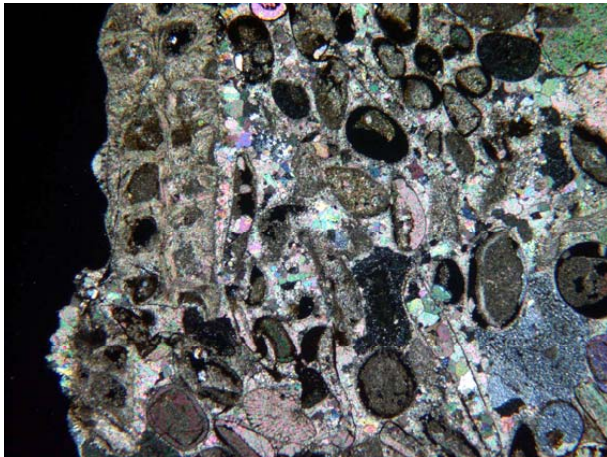
Carotte ne-18	Litage \perp à la surface	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		Photos non disponibles
Observation en LPA		

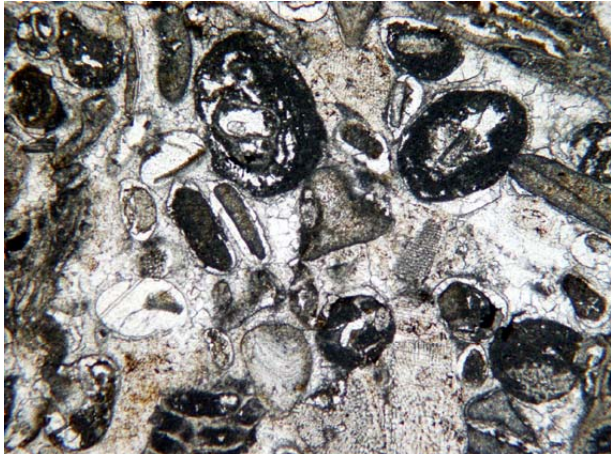
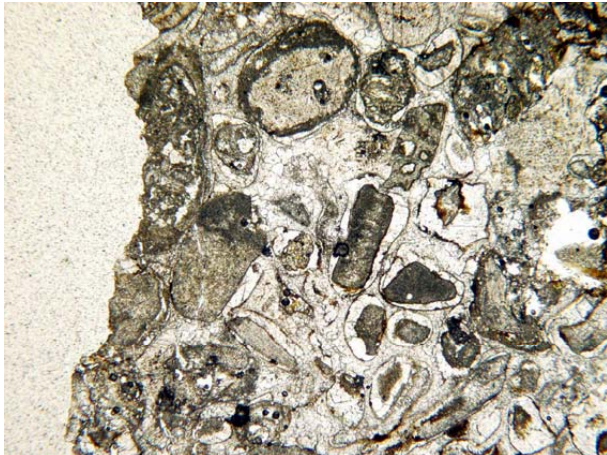
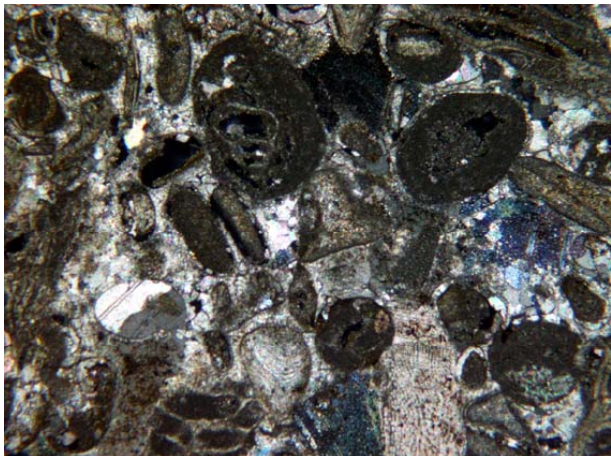
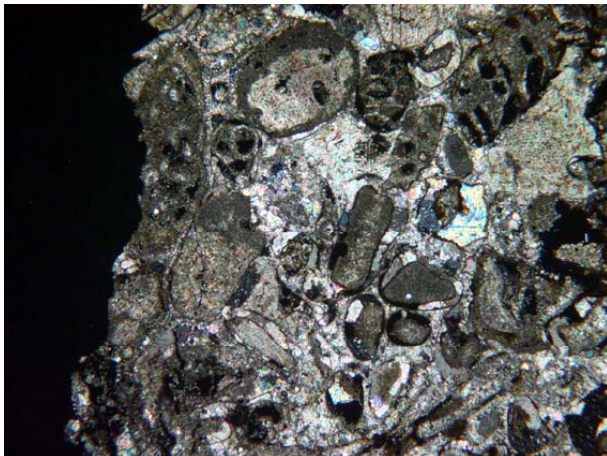
Carotte ne-19	Litage non net	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		Photos non disponibles
Observation en LPA		

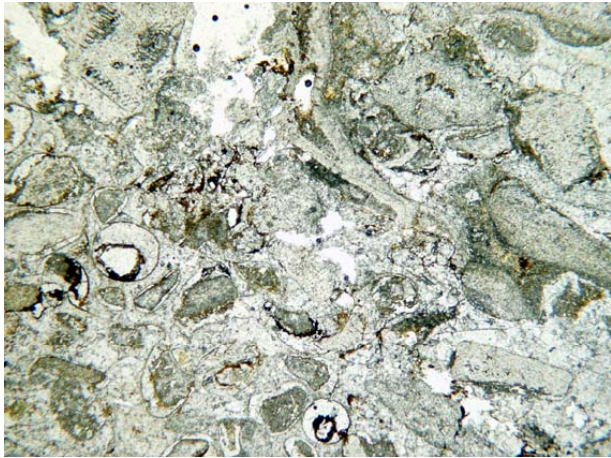
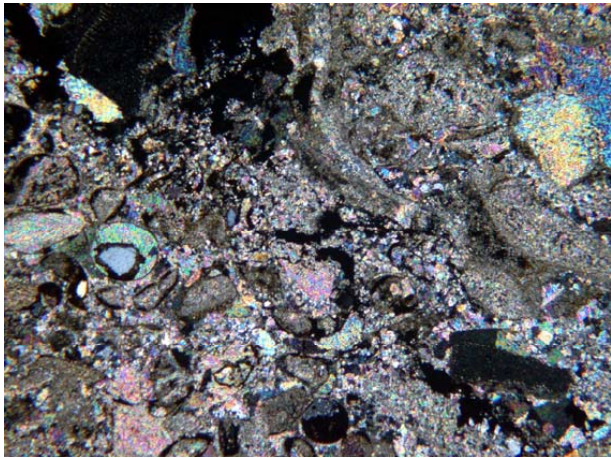
Carotte ne-20	Litage \perp à la surface	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		Photos non disponibles
Observation en LPA		

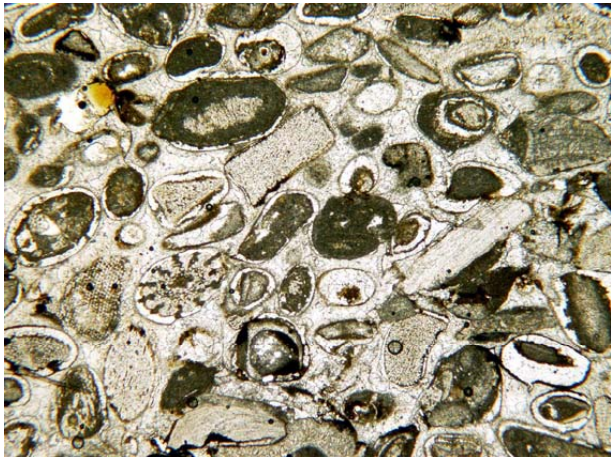
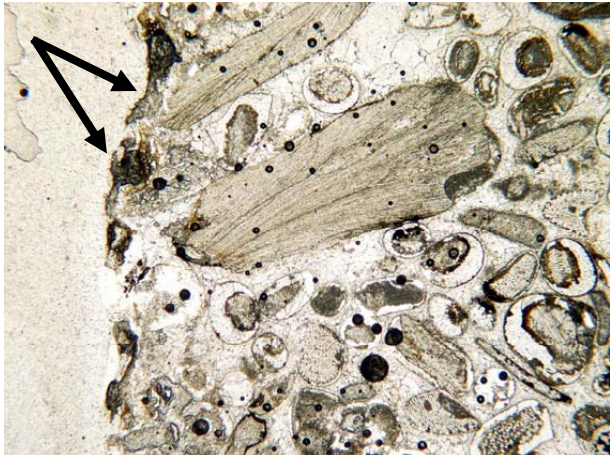
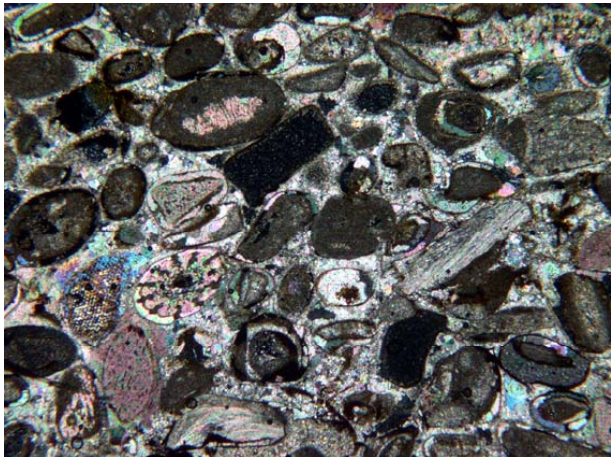
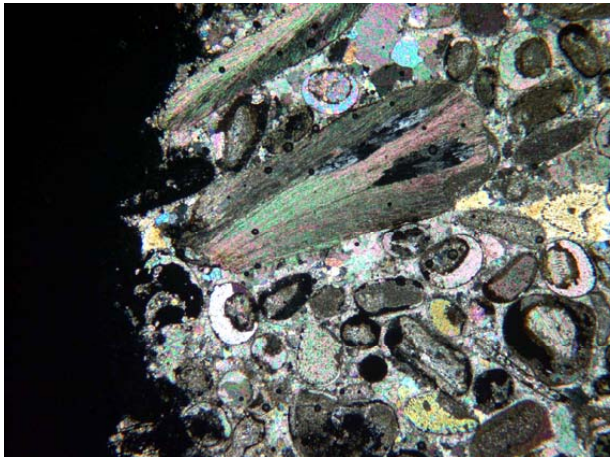
Carotte ne-21	Litage // à la surface	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		 <p>très fine patine brunâtre épousant parfaitement la pierre sous-jacente</p>
Observation en LPA		

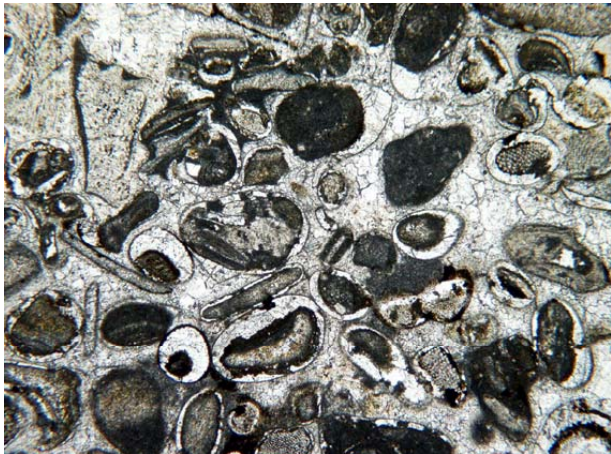
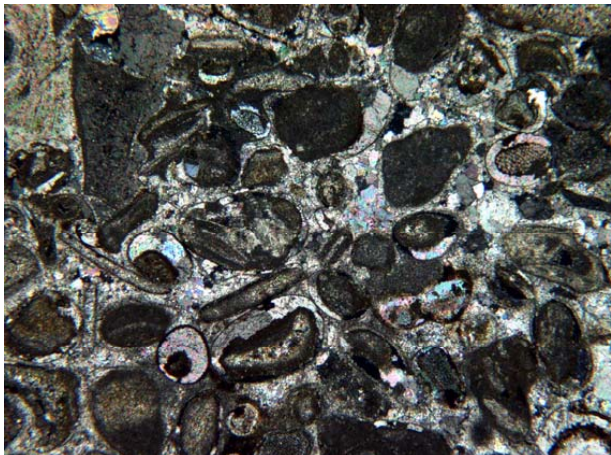
Carotte ne-22	Litage // à la surface	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		 <p>très fine patine brunâtre épousant parfaitement la pierre sous-jacente</p>
Observation en LPA		

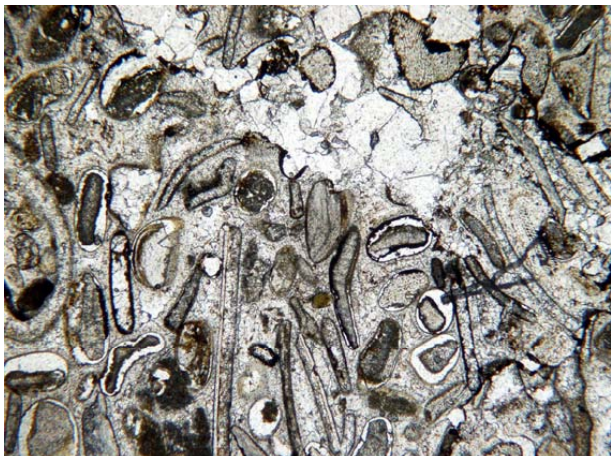
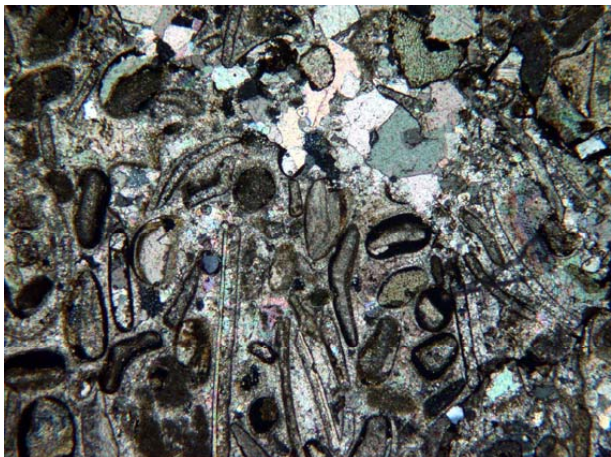
Carotte ne-23	Litage // à la surface	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		 <p>modification de surface non visible</p>
Observation en LPA		

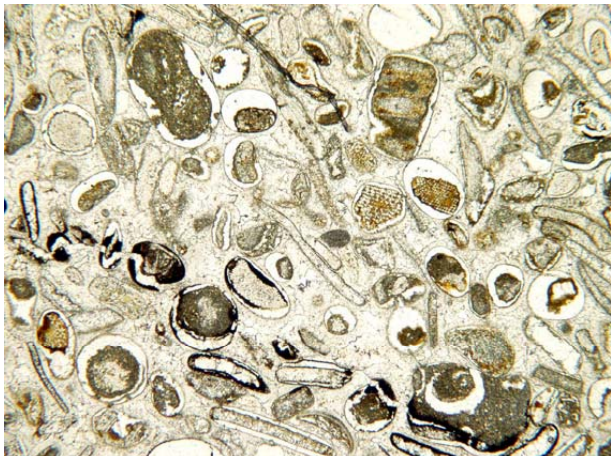
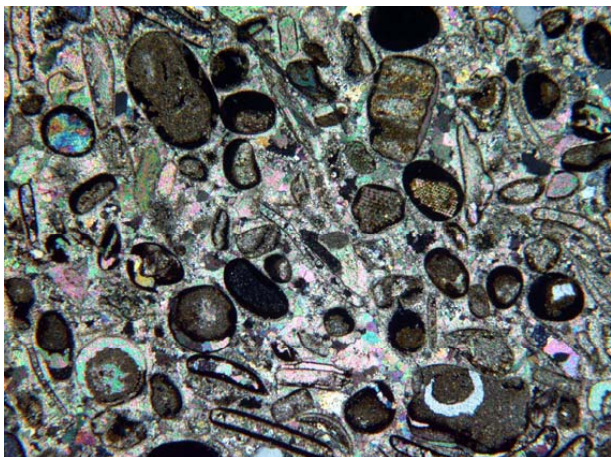
Carotte ne-24	Litage oblique	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		 <p>modification de surface non visible</p>
Observation en LPA		

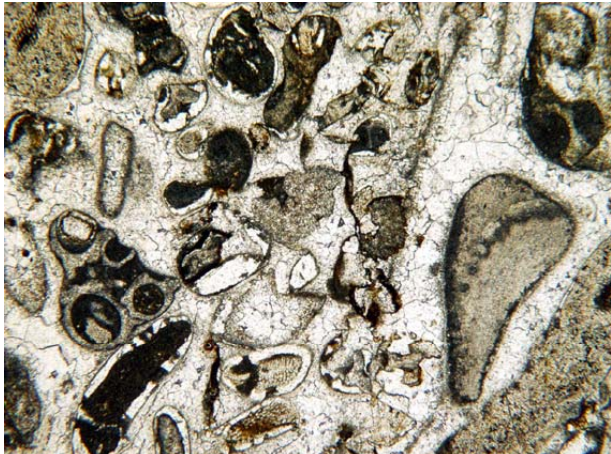
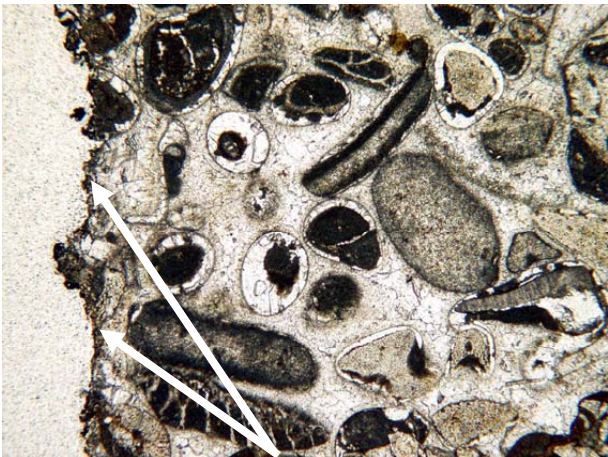
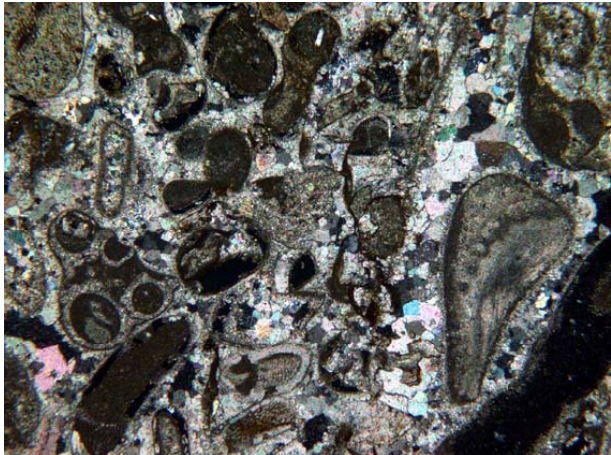
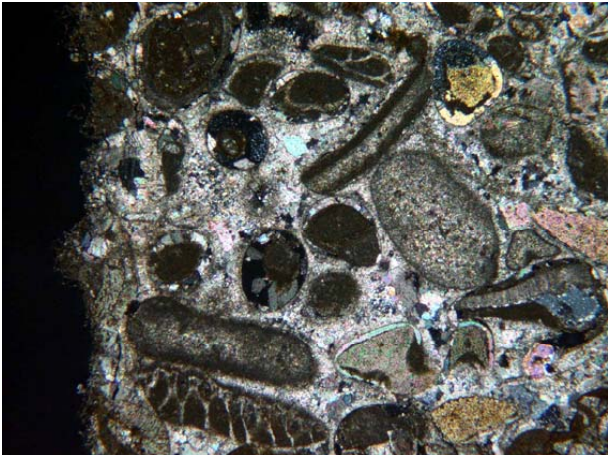
Carotte ne-25	Litage \perp à la surface	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		Photos non disponible
Observation en LPA		

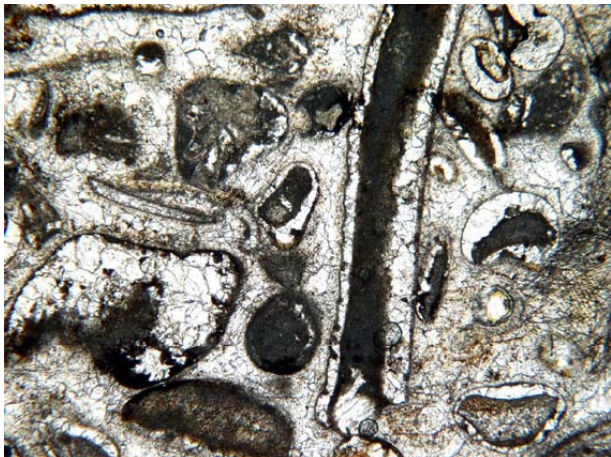
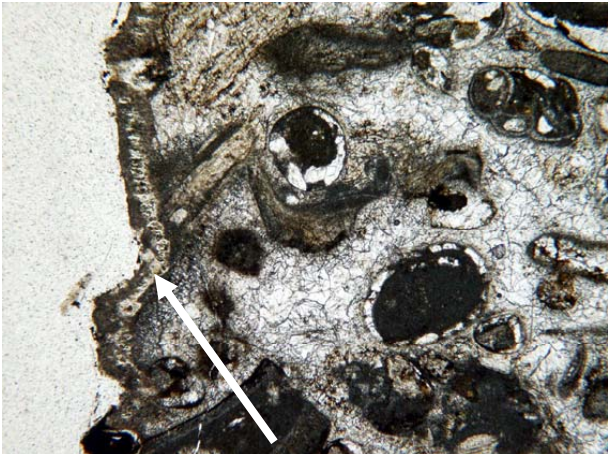
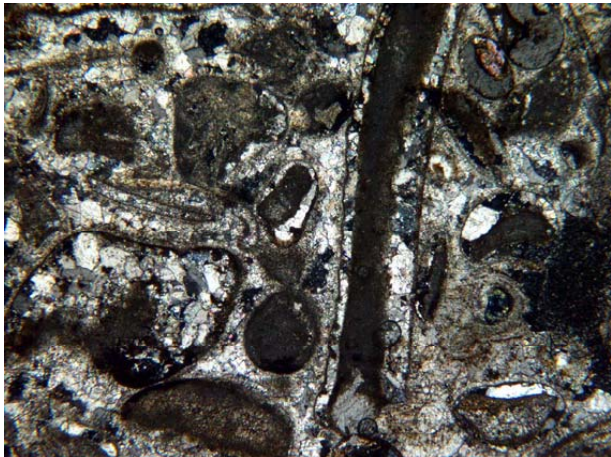
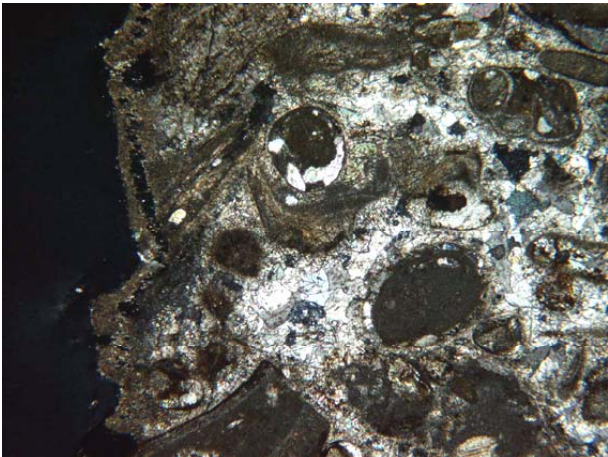
Carotte ne-26	Litage \perp à la surface	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		 <p data-bbox="1211 762 2033 837">mauvaise fabrication de la lame => surface abîmée. Mais restes d'une fine patine brunâtre</p>
Observation en LPA		

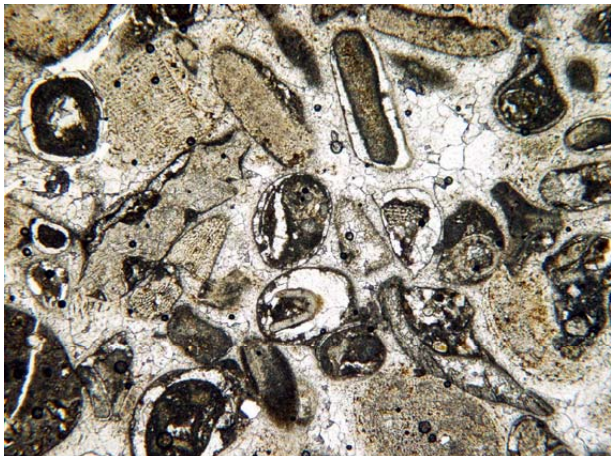
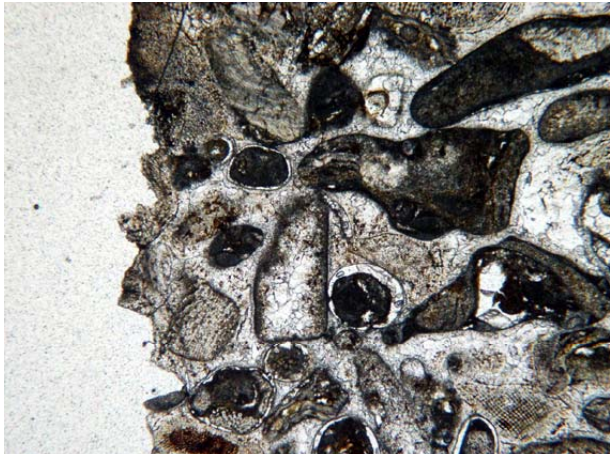
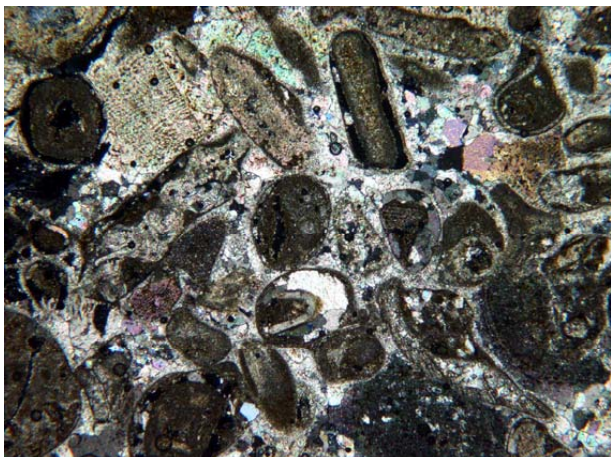
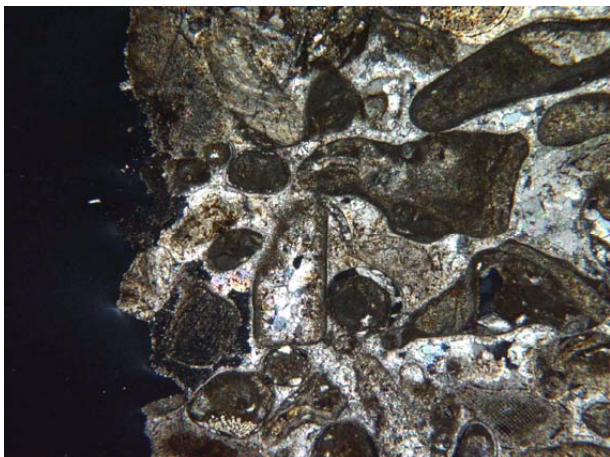
Carotte ne-27	Litage oblique par rapport à la surface	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		Photos non disponibles
Observation en LPA		

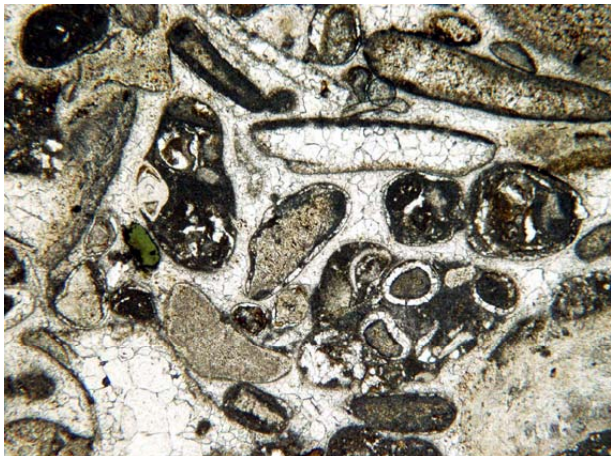
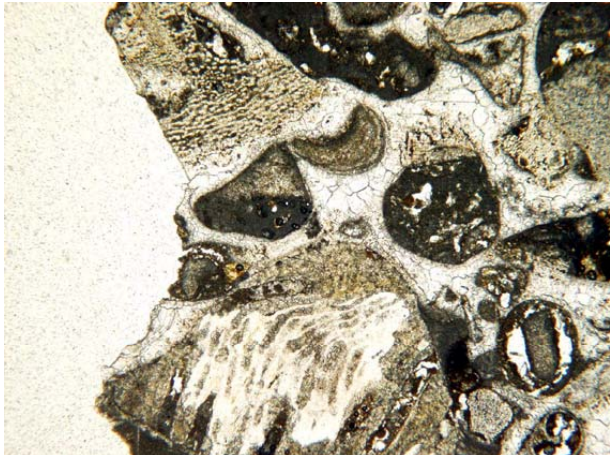
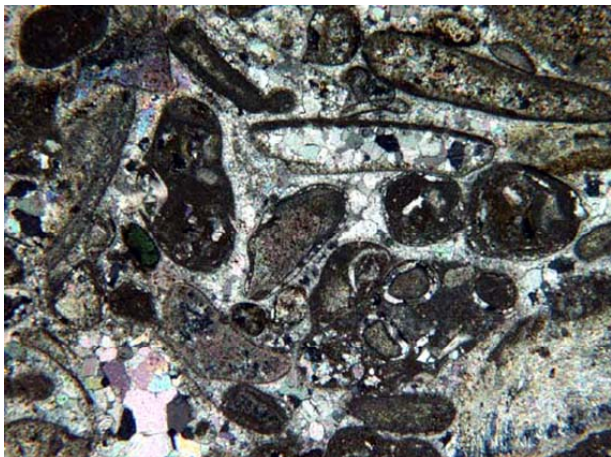
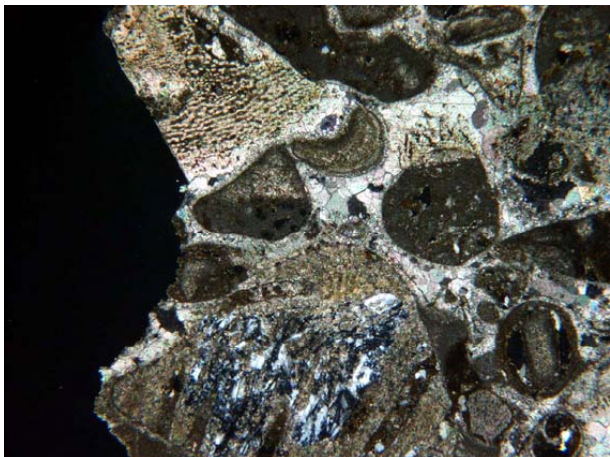
Carotte ne-28	Litage // à la surface	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		<p>Photos non disponibles => surface tombée</p>
Observation en LPA		

Carotte ne-29	Litage // à la surface	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		<p>Photos non disponibles parce que mauvaise fabrication de la lame</p>
Observation en LPA		

Carotte ne-30	Litage \perp à la surface	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		 <p>restes de croûte noire d'origine biologique.</p>
Observation en LPA		

Carotte ne-31	Litage non net	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		 <p>croûte fibro-radiale (fibres perpendiculaires à la surface) fabriquée par des microorganismes</p>
Observation en LPA		

Carotte ne-32	Litage non net	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		 <p data-bbox="1496 746 1749 778">surface rugueuse</p>
Observation en LPA		

Carotte ne-33	Litage non net	
	Intérieur	Surface
Observation en LNA		 <p data-bbox="1496 751 1749 783">surface rugueuse</p>
Observation en LPA		

ANNEXE 7

IMBIBITION CAPILLAIRE

1. PRINCIPE

Pour simuler la réaction de la pierre avec un apport d'eau "classique", il est utile de mettre en œuvre une expérience d'imbibition capillaire à pression atmosphérique. Ceci renseignera sur la quantité d'eau maximale que peut absorber une pierre en conditions non forcées, mais aussi sur la cinétique de cette absorption.

Pour réaliser une imbibition capillaire, les éprouvettes de roche sèches sont déposées dans un récipient qui peut être hermétiquement fermé, de manière à ce que seule la base des éprouvettes soit constamment en contact avec de l'eau libre (cf. figure A7-1).

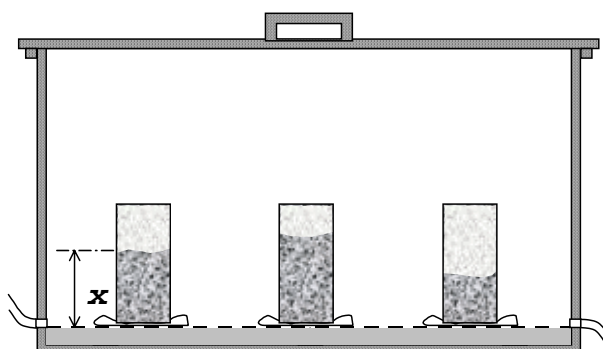


Figure A7-1. dispositif expérimental de l'imbibition capillaire

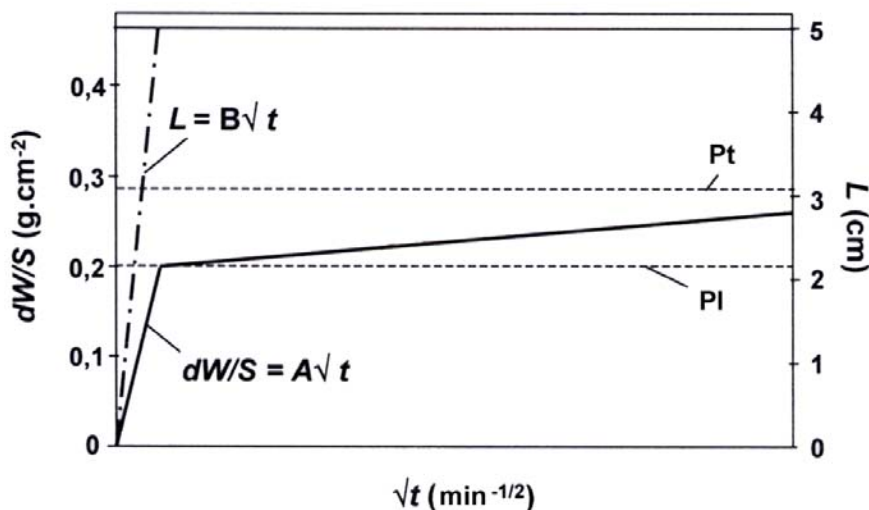


Figure A7-2. Cinétiques d'imbibition capillaire en fonction de la racine carrée du temps. L = montée de la frange capillaire le long de l'échantillon, dW/S = prise de poids rapportée à l'unité de surface d'imbibition.

La mesure, à intervalles de temps croissants, d'une part de la hauteur de la frange capillaire le long des éprouvettes et d'autre part de leur prise de poids permet de tracer les courbes d'imbibition en fonction du temps.

Lors de cet essai, la totalité du réseau poreux ne peut pas être envahi : le réseau poreux des pierres étant très complexe (constitué d'une successions de

rétrécissements et d'évasements plus ou moins bien connectés et aléatoirement répartis), les tensions capillaires qui se créent à l'intérieur du réseau sont très diverses et, elles aussi, aléatoirement réparties. De ce fait, l'eau d'imbibition progresse naturellement plus rapidement dans les rétrécissements et les micropores. Ainsi, l'air qui se trouve en début d'expérience dans les macropores est en partie piégé dans ces grands pores.

Lorsque la frange capillaire atteint le sommet de l'échantillon, la portion du volume poreux occupé par l'eau est la porosité capillaire ou porosité libre. La prise de poids ralentit alors brusquement et se poursuit très lentement par un processus de diffusion de l'air piégé à l'intérieur du réseau à travers l'eau, c'est-à-dire par le lent remplissage de la macroporosité piégée.

Des courbes d'imbibition, il est possible de déduire :

- le coefficient massique de capillarité, A ;
- le coefficient linéique de capillarité, B ;
- la porosité capillaire ou porosité libre, PI ;
- le coefficient d'Hirschwald ou coefficient de saturation capillaire, S ;
- une estimation de la gélivité de la pierre.

L'estimation de la gélivité se fait grâce au coefficient S (%) : si $S < 75\%$ le matériau est supposé non gélif, si $S > 85\%$ le matériau est susceptible d'être gélif

Les essais d'imbibition capillaire ont été réalisés suivant les recommandations RILEM (1978, essai II.6). Ils n'ont pas été réalisés à partir de la surface originellement exposée sur le bâtiment. En effet sur ces surfaces d'origine certains composés sont potentiellement solubles et risquaient de polluer le réservoir d'eau commun à tous les échantillons.

2. RESULTATS

Légende des tableaux :

- A Coefficient massique de capillarité = cinétique de la prise de poids en eau
- B Coefficient linéique de capillarité = cinétique de montée de la frange capillaire
- PI Porosité libre ou capillaire = pourcentage de volume total librement accessible à l'eau en présence d'air
- S Coefficient de saturation ou d'Hirschwald = pourcentage du volume poreux occupé librement par de l'eau en présence d'air = $PI/Po \cdot 100$

Chaque bloc de couleur verte ou blanche correspond à un faciès

2.1. Echantillons prélevés sur les monuments

Échantillons dont le litage était perpendiculaire au sens d'imbibition, donc en délit					
Bâtiment	Ech.	A (mg/cm ² .min ^{1/2})	B (cm/min ^{1/2})	PI (%)	S (%)
Hôpital Pourtalès	ne1	5.7	0.27	3.7	17.5
Maison Wavre	ne5	3.5	0.10	0.8	5.9
		1.2	0.25		
	ne6	4.0	0.39	2.5	23.1
		2.1	0.08		
	ne8	3.8	0.20	2.4	17.3
2.7		0.15			
6, Dupeyrou	ne9	4.2	0.16	3.6	21.4
Portail Collégiale	ne12	4.1	0.17	3.1	24.7
MHN sous fenêtre	ne21	4.5	0.17	3.0	21.3
		3.1			
	ne22	4.0	0.19	3.0	21.9
		5.5			
Portail Rue J. Hochberg	ne28	4.2	0.18	3.5	19.7
	ne29	4.8	0.20	4.0	22.1
Moyenne		3.8	0.20	3.0	19.6
Écart type		1.2	0.08	0.9	5.0
Minimum		1.2	0.08	0.8	5.9
Maximum		5.7	0.39	4.0	24.7
Effectif			11		
Nb faciès			10		

Tableau A7-1. Résultats des imbibitions capillaires effectuées sur les échantillons prélevés sur les bâtiments et dont le litage était perpendiculaire au sens d'imbibition - Type d'échantillons : cylindres de 4.5 cm de haut et de 2.6 cm de diamètre

Echantillons dont le litage était parallèle au sens d'imbibition					
Bâtiment	Ech.	A (mg/cm ² .min ^{1/2})	B (cm/min ^{1/2})	PI (%)	S (%)
Hôpital Pourtalès	ne3	10.8	0.34	4.0	22.6
	ne4	5.0	0.26	2.7	23.8
MHN sous fenêtre	ne17	4.9	0.24	3.1	20.7
	ne18	4.4	0.22	2.8	19.5
	ne19	4.5	0.20	3.3	22.7
	ne20	5.2	0.29	2.9	22.4
MHN cour	ne25	4.2	0.20	2.8	24.1
	ne26	5.1	0.20	3.4	22.8
Portail Rue J. Hochberg	ne30	4.6	0.21	2.9	21.3
Moyenne		5.4	0.24	3.1	22.2
Écart type		2.0	0.05	0.4	1.5
Minimum		4.2	0.20	2.7	19.5
Maximum		10.8	0.34	4.0	24.1
Effectif			10		
Nb faciès			7		

Tableau A7-2. Résultats des imbibitions capillaires effectuées sur les échantillons prélevés sur les bâtiments et dont le litage était parallèle au sens d'imbibition - Type d'échantillons : cylindres de 4.5 cm de haut et de 2.6 cm de diamètre

2.2. Echantillons prélevés sur les fronts de taille

Echantillons dont le litage était perpendiculaire au sens d'imbibition				
Ech.	A (mg/cm ² .min ^{1/2})	B (cm/min ^{1/2})	PI (%)	S (%)
	7.3	0.17		
	5.4	0.05	5.7	70.8
	4.7	0.08		
H6a	19.2	0.29	10.6	50.2
	13.6	0.17		
H9a	11.5	0.15	8.6	72.2
H10a	12.1	0.27	8.5	71.9
	9.7	0.09		
Moyenne	10.4	0.2	8.4	66.3
Écart type	4.8	0.1	2.0	10.7
Minimum	4.7	0.1	5.7	50.2
Maximum	19.2	0.3	10.6	72.2
Effectif	4			
Nb faciès	4			

Tableau A7-3. Résultats des imbibitions capillaires effectuées sur les échantillons prélevés sur les fronts de taille et dont le litage était perpendiculaire au sens d'imbibition - Type d'échantillons : cubes de 4 cm d'arête

Echantillons dont le litage était parallèle au sens d'imbibition				
Ech.	A (mg/cm ² .min ^{1/2})	B (cm/min ^{1/2})	PI (%)	S (%)
H5b	8.3	0.21	6.0	68.3
	6.7	0.12		
H6b	18.8	0.20	10.6	50.6
H9b	17.4	0.21	8.7	69.7
Moyenne	12.8	0.2	8.4	62.9
Écart type	6.2	0.04	2.3	10.6
Minimum	6.7	0.1	6.0	50.6
Maximum	18.8	0.2	10.6	69.7
Effectif	3			
Nb faciès	3			

Tableau A7-4. Résultats des imbibitions capillaires effectuées sur les échantillons prélevés sur les fronts de taille et dont le litage était parallèle au sens d'imbibition - Type d'échantillons : cubes de 4 cm d'arête

ANNEXE 8

CINETIQUE DE SECHAGE

1. PRINCIPE

L'expérience d'évaporation consiste à simuler le séchage d'une pierre qui aurait été imbibée par une eau de pluie, des remontées capillaires ou bien encore par des eaux d'infiltrations.

Préalablement aux expériences de séchage, les échantillons doivent être saturés partiellement ou totalement en eau. Dès la saturation désirée atteinte, les échantillons sont emballés dans un manchon en Nylon hermétique de sorte qu'une seule surface puisse échanger avec le milieu extérieur (cf. schéma de la figure A8-1). Après emballage, les échantillons sont déposés dans un récipient hermétiquement fermé (cf. figure A8-2) dans lequel l'humidité relative est contrôlée au moyen d'une saumure. Nous avons choisi d'utiliser le chlorure de magnésium hexahydraté ($MgCl_2, 6H_2O$) pour maintenir l'humidité relative à 33%.

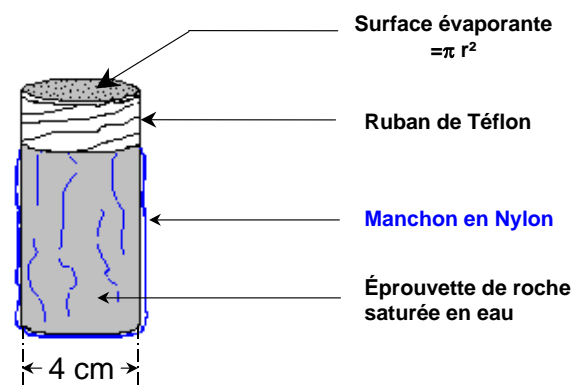


Figure A8-1. Préparation des échantillons pour le séchage

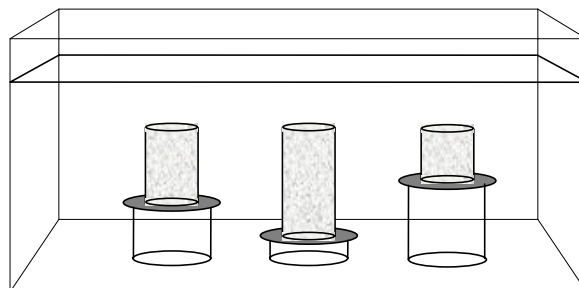


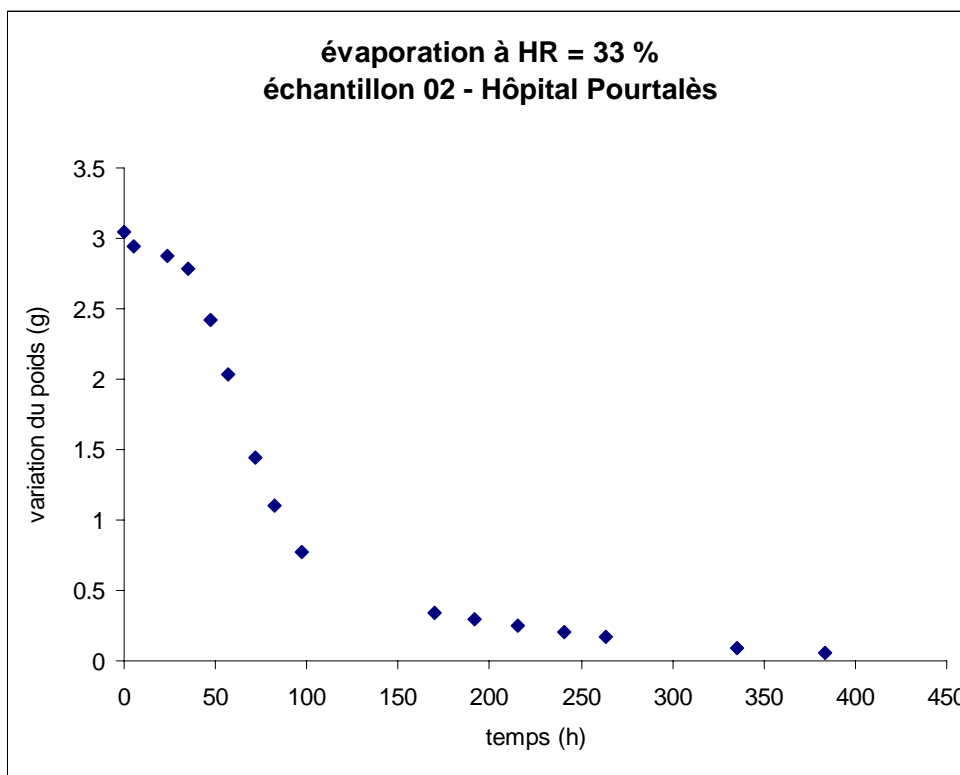
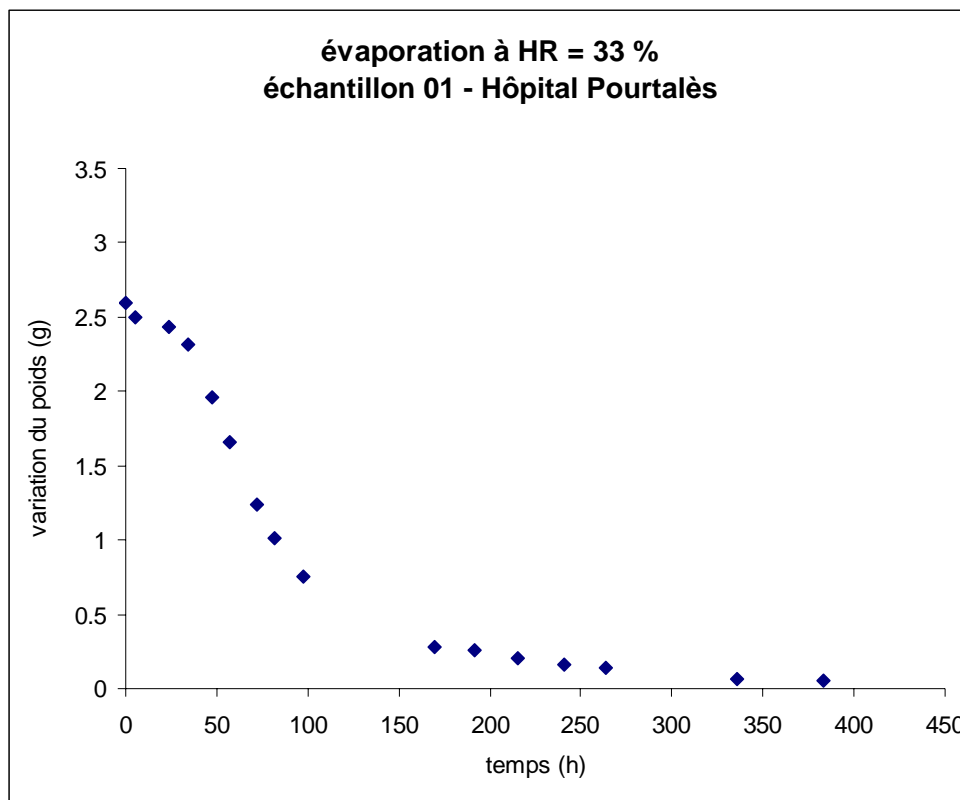
Figure A8-2. Dispositif expérimental du séchage

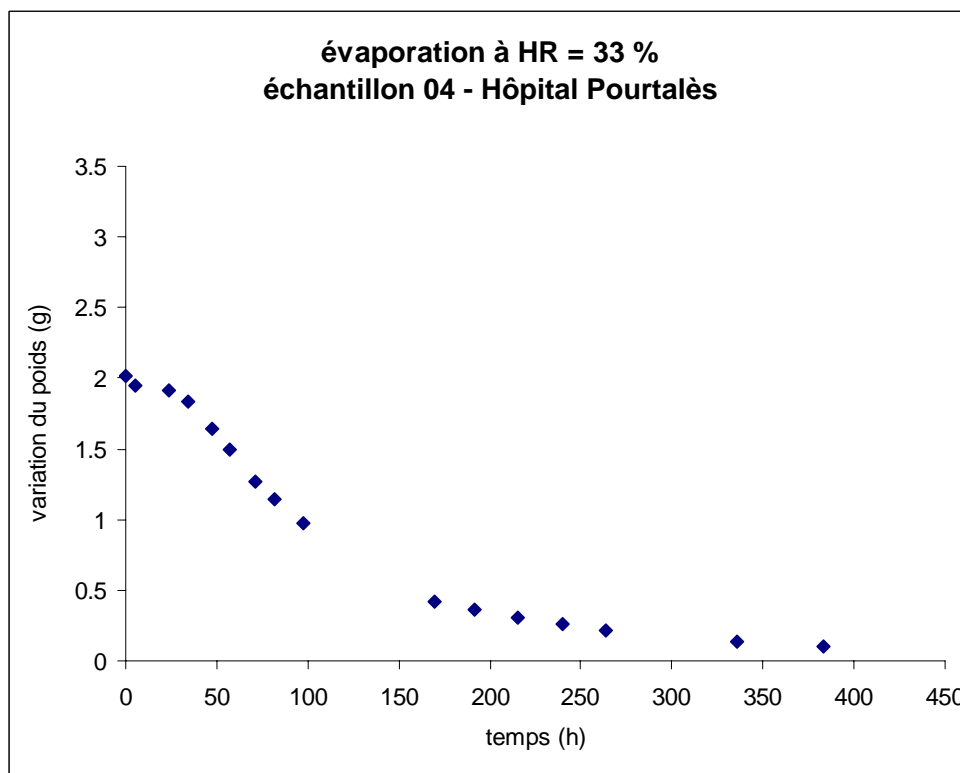
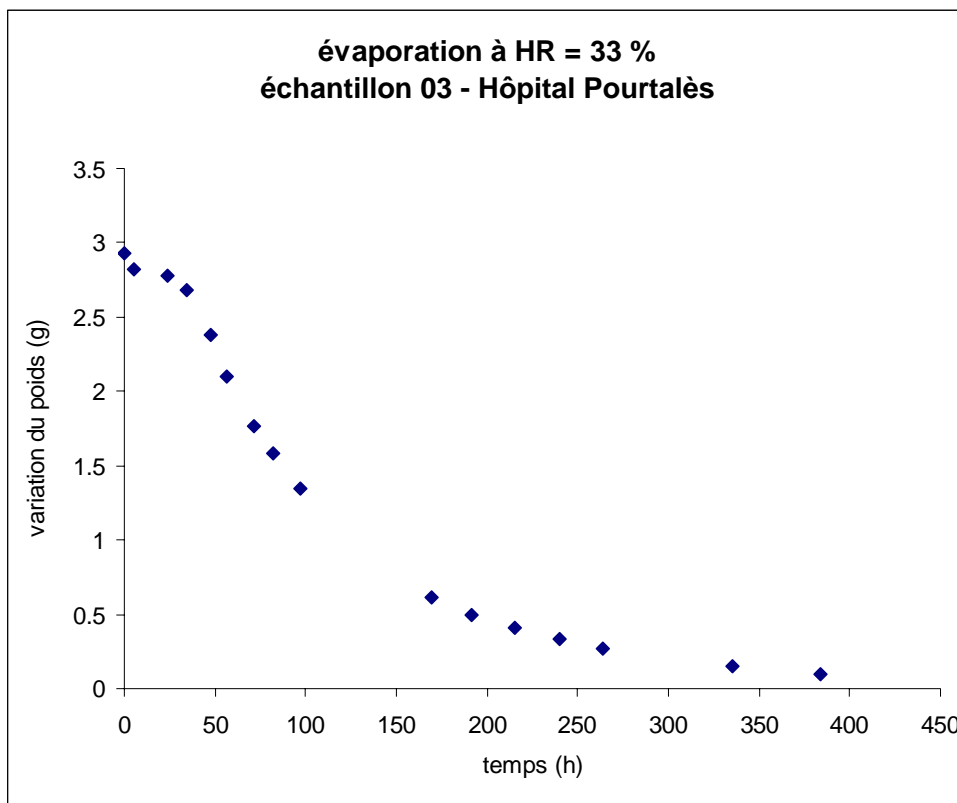
La mesure, à intervalles de temps réguliers, du poids des éprouvettes permet de tracer les courbes de perte de poids des éprouvettes en fonction du temps.

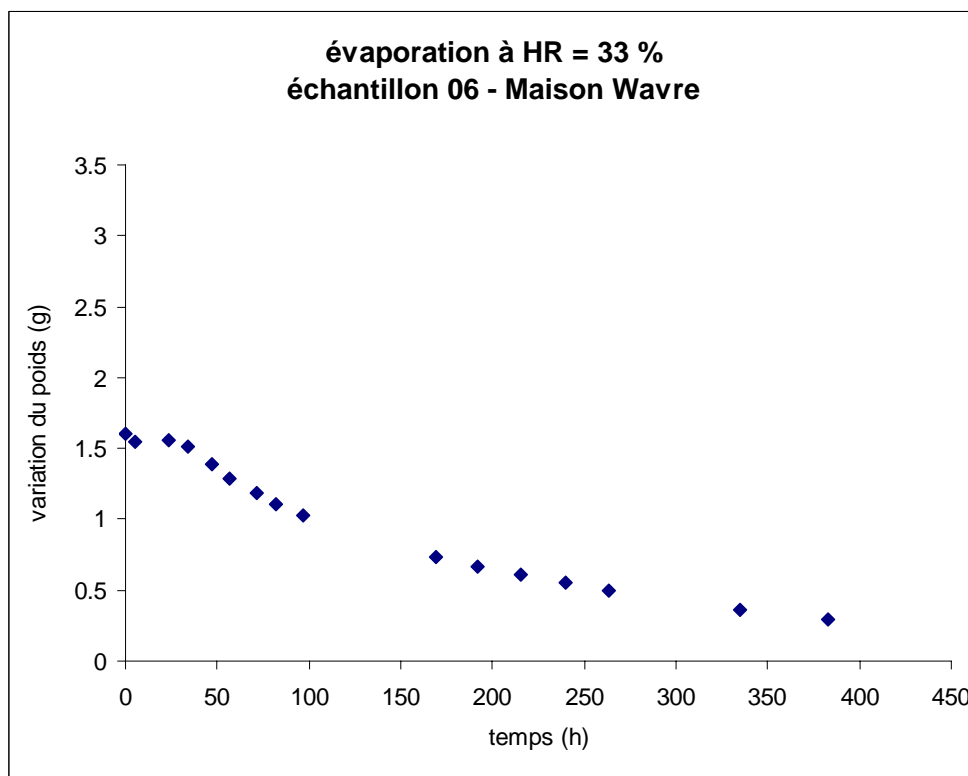
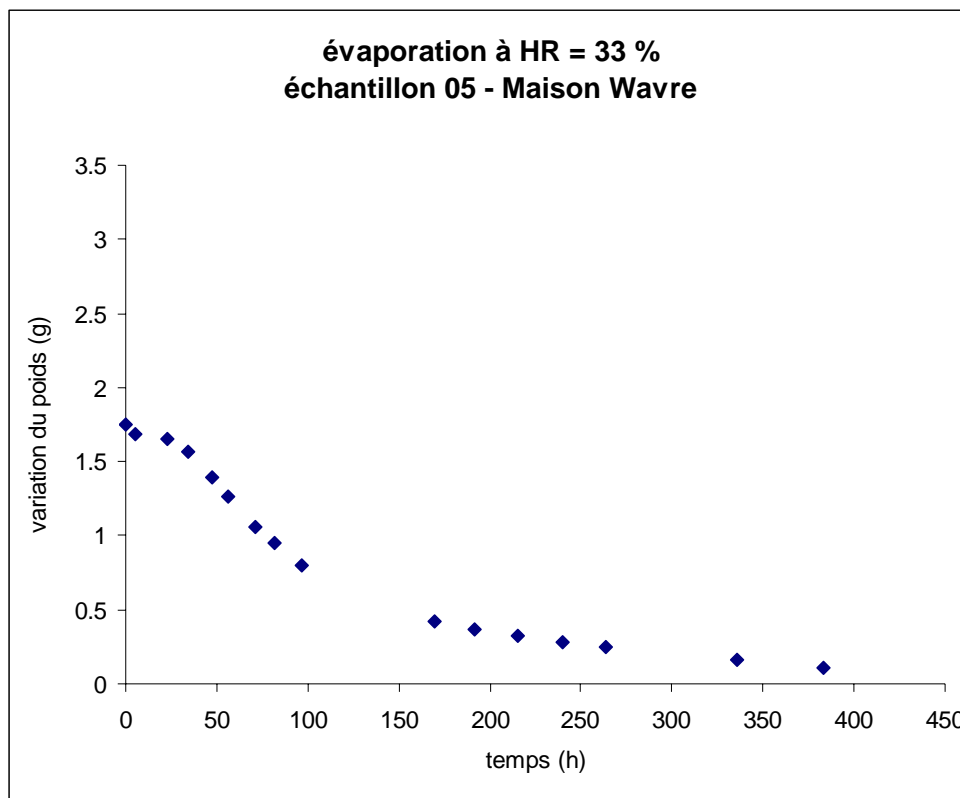
Les essais de séchage ont été réalisés suivant les recommandations RILEM (1978, essai II.5). Ils ont été menés sur les éprouvettes de roche des constructions neuchâteloises après qu'elles aient été saturées par imbibition capillaire. La surface évaporante était la surface originellement exposée sur le bâtiment. (Type d'échantillons : cylindres de 4.5 cm de haut et de 2.5 cm de \varnothing)

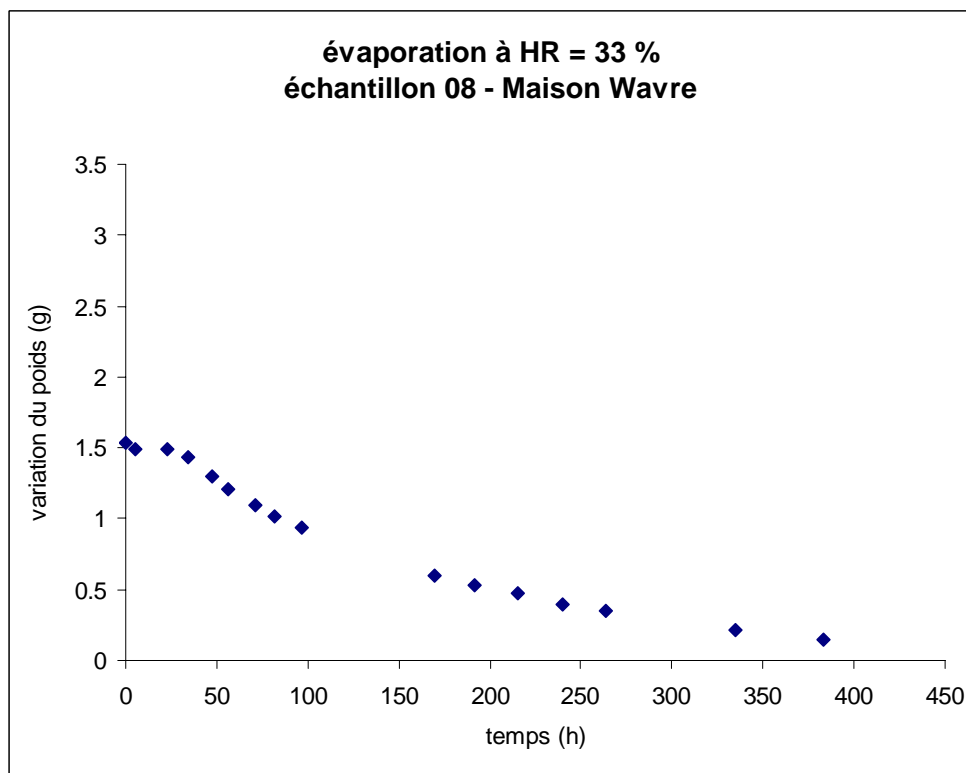
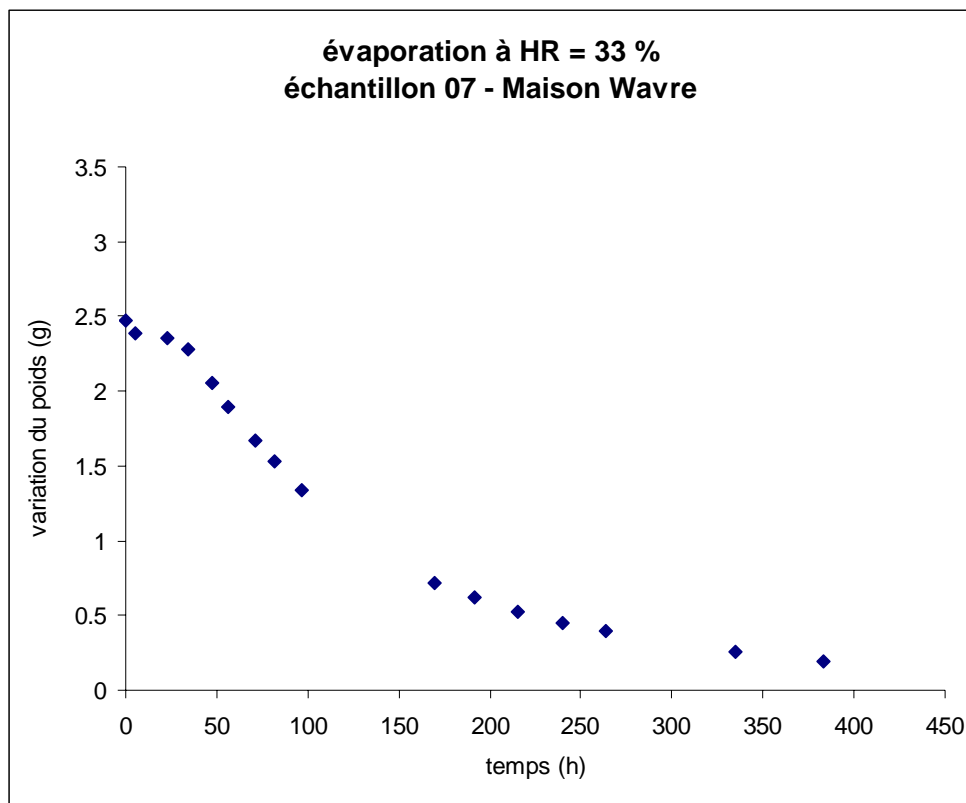
2. RESULTATS

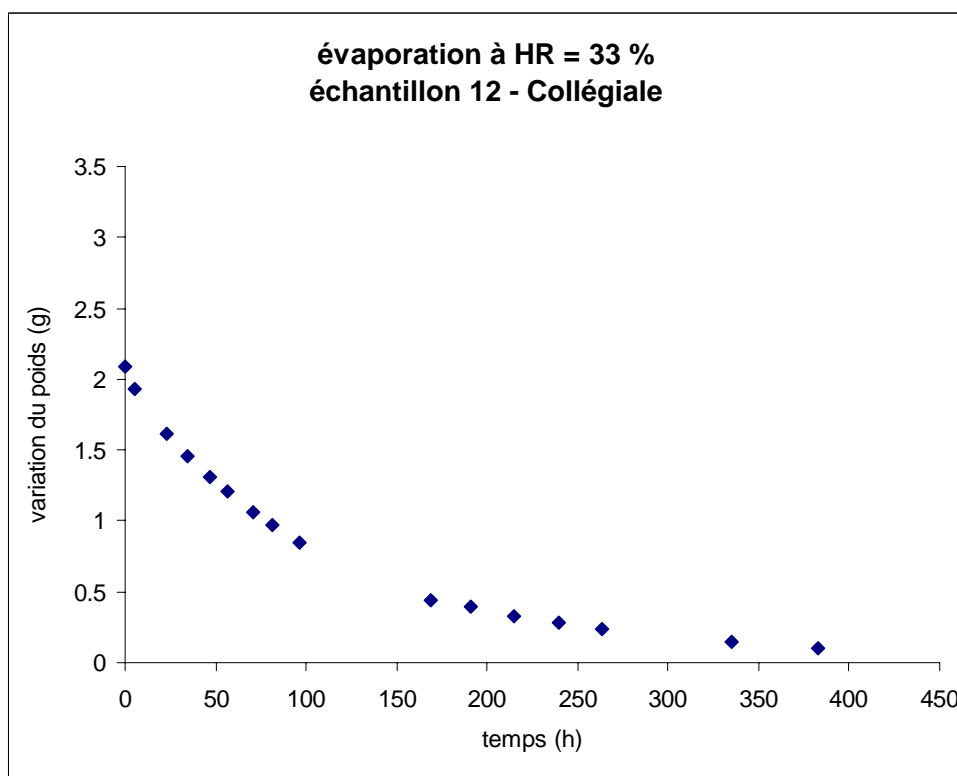
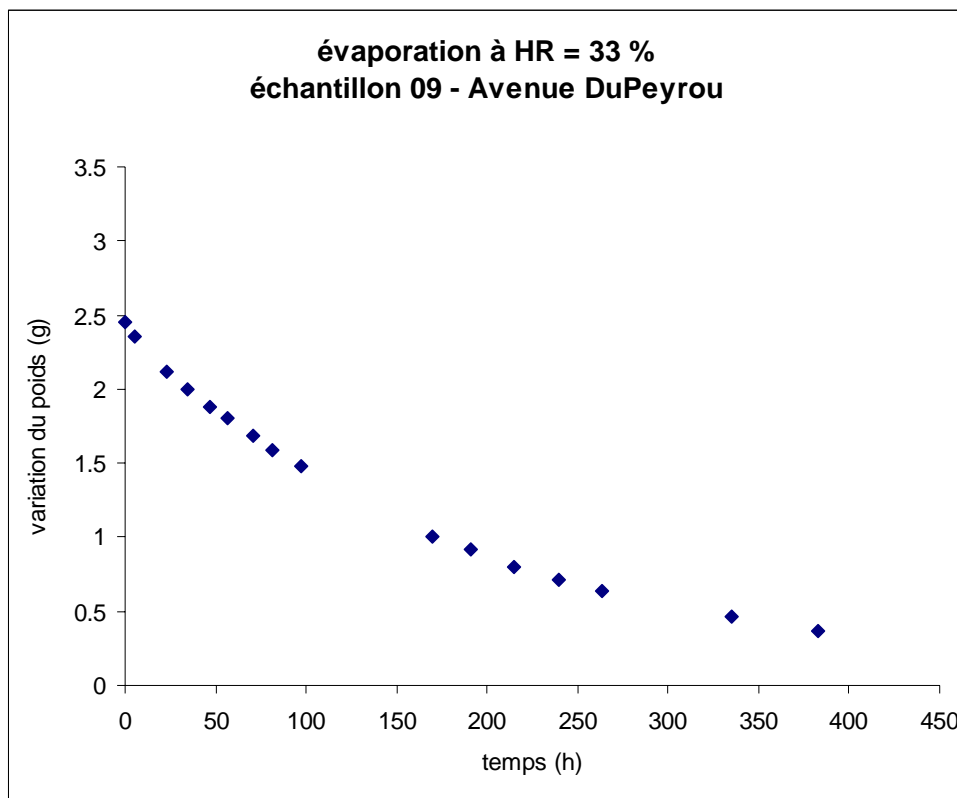
Les résultats sont fournis sous forme des courbes de pertes de poids en eau en fonction du temps pour l'humidité relative (HR) de 33% - la température, constante, était de 21°C

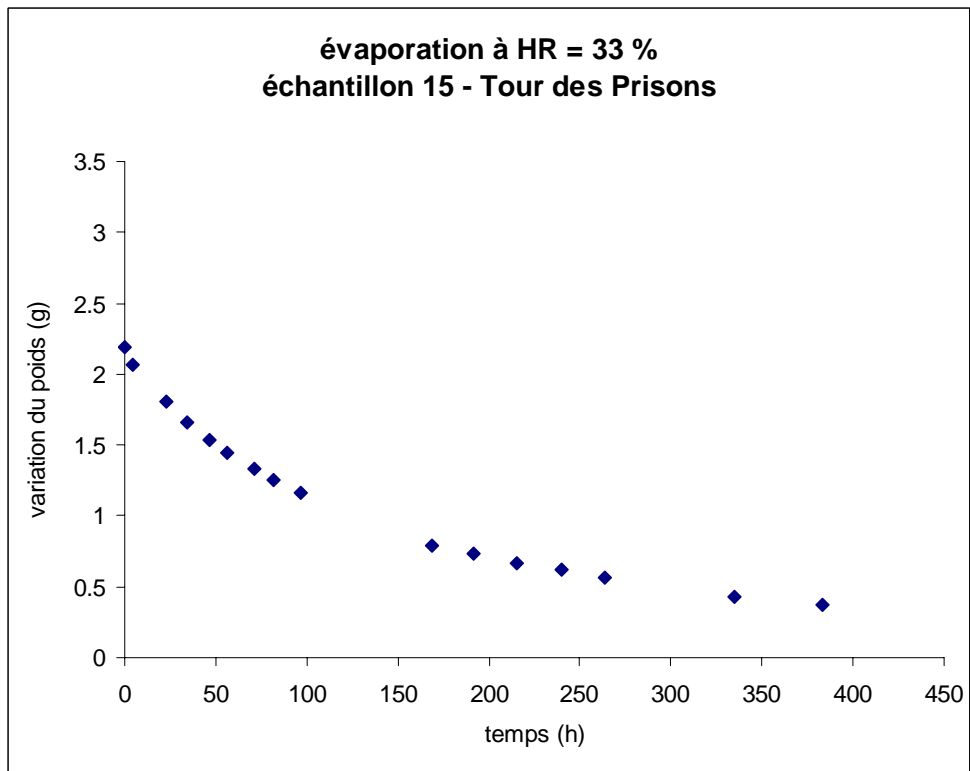
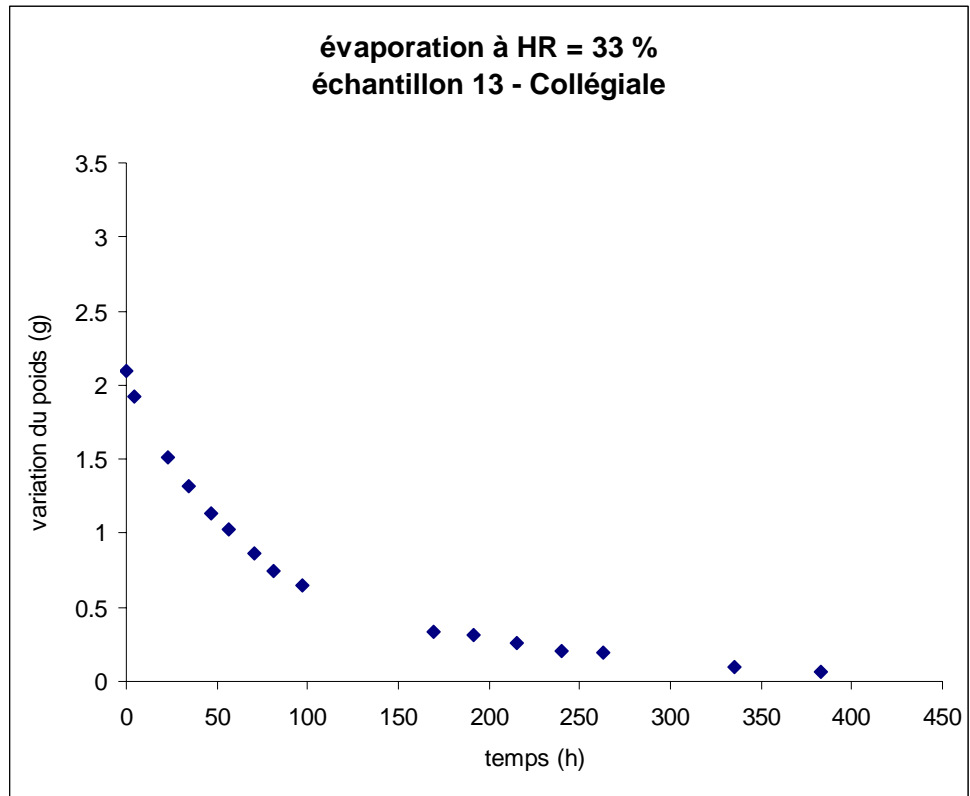


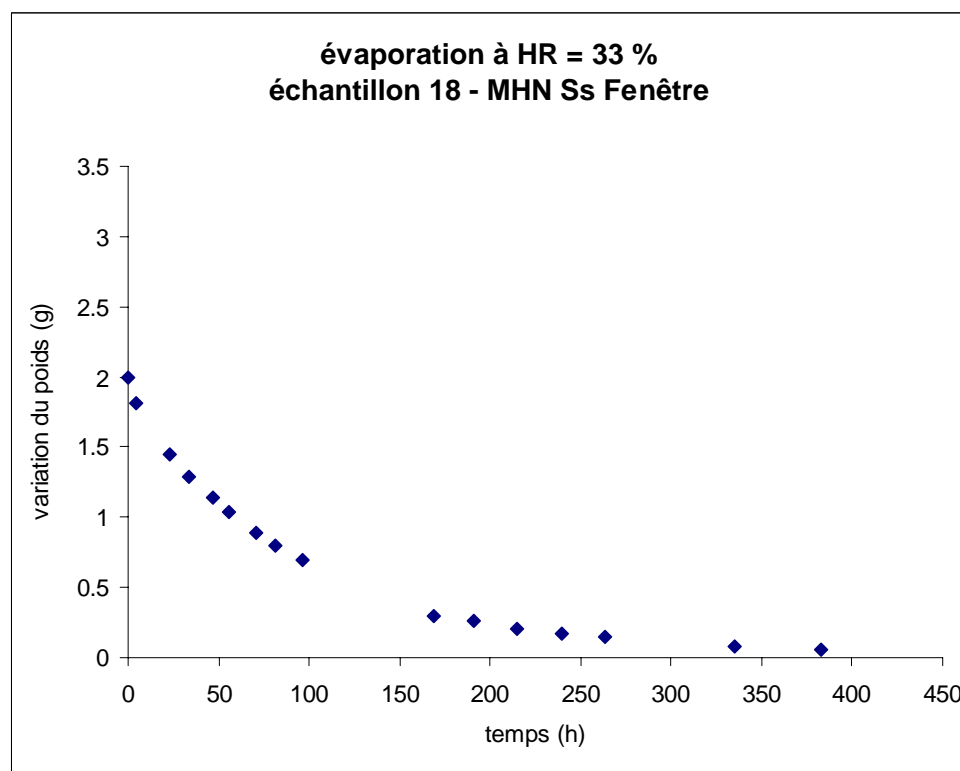
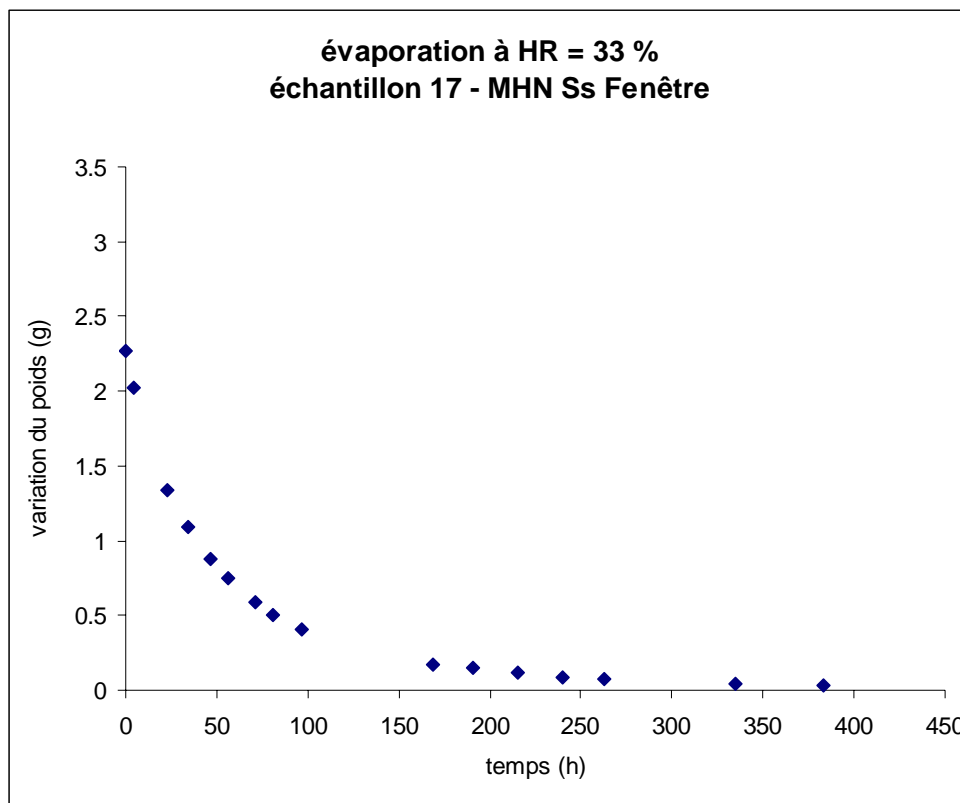


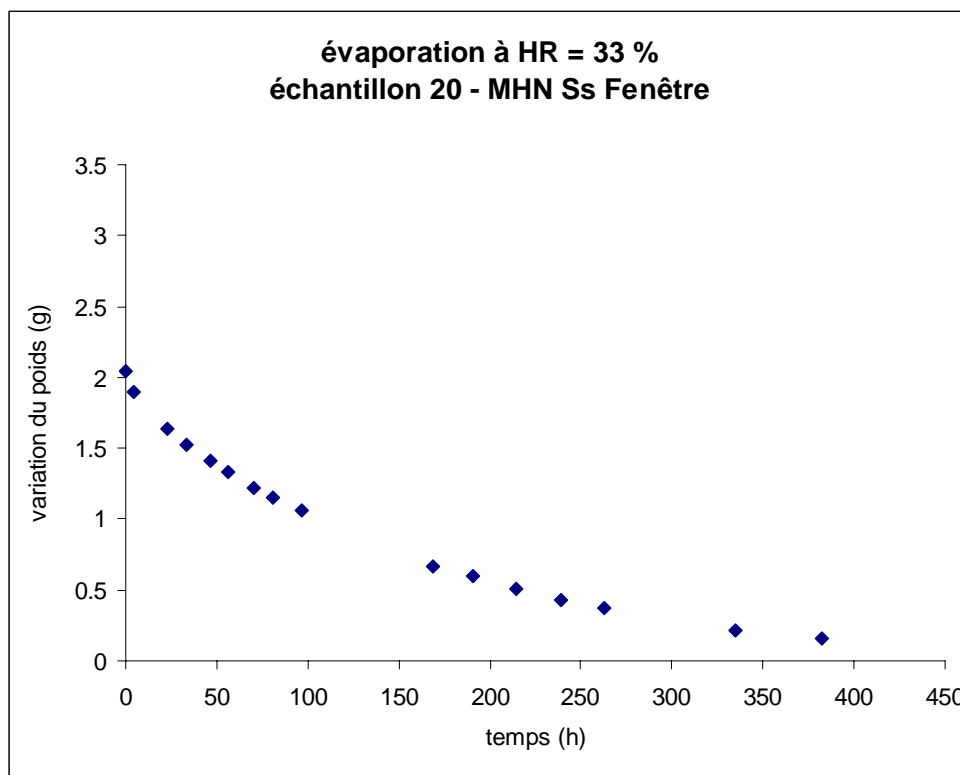
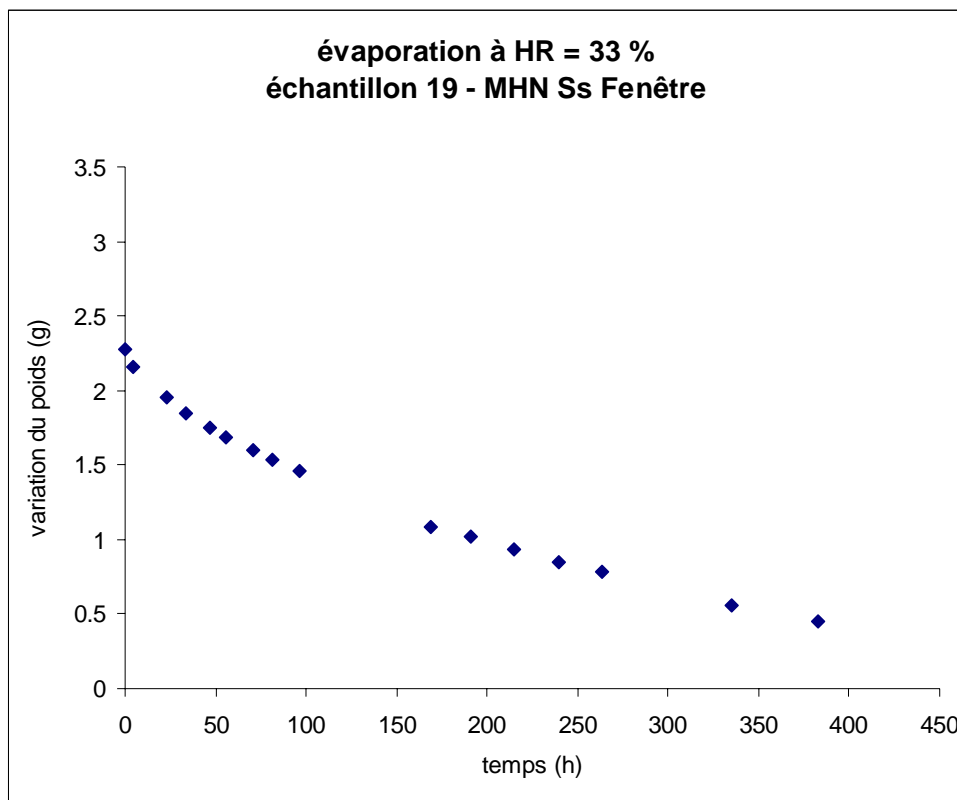


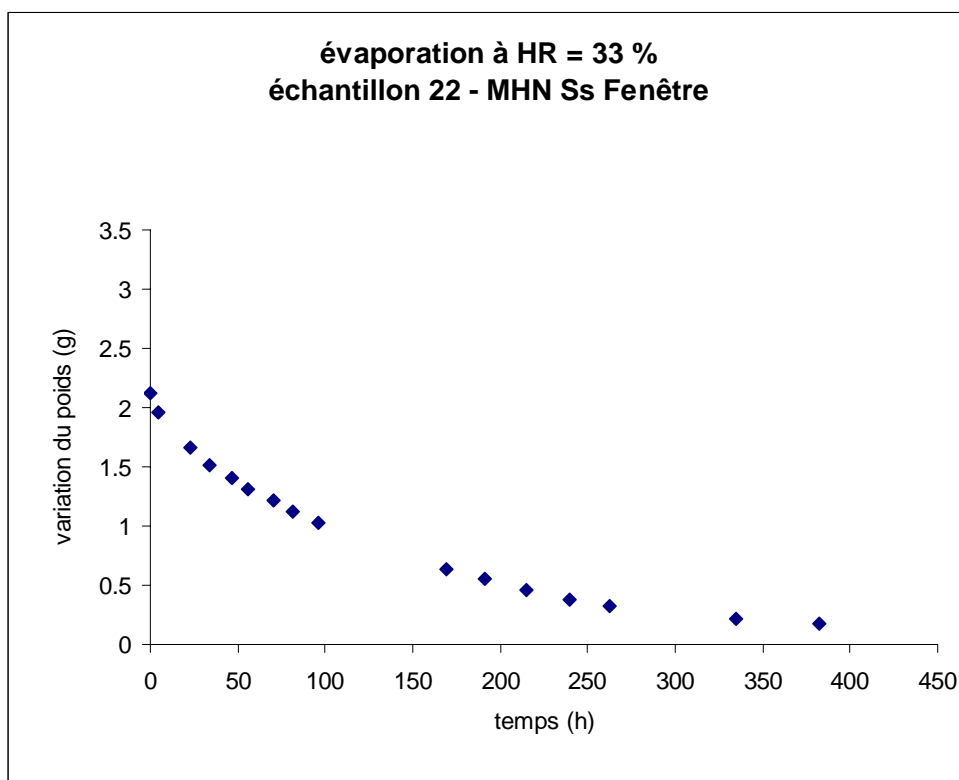
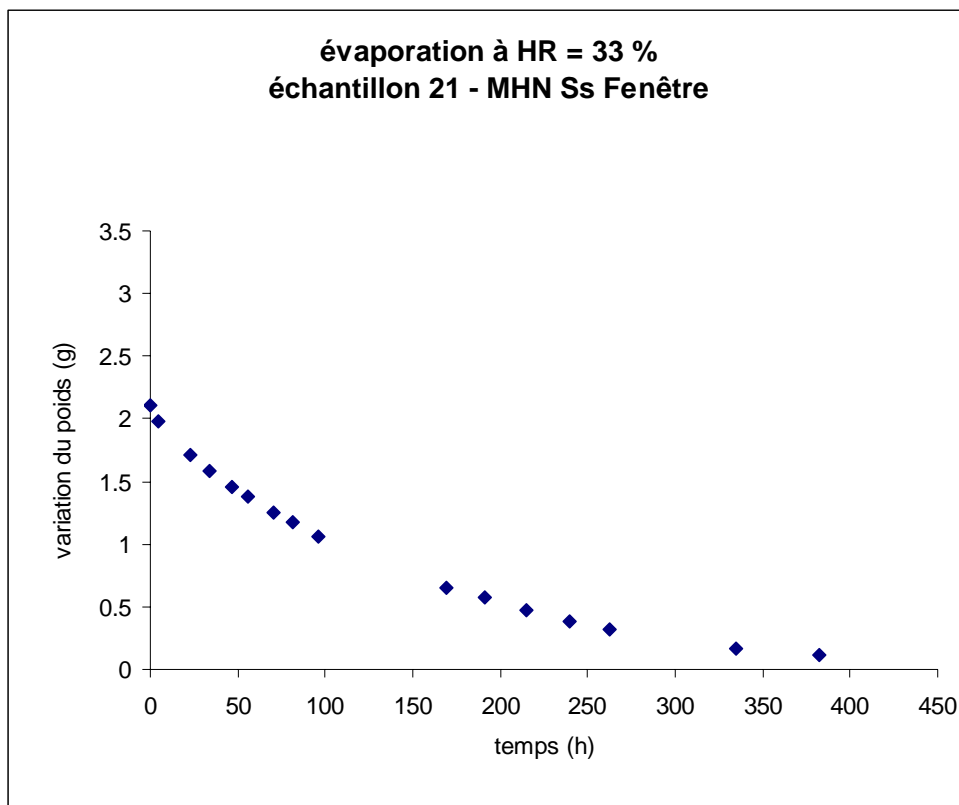


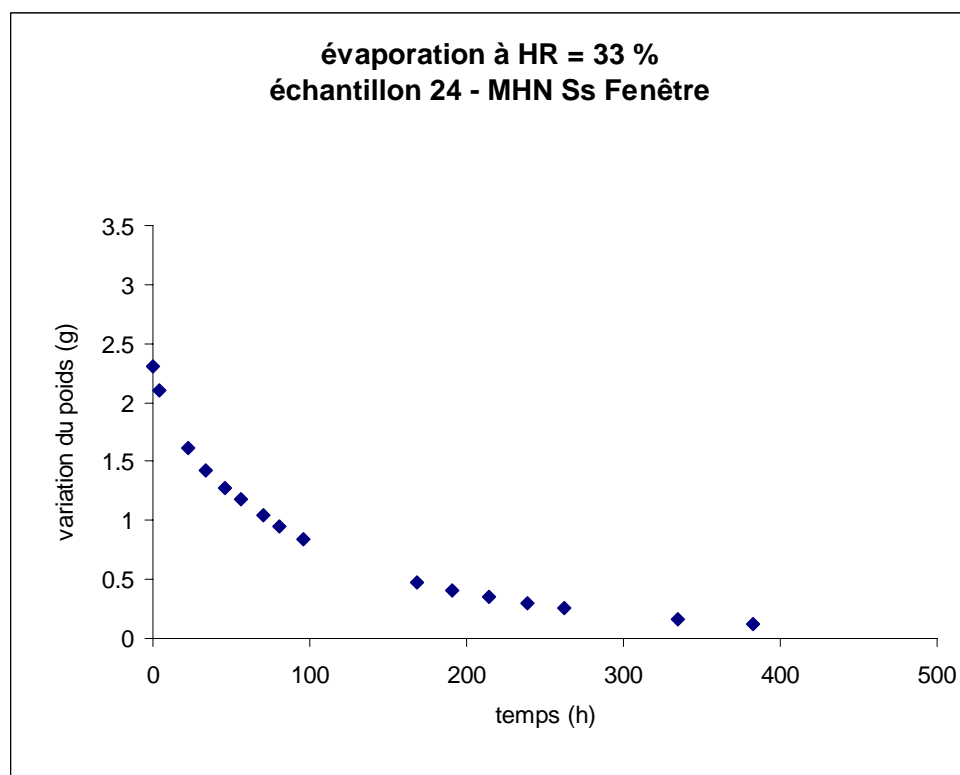
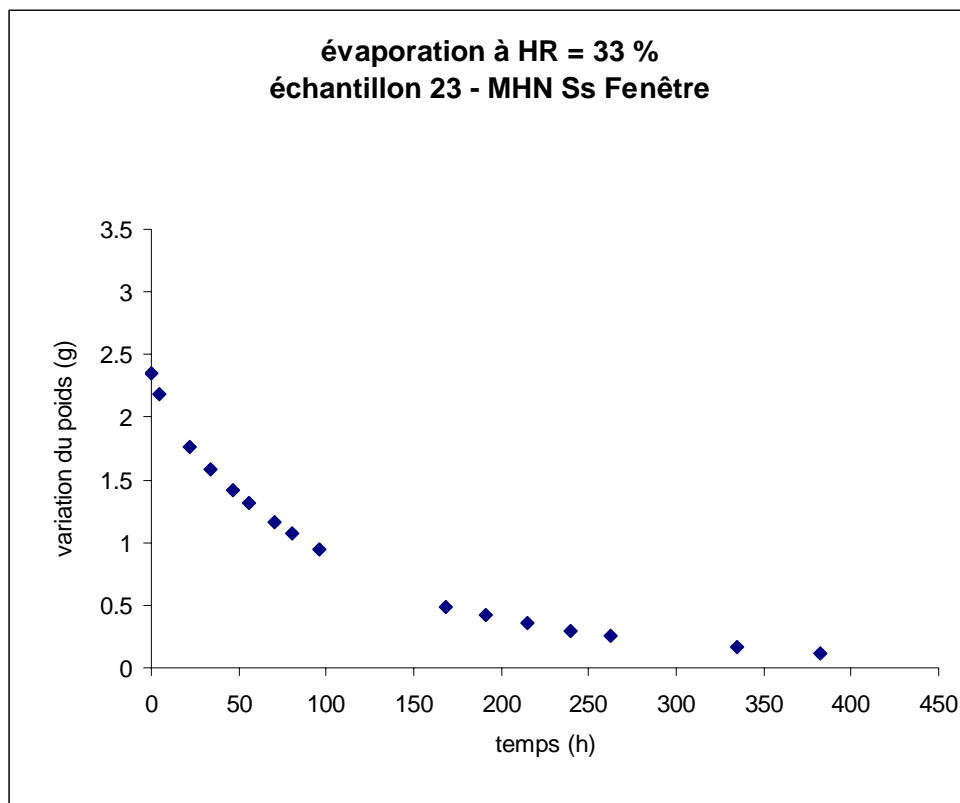


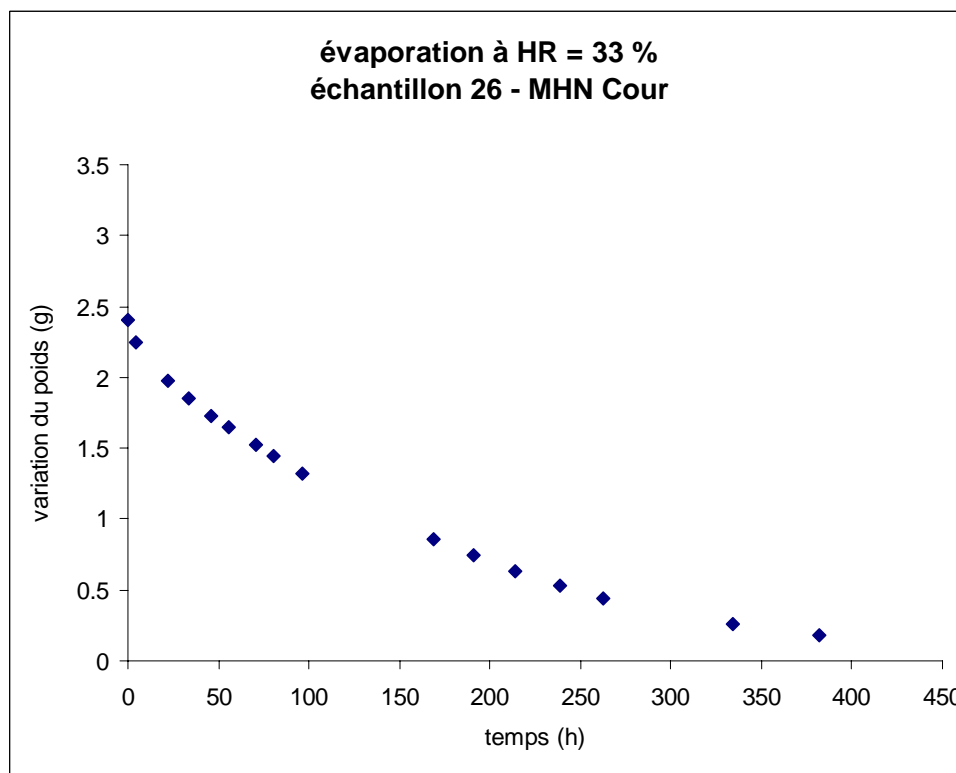
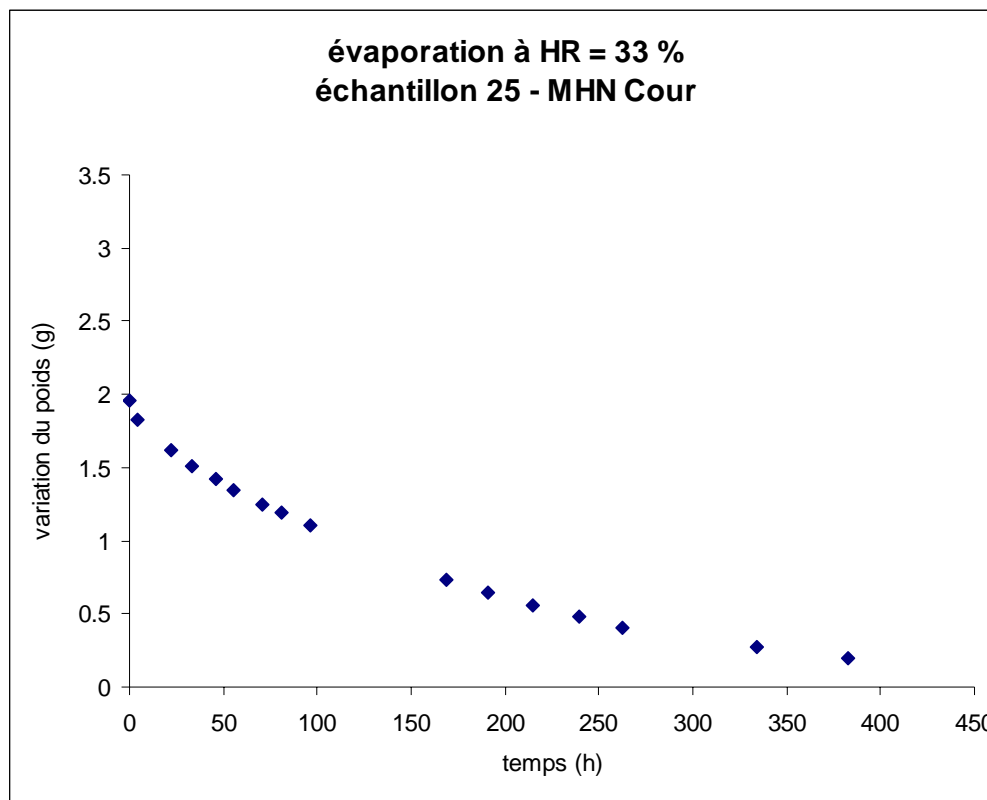


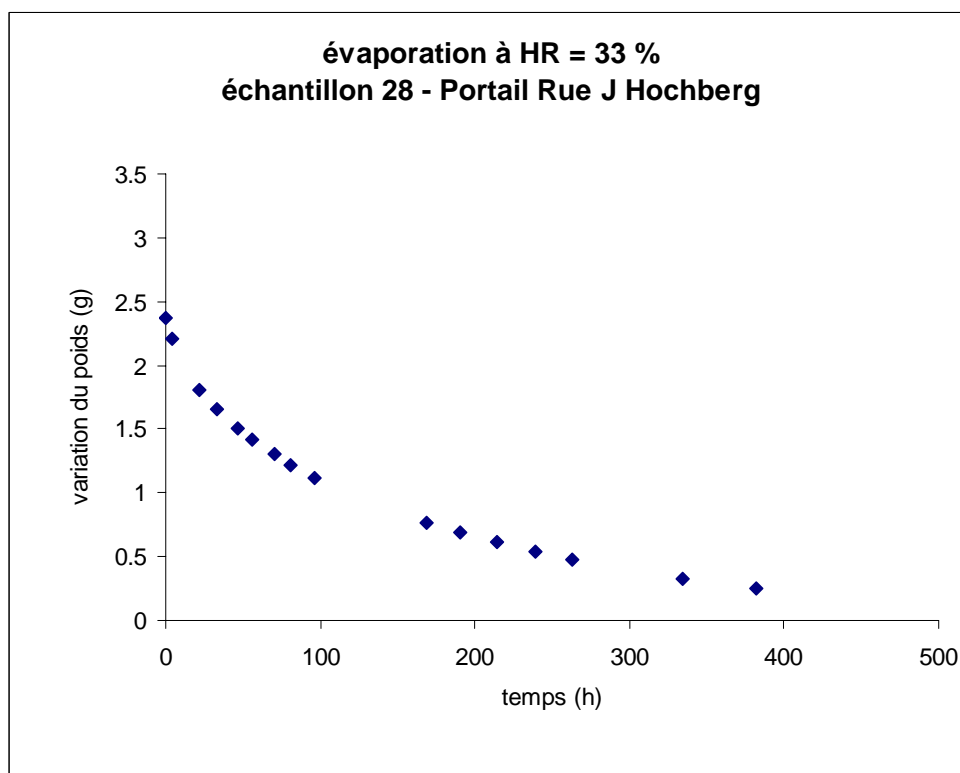
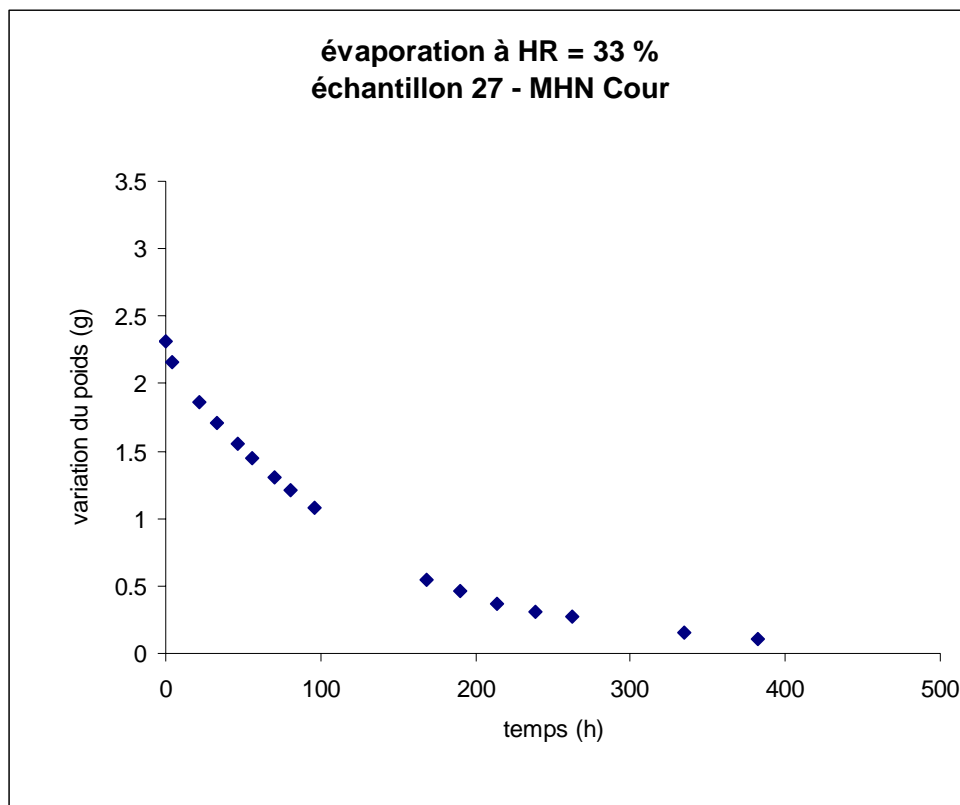


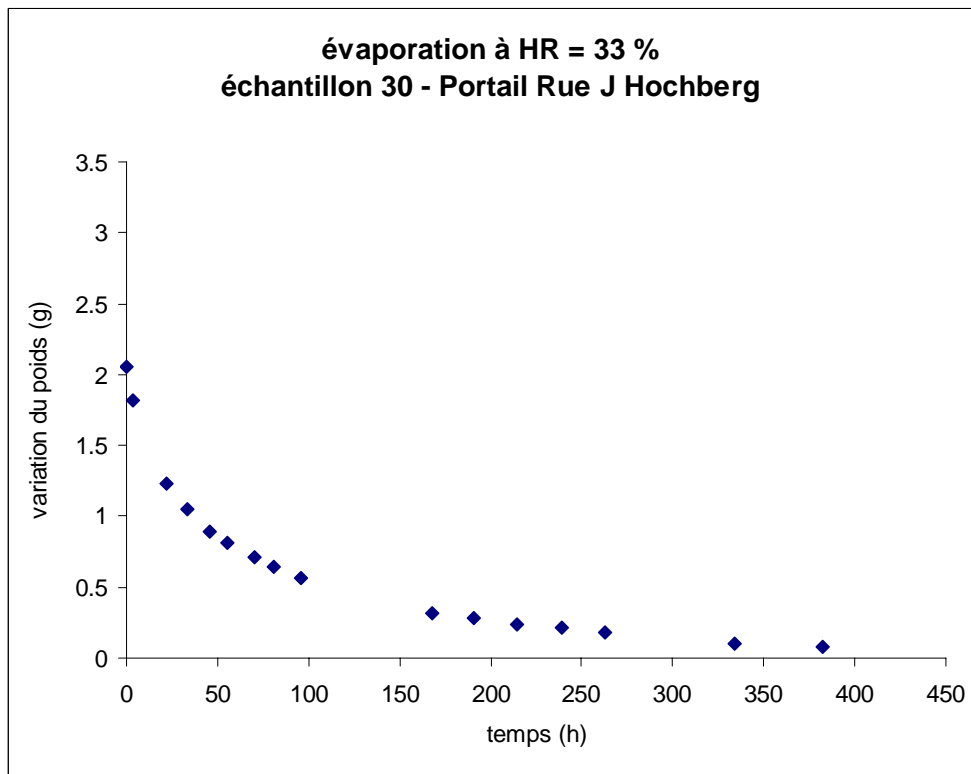
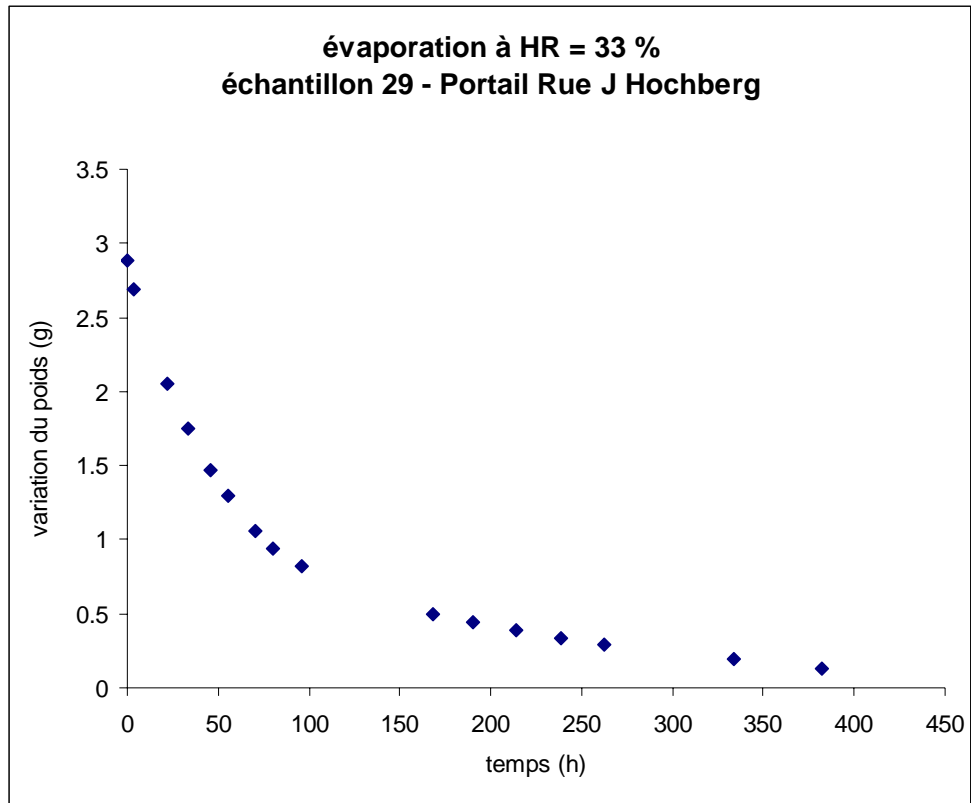


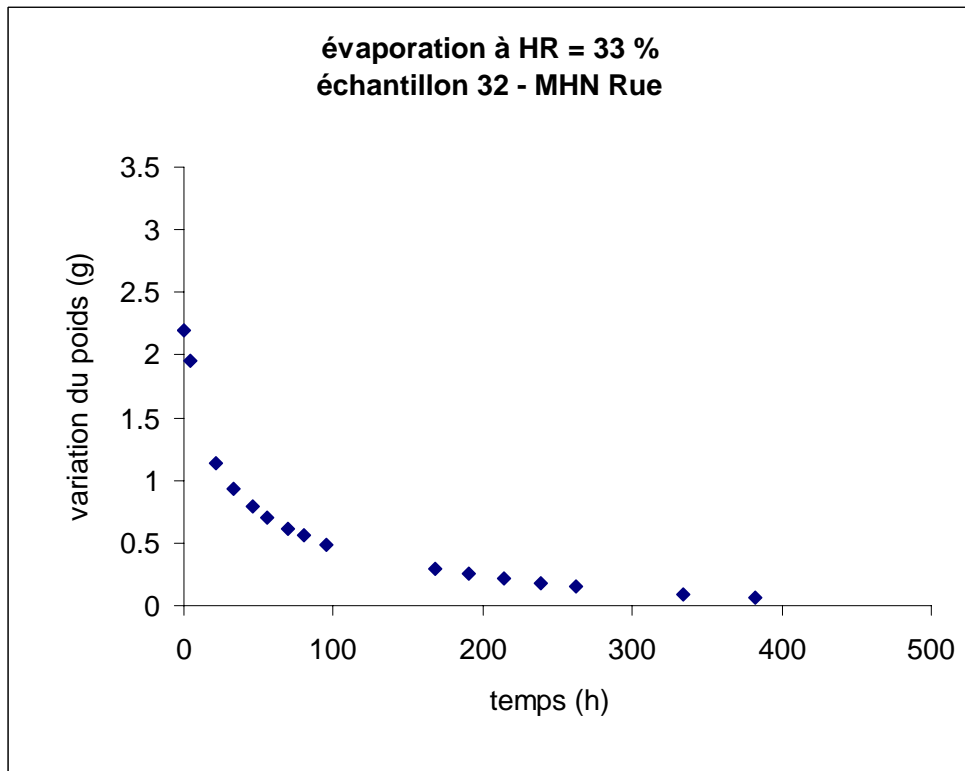
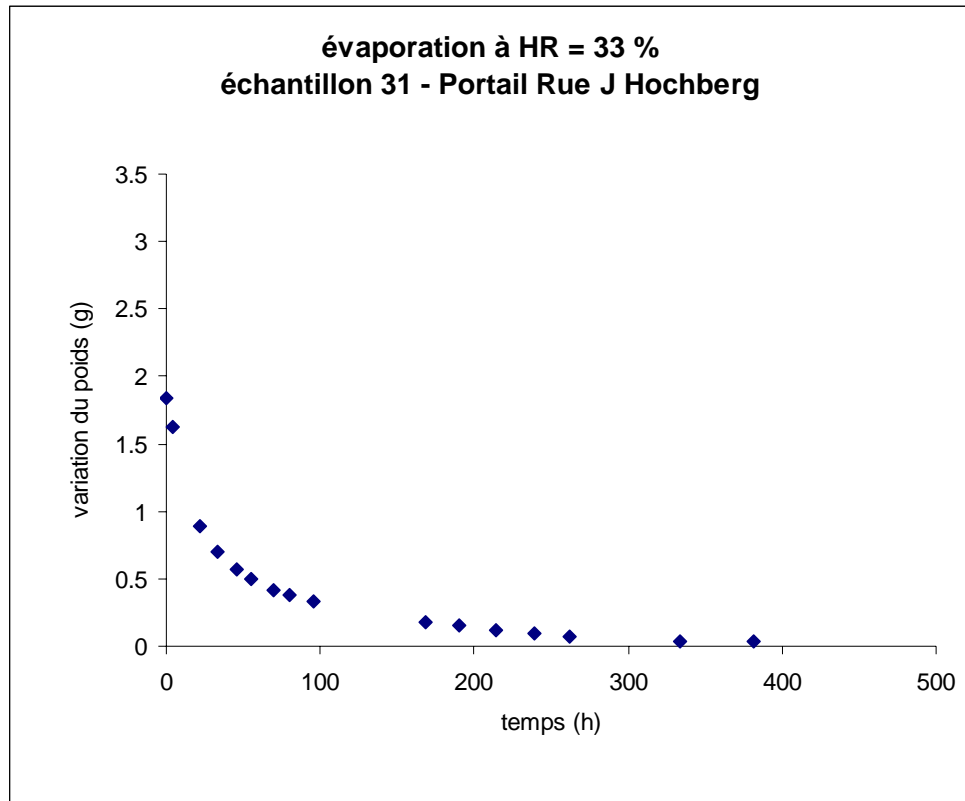












ANNEXE 9

ADSORPTION DE VAPEUR D'EAU

1. PRINCIPE

D'une manière générale, l'adsorption est le résultat d'interactions entre un gaz et une surface solide en contact avec lui. Les charges insaturées à la surface du solide tendent à fixer les molécules de gaz. Le processus d'adsorption se poursuit jusqu'à ce que la couche adsorbée soit en équilibre thermodynamique avec le gaz ou la phase vapeur ambiante. Par conséquent, à partir du moment où un solide se trouve dans une humidité relative non nulle, il y a adsorption de molécules de vapeur d'eau à la surface de ce solide jusqu'à établissement d'un équilibre entre la quantité d'eau adsorbée et la vapeur d'eau en contact avec le solide considéré. La cinétique de cette adsorption et la quantité adsorbée dépendent de l'état physico-chimique du solide et de l'aire de la surface (Fripiat et al., 1971).

L'hygroscopicité des pierres dépend de leur composition minéralogique, de la géométrie de leur réseau poreux et de la présence d'éventuels polluants : La grande majorité des minéraux sont très peu hygroscopiques exceptés les minéraux argileux qui peuvent adsorber des quantités de vapeur d'eau importantes. Si les pierres sont polluées par des sels solubles, ceux-ci sont susceptibles de rendre la pierre indirectement très hygroscopique. Et enfin, plus un matériau est microporeux, plus sa surface spécifique (rapport surface développée /volume) est grande et plus il est capable d'adsorber de grandes quantités de molécules de vapeur d'eau.

Pour déterminer l'hygroscopicité des échantillons, ceux-ci sont placés secs dans des enceintes à humidité relative et température contrôlées, et ils sont pesés régulièrement jusqu'à stabilisation du poids.

On détermine le poids d'équilibre pour un même échantillon à des humidités relatives croissantes : 33, 75, 93 et 97%. Pour cela l'échantillon considéré est d'abord placé sec à 33% d'humidité relative, puis lorsque son poids est stable – c'est-à-dire lorsqu'il est en équilibre avec le milieu ambiant -, il est mis dans une enceinte à 75% d'humidité relative jusqu'à poids constant et ainsi de suite.

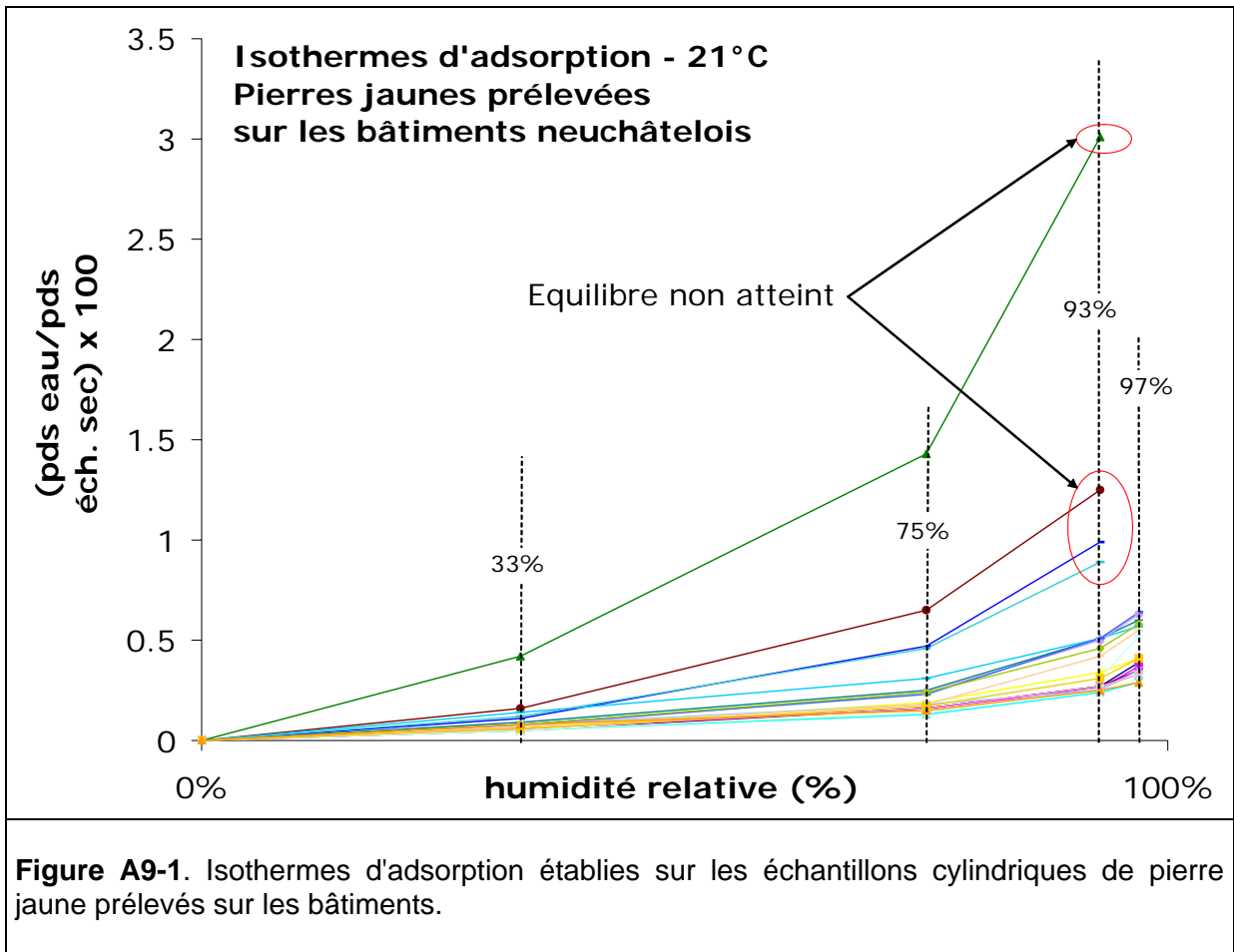
La stabilisation du poids aux humidités relatives élevées pouvant prendre du temps, nous avons choisi d'interrompre nos essais après 100 jours, que leur poids soit stable ou non. Les échantillons étaient les cylindres de 4.5 cm de haut et de 2.6 cm de diamètre, et la température était à 21°C.

2. RESULTATS : ECHANTILLONS PRELEVES SUR LES MONUMENTS

Légende des tableaux :

HR = humidité relative

		(Prise de poids en eau / poids de l'échantillon sec) x 100			
Bâtiment	Éprouvette	HR 33%	HR 75%	HR 93%	HR 97%
Hôpital Pourtalès	ne1	0.06	0.16	0.27	0.39
	ne2	0.06	0.16	0.26	0.37
	ne3	0.06	0.19	0.34	0.41
	ne4	0.05	0.13	0.24	0.29
Maison Wavre	ne5	0.05	0.16	0.27	0.35
	ne6	0.16	0.65	1.25	n.m.
	ne7	0.09	0.25	0.51	0.6
	ne8	0.11	0.47	0.99	n.m.
6, Dupeyrou	ne9	0.14	0.31	0.51	0.57
Portail Collégiale	ne12	0.05	0.18	0.31	0.52
	ne13	0.05	0.14	0.26	0.33
Tour Prison	ne15	0.42	1.43	3.01	n.m.
MHN sous fenêtre	ne17	0.08	0.18	0.25	0.35
	ne18	0.06	0.16	0.27	0.33
	ne19	0.07	0.24	0.5	0.63
	ne20	0.07	0.18	0.42	0.55
	ne21	0.08	0.23	0.51	0.64
Portail Rue Jeanne de Hochberg	ne28	0.12	0.46	0.89	n.m.
	ne29	0.08	0.24	0.46	0.58
	ne30	0.06	0.17	0.31	0.41
	ne31	0.08	0.15	0.25	0.29
Moyenne		0.10	0.30	> 0.58	> 0.45
Ecart type		0.08	0.29	> 0.62	> 0.13
Minimum		0.05	0.13	0.24	0.29
Maximum		0.42	1.43	> 3.01	> 0.64
Effectif		21			17
Nombre de faciès		18			14
<p>Tableau A9-1. Résultats des adsorptions de vapeur d'eau exprimés en pourcentage de prise de poids à l'équilibre pour les humidités relatives de 33, 75, 93 et 97%. Les échantillons 6, 8, 15 et 28 n'avaient pas atteint leur poids d'équilibre (à 93%) lors de l'interruption des mesures après 100 jours. N.m. = non mesuré.</p>					



ANNEXE 10

DIFFUSIVITE DE LA VAPEUR D'EAU (PERMEABILITE A LA VAPEUR)

1. PRINCIPE

Lorsque, dans l'air, deux masses de vapeur d'eau sont à des pressions partielles différentes, le système qu'elles constituent se trouve en déséquilibre. Les molécules de vapeur d'eau se déplacent, par diffusion, du point où la pression partielle (ou concentration) est la plus forte vers le point où elle est la plus faible afin d'homogénéiser le système.

Dans un milieu poreux comme la pierre jaune de Neuchâtel, le transfert de vapeur d'eau dans les pores est gouverné par différents mécanismes qui dépendent à la fois de la pression partielle de vapeur, de la dimension des pores mais aussi de leur géométrie et de la tortuosité du réseau poreux.

De la diffusion de vapeur d'eau à travers le réseau poreux d'une pierre dépend sa capacité à s'équilibrer avec l'humidité relative ambiante, mais aussi sa capacité à sécher lorsqu'elle est mouillée.

Pour mesurer la vitesse de diffusion ou perméabilité à la vapeur d'eau, les éprouvettes de pierre jaune ont été emballées dans un manchon en plastique de sorte que seules les deux faces planes parallèles soient libres. L'une de ces faces a été ajustée sur un récipient en verre contenant une saumure contrôlant une humidité relative à 97%. Cette face "inférieure" de l'échantillon pouvait échanger avec cette ambiance à 97% d'humidité relative. L'ensemble "récipient + saumure 97% + échantillon" a été placé dans une enceinte à 33% d'humidité relative. La face supérieure de l'échantillon pouvant échanger avec cette ambiance à 33% d'humidité relative, il s'est mis en place, à travers l'échantillon, un transfert de vapeur d'eau depuis le récipient à 97% d'humidité relative vers l'enceinte à 33% d'humidité relative. L'ensemble "récipient + saumure 97% + échantillon" a donc progressivement perdu du poids. Cette perte de poids a été suivie par pesée à intervalles de temps réguliers.

Les échantillons étaient les cylindres de 4.5 cm de haut et de 2.6 cm de diamètre, et la température était à 21°C.

2. RESULTATS : ECHANTILLONS PRELEVES SUR LES MONUMENTS

Légende des tableaux :

HR = humidité relative

Bâtiment	Eprouvette	Flux (g/h.cm ²) x10 ⁻⁴
Hôpital Pourtalès	ne1	3.9
	ne2	4.3
	ne3	3.9
	ne4	3.7
Maison Wavre	ne5	2.9
	ne6	2.0
	ne7	4.3
	ne8	3.5
6, Dupeyrou	ne9	3.5
Portail Collégiale	ne 2	3.7
	ne13	1.8
Tour Prison	ne15	1.4
MHN sous fenêtre	ne17	3.9
	ne18	3.9
	ne19	3.3
	ne20	2.9
	ne21	2.6
	ne22	3.1
	ne23	2.6
ne24	2.4	
MHN cour	ne25	2.6
	ne26	2.6
	ne27	2.4
Portail Rue Jeanne de Hochberg	ne28	3.3
	ne29	3.5
	ne30	3.9
	ne31	3.7
MHN Rue	ne32	2.6
	ne33	3.9
Moyenne		3.2
Ecart type		0.7
Minimum		1.4
Maximum		4.3
Effectif		29
Nombre de faciès		21
<p>Tableau A10-1. Flux de diffusivité de la vapeur d'eau à travers les échantillons cylindriques de pierre jaune prélevés sur les bâtiments. Épaisseur ≈ 4 cm, diamètre ≈ 2.5 cm. Gradient d'humidité relative : 64 unités (97% d'un côté des échantillons, 33% de l'autre côté). Température ≈ 21°C.</p>		

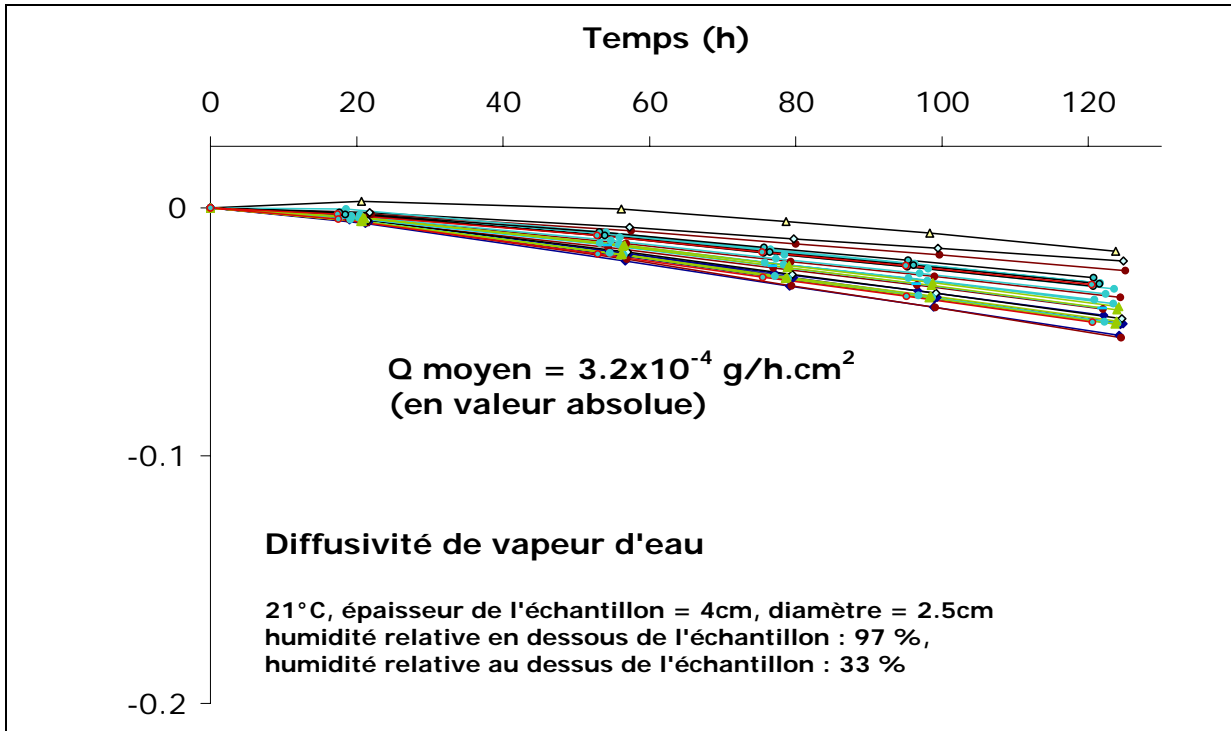


Figure A10-1. Flux de diffusivité de la vapeur d'eau à travers les échantillons cylindriques de pierre jaune prélevés sur les bâtiments.

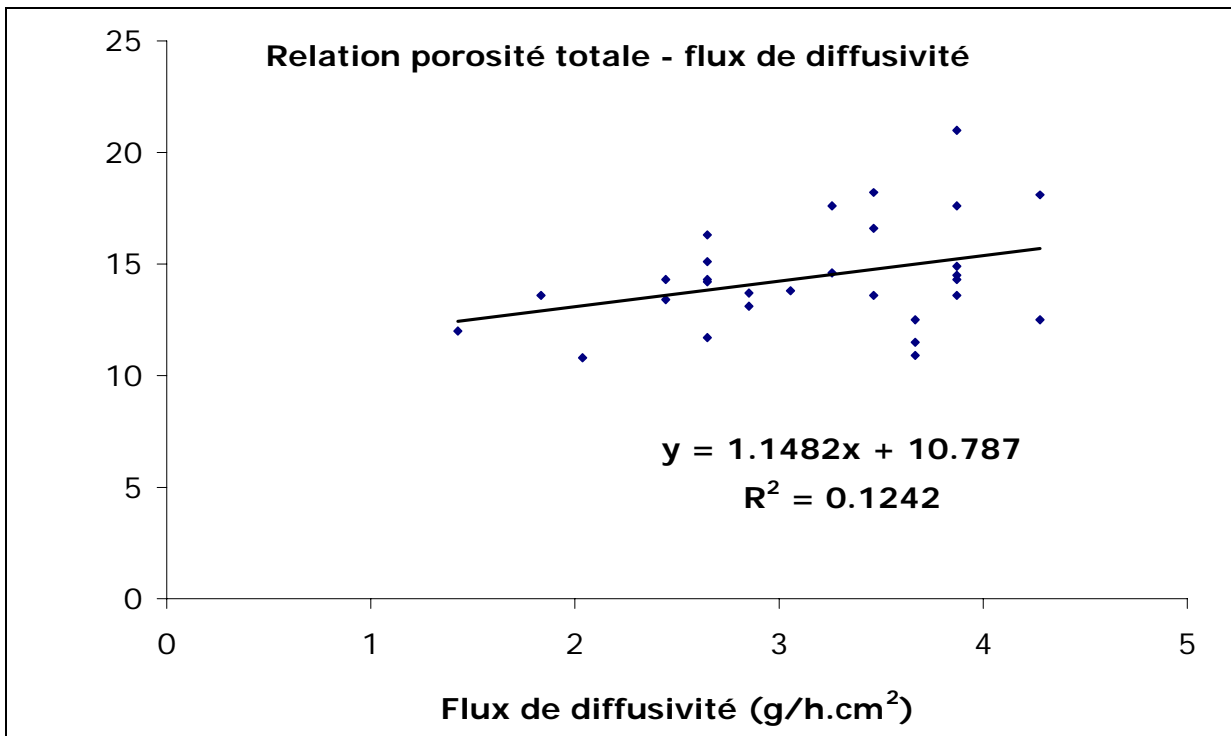


Figure A10-2. Corrélation entre le flux de diffusivité de la vapeur d'eau et la valeur de porosité totale.

ANNEXE 11

RESISTANCE A LA COMPRESSION UNIAXIALE

1. PRINCIPE

La résistance des roches est la propriété traduisant leur comportement lorsqu'elles subissent des forces mécaniques extérieures et en particulier les forces de pression lorsque ces pierres font partie d'un mur ou de toute autre construction. C'est la résultante de la résistance des composants minéralogiques et de leurs liaisons inter et intra-cristallines. Ce comportement s'exprime par la contrainte critique, provoquant la rupture ou la fissuration d'un échantillon.

Les échantillons présentant 2 faces planes parfaitement connues et parallèles, sont posés sur une presse hydraulique après séchage à 60°C. L'effort de compression est exercé perpendiculairement à ces deux faces parallèles. La charge est appliquée de manière continue et sans choc. On enregistre la charge pour laquelle la rupture de l'échantillon est atteinte.

Le mode opératoire suivi pour réaliser ces mesures correspond à celui préconisé par les normes RILEM (1978 – essai n°III-5).

2. RESULTATS

Légende des tableaux :

Rsec = résistance à la compression uniaxiale sur échantillons secs

Chaque bloc continu de couleur verte ou blanche correspond à un faciès

2.1. Félix C., 1993 (rapport 32/93/LCP)

Litage perpendiculaire	
Échantillon	Rsec (N/mm ²)
PJ NE 18 - 1	22.9
PJ NE 18 - 2	30.7
PJ NE 18 - 3	26.5
PJ NE 18 - 4	24.6
PJ NE 18 - 5	24.3
PJ NE 18 - 5	26.1
Moyenne	25.9
Ecart Type	2.73
Minimum	22.9
Maximum	30.7
Effectif	6
Nb faciès	1
<p>Tableau A11-1. Résultats des mesures de résistance à la compression uniaxiale effectuées sur les échantillons prélevés par Félix (1993) et dont le litage était perpendiculaire au sens de mesure de la dilatation - Type d'échantillons : cubes 7 x 7 x 7 cm.</p>	

2.2. Échantillons prélevés sur les monuments

Litage perpendiculaire		
Bâtiment	Ech.	Rsec (N/mm ²)
Hôpital Pourtalès	ne1	16.3
	ne2	17.1
Maison Wavre	ne5	19.3
	ne6	20.2
6, Dupeyrou	ne9	16.9
Portail Collégiale	ne12	9.6
MHN sous fenêtre	ne22	20.4
	ne23	23.2
Portail Rue J. Hochberg	ne28	16.8
Moyenne		17.8
Ecart Type		3.8
Minimum		9.6
Maximum		23.2
Effectif		9
Nb faciès		8
<p>Tableau A11-2. Résultats des mesures de résistance à la compression uniaxiale effectuées sur les échantillons prélevés sur les bâtiments et dont le litage était perpendiculaire à la pression appliquée - Type d'échantillons : quarts de cylindres de 4.5 cm de haut et de 2.6 cm de diamètre</p>		

Litage parallèle		
Bâtiment	Ech.	Rsec (N/mm ²)
Hôpital Pourtalès	ne4	20.1
Maison Wavre	ne7	32.6
Tour Prison	ne15	n.d.
MHN sous fenêtre	ne18	17.2
MHN cour	ne25	12.6
Portail Rue J. Hochberg	ne30	17.8
MHN Rue	ne32	18.9
Moyenne		19.9
Ecart Type		6.7
Minimum		12.6
Maximum		32.6
Effectif		6
Nb faciès		6

Tableau A11-3. Résultats des mesures de résistance à la compression uniaxiale effectuées sur les échantillons prélevés sur les bâtiments et dont le litage était parallèle à la pression appliquée - Type d'échantillons : quarts de cylindres de 4.5 cm de haut et de 2.6 cm de diamètre

2.3. Échantillons prélevés sur les fronts de taille

Litage perpendiculaire	
Éprouvette	Rsec (N/mm ²)
H5a	49.5
H5b	41.2
H6a	18.4
H6b	16.5
H9a	38.8
H9b	37.0
H10a	41.8
H13a	58.5
H13b	54.9
Moyenne	39.6
Ecart type	14.5
Minimum	16.5
Maximum	58.5
Effectif	9
Nb de faciès	5

Tableau A11-4. Résultats des mesures de résistance à la compression sur échantillons secs, effectuées sur les échantillons prélevés sur les fronts de taille et dont le litage était perpendiculaire au sens de mesure - Type d'échantillons : cubes de 4 cm d'arête

ANNEXE 12

DILATATION HYDRIQUE

1. PRINCIPE

Indépendamment de la température, tout matériau poreux, en absorbant de l'eau, change de dimension. Ce phénomène est appelé dilatation hydrique isotherme.

L'essai de dilatation est facile à réaliser : une éprouvette sèche de longueur initiale L_0 est plongée dans l'eau au temps $t=0$. La cinétique de son allongement peut être suivie en fonction du temps. La mesure de la dilatation du matériau après 72 heures d'immersion permet de définir le coefficient de dilatation hydrique ε_{72} .

Le mode opératoire suivi pour réaliser ces mesures correspond à celui préconisé par les normes RILEM (1978 – essai n°II-7).

2. RESULTATS

Légende des tableaux :

ε_{72} = coefficient de dilatation à 72 heures

Chaque bloc de couleur verte ou blanche correspond à un faciès

2.1. Félix C., 1993 (rapport 32/93/LCP)

Litage perpendiculaire	
Échantillon	ε_{72} (mm/m)
PJ NE 18 - 1	0.09
PJ NE 18 - 2	0.11
PJ NE 18 - 3	0.11
PJ NE 18 - 4	0.12
PJ NE 18 - 5	0.10
PJ NE 18 - 5	0.10
Moyenne	0.11
Ecart Type	0.01
Minimum	0.09
Maximum	0.12
Effectif	6
Nb faciès	1

Tableau A12-1. Résultats des dilatactions hydriques effectuées sur les échantillons prélevés par Félix (1993) et dont le litage était perpendiculaire au sens de mesure de la dilatation - Type d'échantillons : prismes 10 x 4 x 4 cm.

2.2. Échantillons prélevés sur les monuments

Litage parallèle		
Bâtiment	Ech.	ε_{72} (mm/m)
Hôpital Pourtalès	ne4	0.66
Maison Wavre	ne7	0.50
Tour Prison	ne15	0.39
MHN sous fenêtre	ne18	0.22
MHN cour	ne25	0.40
Portail Rue J. Hochberg	ne30	0.53
MHN Rue	ne32	0.70
	Moyenne	0.49
	Ecart Type	0.17
	Minimum	0.22
	Maximum	0.70
	Effectif	7
	Nb faciès	7

Litage perpendiculaire		
Bâtiment	Ech.	ε_{72} (mm/m)
Hôpital Pourtalès	ne1	0.38
	ne2	0.40
Maison Wavre	ne5	0.34
	ne6	0.54
6, Dupeyrou	ne9	0.39
Portail Collégiale	ne12	0.45
MHN sous fenêtre	ne22	0.48
	ne23	0.39
Portail Rue J. Hochberg	ne28	0.44
	Moyenne	0.42
	Ecart Type	0.06
	Minimum	0.34
	Maximum	0.54
	Effectif	9
	Nb faciès	8

Tableaux A12-2. Résultats des dilatactions hydriques effectuées sur les échantillons prélevés sur les bâtiments et dont le litage était perpendiculaire au sens de mesure de la dilatation - Type d'échantillons : quarts de cylindres de 4.5 cm de haut et de 2.6 cm de diamètre

ANNEXE 13

DILATATION THERMIQUE

1. PRINCIPE

Tout matériau tend à changer de dimensions lorsqu'il subit des variations de températures. Ce sont ces variations que nous proposons de quantifier ici pour le matériau pierre jaune de Neuchâtel.

L'essai de dilatation thermique est réalisé comme suit : les éprouvettes sèches de longueur initiale L_0 sont placées entre des capteurs métalliques dont la distance qui les sépare est lisible sur un comparateur de précision. Un capteur de température inséré dans un échantillon renseigne sur la température réelle à l'intérieur du matériau. Le tout est placé dans un four, et la température (du matériau) est montée par paliers successifs de 20 jusqu'à 70 °C, par pas de 10°C/h. Lorsque la température atteint 50°C, elle est stabilisée jusqu'à ce que la longueur des échantillons soit stable. Puis la température est à nouveau augmentée jusqu'à 70°C. Ce sont les variations de longueur à 70°C qui sont fournies dans les tableaux suivants.

Le mode opératoire suivi pour réaliser ces mesures est inspiré de celui préconisé par les normes RILEM (1978 – essai n°VI-3).

2. RESULTATS

Légende des tableaux :

ε_{70° = coefficient de dilatation thermique à 70°C

Chaque bloc de couleur verte ou blanche correspond à un faciès

2.1. Échantillons prélevés sur les monuments

Litage perpendiculaire		
Bâtiment	Ech.	ε_{70° (mm/mm.°C) $\times 10^{-6}$
Hôpital Pourtalès	ne1	3.4
	ne2	7.9
Maison Wavre	ne5	8.9
	ne6	10.8
6, Dupeyrou	ne9	10.7
Portail Collégiale	ne12	10.0
MHN sous fenêtre	ne22	11.3
	ne23	10.7
Portail Rue J. Hochberg	ne28	9.2
Moyenne		9.2
Ecart Type		2.4
Minimum		3.4
Maximum		11.3
Effectif		9
Nb faciès		8
<p>Tableau A13-1. Résultats des dilatations thermiques effectuées sur les échantillons prélevés sur les bâtiments et dont le litage était perpendiculaire au sens de mesure de la dilatation - Type d'échantillons : quarts de cylindres de 4.5 cm de haut et de 2.6 cm de diamètre</p>		

Litage parallèle		
Bâtiment	Ech.	ε_{70° (mm/mm.°C) $\times 10^{-6}$
Hôpital Pourtalès	ne4	8.2
Maison Wavre	ne7	7.5
Tour Prison	ne15	9.6
MHN sous fenêtre	ne18	8.4
MHN cour	ne25	9.2
Portail Rue J. Hochberg	ne30	n.m.
MHN Rue	ne32	8.8
Moyenne		8.6
Ecart Type		0.7
Minimum		7.5
Maximum		9.6
Effectif		6
Nb faciès		6
<p>Tableau A13-2. Résultats des dilatations thermiques effectuées sur les échantillons prélevés sur les bâtiments et dont le litage était parallèle au sens de mesure de la dilatation - Type d'échantillons : quarts de cylindres de 4.5 cm de haut et de 2.6 cm de diamètre. N.m. : non mesuré.</p>		

ANNEXE 14

MESURES COLORIMETRIQUES

1. PRINCIPE

La perception de la couleur repose sur une dualité : son origine physique et l'interprétation de sa perception sous la forme d'une sensation visuelle. La mesure de la couleur est donc complexe et oblige à faire appel à deux systèmes de mesure différents, l'un fondé sur l'analyse physique de l'énergie rayonnante, l'autre sur l'évaluation visuelle de l'apparence des sensations colorées. Nous nous limiterons à la première.

La colorimétrie est essentiellement objective et constitue un langage chromatique précis : la spécification d'une couleur en colorimétrie requiert trois valeurs numériques qui permettent de chiffrer et de fixer celle-ci sans ambiguïté. A partir d'un cercle chromatique, toutes les couleurs sont classées dans un réseau cylindrique appelé l'espace colorimétrique.

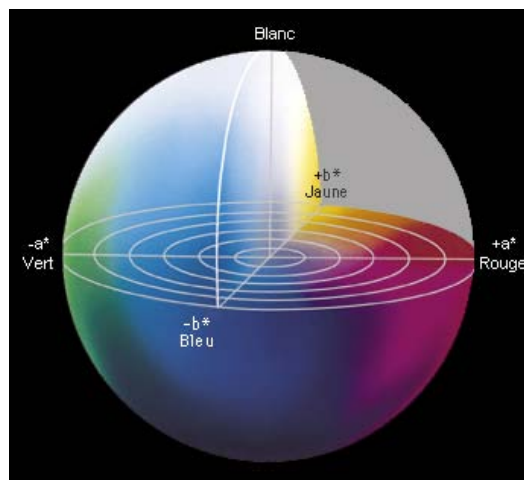


Figure A14-1. Représentation de l'espace colorimétrie CIELAB

Dans ce système, les trois facteurs sont :

- la teinte ou tonalité, qui correspond à la qualité de la couleur et qui se situe sur la conférence d'un cercle dans l'espace colorimétrique ;
- la luminosité, qui varie des couleurs sombres (en bas de l'arbre) aux couleurs claires (au haut de l'arbre) ;
- la saturation, qui indique la pureté ou l'intensité de la couleur. Dans l'espace colorimétrique, elle augmente horizontalement des couleurs grises (au centre) aux couleurs vives (sur la périphérie).

Dans notre cas, les mesures sont faites dans l'espace colorimétrique "Lab", où **L** est la luminosité est varié de 0 (noir) à 100 (blanc), **a** un paramètre de teinte qui varie de -60 (vert) à +60 (rouge) et **b** un second paramètre de teinte variant lui aussi de -60 à +60, mais caractérisant respectivement les teintes bleu et jaune.

Nous avons effectué les mesures à l'aide d'un spectrocolorimètre Minolta CM – 508i.

2. RESULTATS

Chaque valeur reportée dans ce tableau correspond à une moyenne de plusieurs mesures (de 4 à 15 mesures).



L	38.5	57.4
a	3	15.3
b	4.3	23.6
	patine moyenne brun-gris mate soutenue	nettoyage à la boucharde

Rue du Château, 11 (librairie de l'Aubier)



L	63.4	62.1
a	4.7	5.1
b	25.8	28.9
	n°6, hydrogommage récent + traitement hydrofuge	n°4, hydrogommage

Avenue Dupeyrou, n°4 et 6



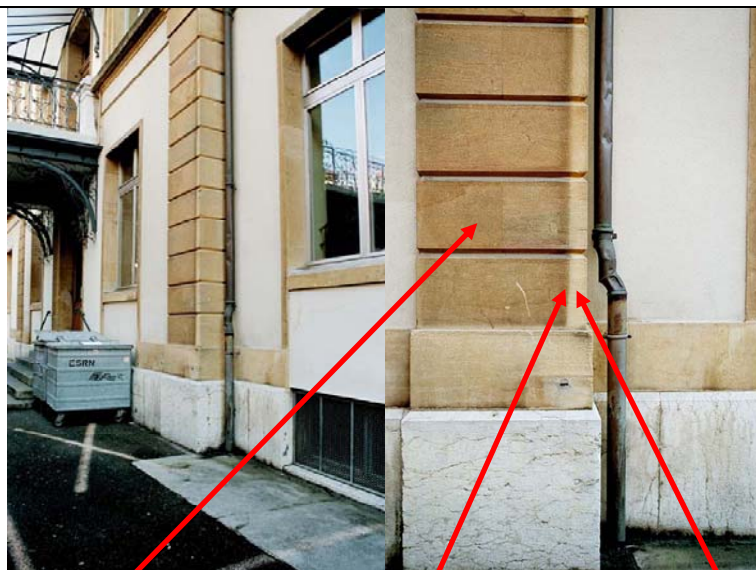
L	55	59.2
a	5.3	5.1
b	27.4	27.6
	n°20, patine légère brun-jaune	n°18, hydrogommage récent

Avenue des Beaux Arts, n°18 et 20



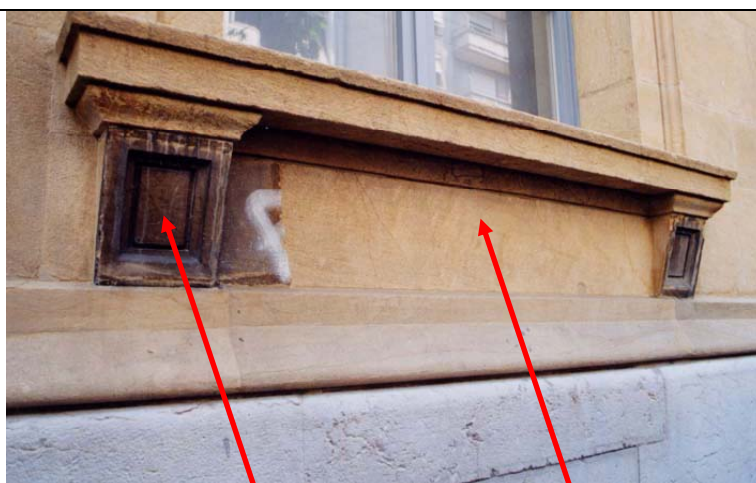
L	45.7	65
a	3.3	3.1
b	15.1	21.3
	salissement intérieur (cf. annexe 15, zone de lecture) : patine brun-jaune	extérieur : hydrogommage agressif

Place Numaz Droz, 3 (Collège latin)



L	48.5	42.9	64
a	5.3	5.4	4.1
b	22.7	20.5	27.1
	patine légère brun-jaune	patine moyenne brune	lessivage naturel (pluie)

Rue des Terreaux, 10-12 (Collège Terreaux)



L	29.6	62.5
a	1.6	3.3
b	5.9	18
	patine épaisse brun-noire, d'aspect glacé	hydrogommage

Rue des Terreaux, 14 (Musée d'Histoire Naturelle)



L	68.3	57
a	4.5	6.4
b	24	26.7
	hydrogommage agressif	Hydrogommage plus "doux"

Faubourg de l'Hôpital, 18 et Faubourg du lac, 13

ANNEXE 15

MACRO-PHOTOGRAPHIES


1. PRINCIPE




Si des photographies sont prises avec un éclairage rasant, il est possible de mettre en évidence les reliefs d'une surface. En effet, un éclairage rasant est une lumière qui effleure la surface, de sorte que chaque aspérité projette une ombre. Cet éclairage permet donc de révéler la texture de l'objet observé.




Les prises de vue ont été faites à l'aide d'un appareil Canon reflex numérique 350D, à une distance de l'objet de l'ordre de 10 cm, avec un éclairage parfaitement contrôlé et reproductible obtenu grâce à deux néons ultra-violets placés de part et d'autre de la surface à observer sous une boîte noire que l'on plaque contre la surface à photographier.

2. RESULTATS

Toutes les macro-photos suivantes représentent des surfaces de 5.5 x 4 cm.

Bâtiment / objet	Macrophotographie de la surface
<p>Avenue des Beaux Arts, 18-20</p> <p>1 seul bloc</p>	 <p data-bbox="608 1816 927 1883">N°20 patine légère brun-jaune</p> <p data-bbox="1043 1816 1251 1883">N°18, hydrogommage</p> <p data-bbox="531 1912 1350 2011">La rugosité de surface est peu modifiée par l'hydrogommage peu agressif mais relativement efficace : la pierre est nettement plus propre</p>

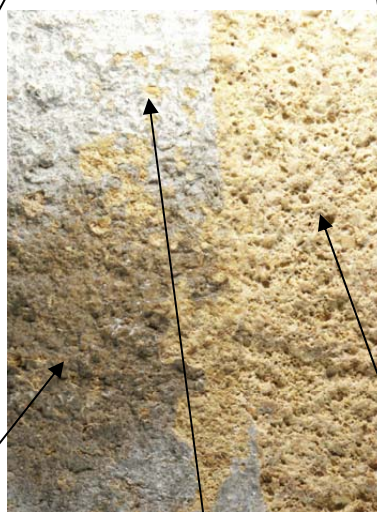
<p>Place Numa Droz, 3 (Collège latin)</p> <p>Hall, 2^{ème} étage, (zone de lecture) 1^{ère} fenêtre face rue, à gauche des escaliers</p> <p>2 blocs différents</p>	 <p>Pourtour des blocs</p>  <p>Extérieur : bord extérieur du montant Hydrogommage "agressif"</p>  <p>Intérieur : bord intérieur du montant Patine brun-jaune</p> <p>L'hydrogommage effectué à l'extérieur a nettement effacé les traces d'outils et a fortement augmenté la rugosité de surface, tout en nettoyant parfaitement (trop?) bien</p>
--	--

<p>Rue des Terreaux, 10-12 (Collège Terreaux)</p> <p>Chaîne d'angle, façade nord.</p> <p>1 seul bloc</p>	 <p>Pourtour supérieur du bloc</p>  <p>Patine légère brun-jaune</p>  <p>Lessivage naturel (pluie)</p> <p>Le lessivage par les pluies a abouti à une surface nettement propre mais plus rugueuse que la surface non lessivée. De plus, ce lessivage naturel entraîne une progressive disparition des traces d'outil (rabot sur le pourtour du bloc)</p>
--	---



Rue des Terreaux,
14 (Musée
d'Histoire
Naturelle)

1 seul bloc



Patine brun-noire

Graffiti

Hydrogommage

Le nettoyage par hydrogommage, à cet endroit précis, a dû être très intense afin de pouvoir ôter la peinture du graffiti en plus de la patine brun-noire préexistante. Ce traitement, efficace d'un point de vue nettoyage, a nettement érodé la pierre.

Rue des Terreaux,
14 (Musée
d'Histoire
Naturelle)

1 seul bloc



compresse

hydrogommage

Ici, l'hydrogommage, plus doux que sur la zone précédente a néanmoins érodé la surface de manière évidente lorsqu'on compare le résultat à celui obtenu avec un nettoyage par compresse. La surface nettoyée par compresse paraît beaucoup plus blanche que la surface hydrogommée parce que seule la patine a été ôtée, mais pas la couche de calcin, mais peut-être aussi en raison de la "pollution" de la surface par des éléments de la compresse



Faubourg de l'Hôpital, 18
&
Faubourg du lac,
13

2 blocs différents



Faubourg de l'Hôpital, 18
Hydrogommage "agressif" +
Traitement hydrofuge ?



Faubourg du Lac, 13
Hydrogommage "plus doux"

Bien que ces deux clichés correspondent à des blocs de pierres très différents au niveau faciès (fin et oolitique fbg de l'Hôpital, grossier et plus détritique fbg du Lac), on observe néanmoins un nettoyage plus intense faubourg de l'hôpital avec disparition plus complète des traces de bouchardes qui se devinent encore faubourg du lac.

ANNEXE 16

RUGOSIMETRIE

1. PRINCIPE

Afin de vérifier l'innocuité des méthodes de nettoyage, il est possible de vérifier la rugosité de la surface avant et après intervention.

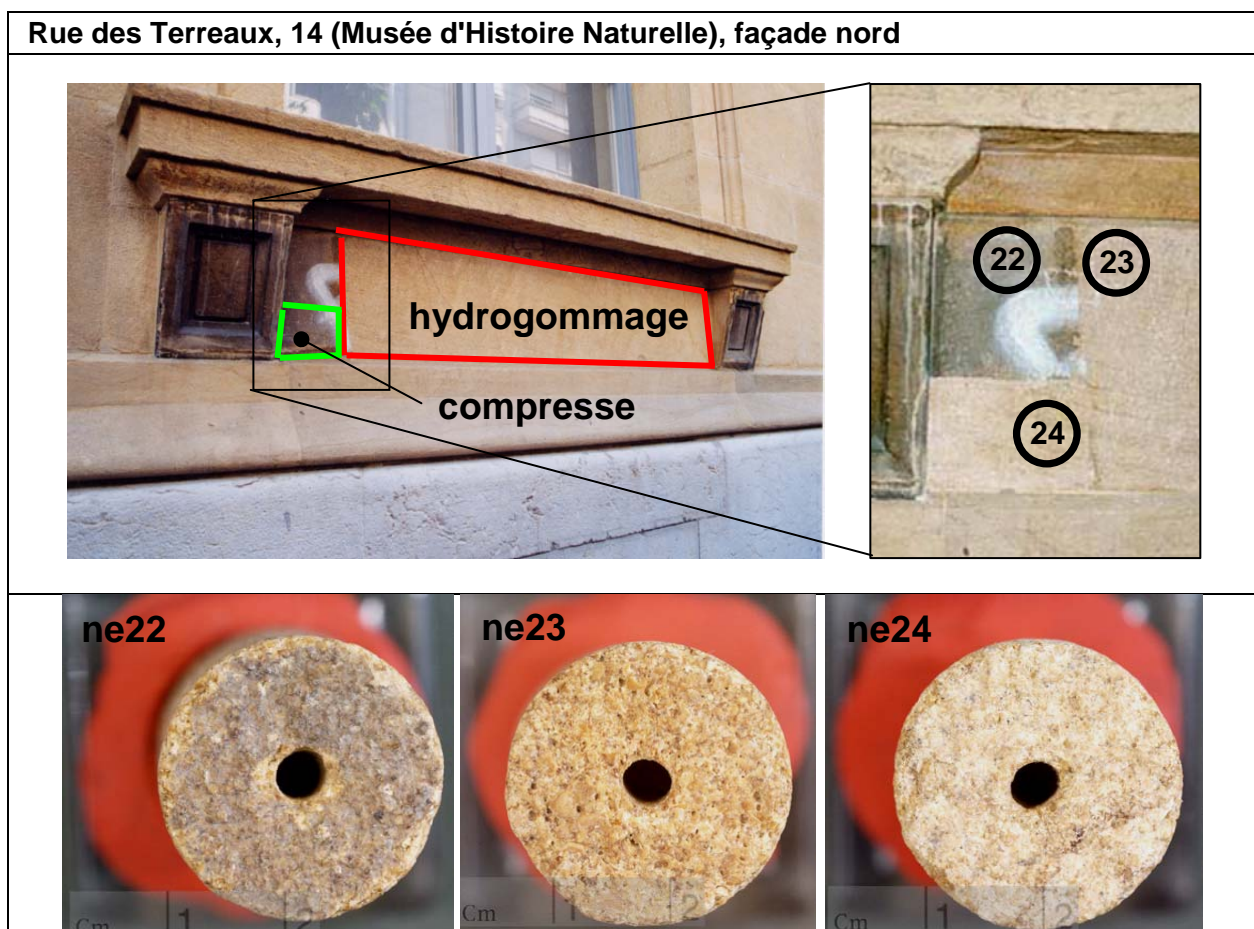
Actuellement, il n'existe pas de technique de mesure de rugosité fiable et facilement utilisable directement sur le terrain. Il est donc nécessaire de procéder soit à un échantillonnage afin de réaliser les mesures directement sur les échantillons, soit à une prise d'empreinte.

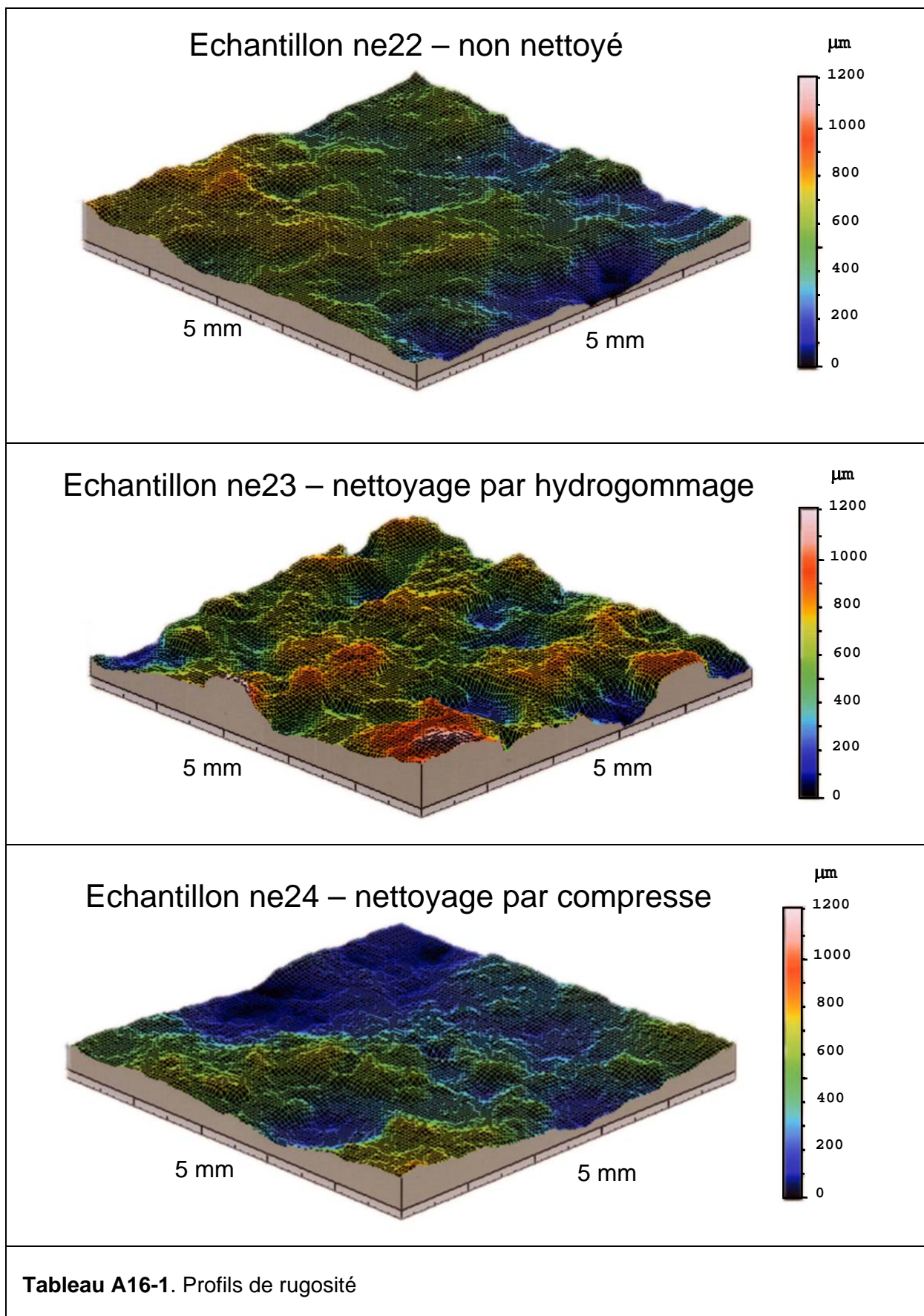
Au moment où les investigations ont été faites, aucune méthode de prise d'empreinte n'était suffisamment au point pour être appliquée. Nous avons donc procédé à des échantillonnages.

Sur les échantillons prélevés, la rugosité de surface a été mesurée sans contact à l'aide d'une technique optique très performante, basée sur le principe de la microscopie confocale et dont la profondeur de champ est parfaitement adaptée aux modifications que nous souhaitons mettre en évidence.

Les mesures ci-dessous ont été effectuées avec la station Micromesure 3D de l'institut des Sciences Appliquées de Strasbourg (France).

2. RESULTATS





Ech.	État de surface	Paramètres expérimentaux				Résultats		
		X (mm)	Y (mm)	Pas de mesure (μm)	S2d (mm ²)	S3d (mm ²)	S3d/S2d	Complexité (%)
ne22	Non nettoyé	5	5	10	25	28.9	1.16	15.6
ne23	Nettoyé par hydrogommage					40.2	1.61	60.8
ne24	Nettoyé par compresse					31	1.24	24.0

Tableau A16-2. Résultats numériques des mesures de rugosité

Légende :

Ech. = échantillon ; X, Y = côtés du parallélépipède parcouru par le faisceau lumineux ;
 S2d = surface projetée ; S3d = surface développée réelle ;
 complexité = $(S3d - S2d) / S3d \times 100$